ACTAS

50 AÑOS

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

TERCER CONGRESO

ARGENTINO DE GEOLOGÍA

APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

24 AL 27 DE SEPTIEMBRE DE 2025 - CÓRDOBA-ARGENTINA

Editores
MARÍA PAULA BUNICONTRO Y NORBERTO JORGE BEJERMAN

ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier método electrónico o mecánico incluyendo fotocopiado, grabación o cualquier otro sistema de archivo y recuperación de información, sin el permiso previo por escrito de los autores. Los trabajos incluidos en este Libro de Actas son originales y son de exclusiva responsabilidad de sus autores y coautores, dejando claramente expresado que no son responsables los editores, las autoridades del Congreso o de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI).

Actas Tercer Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente
Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería ... [et al.] ; Editado por María Paula Bunicontro; Norberto Jorge Bejerman. - 1a ed. - Córdoba : ASAGAI, 2025.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-91401-0-1

1. Geología. 2. Ingeniería Geológica. 3. Hidrogeología. I. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería II. Bunicontro, María Paula, ed. III. Bejerman, Norberto Jorge, ed.
CDD 551.01

La **Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI)** tiene el gusto de presentar en este documento el Acta del Tercer Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Este evento reviste una gran importancia ya que se conmemora el 50° Aniversario de la Asociación que fuera fundada el 29 de diciembre de 1975 en la ciudad de Buenos Aires.

Además de conmemorar este importante hito, el Congreso mantiene como objetivos: *fomentar el diálogo* entre profesionales, investigadores, académicos y estudiantes dedicados a la geología aplicada a la ingeniería y al ambiente, promoviendo también la colaboración interdisciplinaria con especialistas de temáticas relacionadas; *impulsar la presentación y discusión de investigaciones innovadoras, estudios de caso y metodologías* que contribuyan a la resolución de desafíos del mundo real; facilitar el intercambio de experiencias entre profesionales de distintas regiones e instituciones, tanto a nivel nacional como internacional; *fortalecer los vínculos* entre la academia, la industria y los organismos públicos para abordar problemáticas ambientales y de infraestructura de carácter urgente; *inspirar a las nuevas generaciones de geocientíficos*, ofreciendo oportunidades de formación, mentoría y desarrollo profesional; *celebrar el legado y el porvenir de la geología aplicada a la ingeniería en Argentina*, en un marco de excelencia científica y compromiso institucional.

El Congreso retoma su tradicional modalidad presencial, luego del último congreso argentino y conferencia regional, realizados en formato virtual en 2021. Este nuevo entorno propicia un grato encuentro para el intercambio que ha sido posible gracias al envío de decenas de resúmenes y trabajos, así como la participación de numerosos profesionales y estudiantes, los cuales demuestran el importante interés en la temática de las geociencias aplicadas.

El Comité Organizador agradece especialmente a todos los inscriptos y asistentes, a los autores y conferencistas que han participado, a todos los revisores y miembros del Comité Académico por su gran labor y dedicación, a los moderadores de las sesiones así como coordinadores de las mesas redondas y excursión técnica, a las docentes a cargo de los cursos, a los patrocinadores y adherentes que han colaborado con el evento, a la Municipalidad de la ciudad de Córdoba por haber declarado al evento de interés municipal y a la Universidad Tecnológica Nacional por proveer sus instalaciones para el desarrollo del congreso.

Finalmente, extender un especial agradecimiento a quienes colaboraron en la gestión del evento así como en el diseño y mantenimiento de la página web del Congreso y a Alejandra Patricelli por su trabajo en el diseño gráfico.

TEMAS

ASPECTOS GEOLÓGICO-INGENIERILES EN LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS Y PATOLOGÍAS DEL TERRENO

Estudios geológicos y geotécnicos en el proyecto y construcción de obras de ingeniería. Casos de obras. Geología Aplicada a la ingeniería vial, actividad minera, proyectos hidráulicos e hidroeléctricos. Geología Forense.

CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

Mapas geotécnicos, de peligrosidad, susceptibilidad, riesgo y ordenamiento territorial. Uso de Sensores remotos en estudios de geología aplicada.

GEOLOGÍA AMBIENTAL, URBANA Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Geología ambiental, urbana y ordenamiento territorial. Evaluación ambiental de planes, proyectos, obras, intervenciones en áreas urbanas. Geoindicadores, Geofísica y Geoquímica aplicada. Ordenamiento territorial, estudios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos vinculados. Contaminación y degradación de sitios públicos y privados. Recuperación y rehabilitación de espacios degradados. Pasivos ambientales.

GEOLOGÍA COSTERA

Problemática del retroceso costero. Manejo costero y alternaciones de la dinámica litoral. Explotación de acuíferos y de áridos en zonas costeras. Contaminación costera y calidad ambiental de playas. Geomorfología y paisaje costero.

GEOPARQUES Y GEOTURISMO

Geoparques y geositios: gestión y casos de estudio. Gestión de áreas protegidas. Patrimonio geológico. Protección de sitios de interés geológico-paleontológicos.

GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

Hidrología superficial y subterránea. Su interacción. Medidas Estructurales y no estructurales.
Modelación de acuíferos: flujo y transporte.

MECÁNICA DE ROCAS Y SUELOS. FUNDACIONES

Aspectos geomecánicos e hidráulicos de suelos y rocas. Ensayos. Propiedades mecánicas y conservación de la roca ornamental. Impacto de los materiales de construcción sobre las fundaciones. Geomecánica aplicada a la explotación de recursos naturales. Modelado geomecánico. Ensayos de laboratorio y de campo – Planificación, ejecución e interpretación.

MINERÍA METALÍFERA, NO METALÍFERA Y ROCAS DE APLICACIÓN

Aspectos ambientales. Aspectos sociales. Caracterización petrográfica y estructural de yacimientos no metalíferos rocas de aplicación. Diseño y monitoreo de labores mineras. Estabilidad de taludes. Geomecánica minera. Geoquímica, metalogénesis y modelamiento de yacimientos minerales. Gobernanza. Hidrología e hidrogeología y su impacto en las obras mineras. Modelado numérico. Ore control.

RIESGO GEOLÓGICO

Erosión. Expansividad y colapsabilidad de suelos. Hundimientos y subsidencias. Inundaciones. Vulnerabilidad o contaminación de acuíferos/recursos hídricos. Remoción en masa: reptación, flujos y deslizamientos. Estabilidad de laderas y taludes. Sismos: licuefacción de suelos, fallas activas, tsunamis, seiches, efectos directos. Volcanismo activo.

COMITÉ ORGANIZADOR

PRESIDENTE
MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman
Consultor

SECRETARIA
MSc Ingeniera María Pía Cruz
InGeo Consultora Geotécnica – Universidad Católica de Córdoba – Universidad Nacional de Córdoba – Universidad Nacional de La Rioja.

TESORERO
Mg. Geól. Fabio Sergio Luna
Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires

MIEMBROS

Mg. Lic. Marita N. Ahumada
Consultora
Instituto Superior Tecnológico de Mendoza
Asociación Internacional para Promoción de la Geoética

Dr. Ing. Gonzalo M. Aiassa Martinez
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Centro de Investigación y desarrollo en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones. Departamento de Ingeniería Civil.

Dra. María Victoria Altinier
Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos. Gerencia de Área Seguridad Nuclear y Ambiente. Comisión Nacional de Energía Atómica. Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Dr. Ing. Pedro A. Arrúa
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Centro de Investigación y desarrollo en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones. Departamento de Ingeniería Civil.

Dra. María Paula Bunicontro
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad de Buenos Aires – Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires.
Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

Mg. Claudina Di Martino
Departamento Geología, Universidad Nacional del Sur. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires – Universidad Nacional del Sur). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca.

Dr. Mauricio Giambiastiani
MPa Consultoría – Universidad Nacional de La Rioja – Universidad Nacional de Córdoba.

Lic. Julia Löffler
STANTEC Argentina. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata.
Ing. Ind. Diana Martinez Vera
Consultora en Gestión Ambiental e Higiene y Seguridad.

COMITÉ ACADÉMICO

COORDINADORES

MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman
Consultor

Dra. María Paula Bunicontro
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad de Buenos Aires-- Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

Mg. Claudina Di Martino
Departamento Geología, Universidad Nacional del Sur. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires – Universidad Nacional del Sur). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca.

Dr. Ing. Gonzalo M. Aiassa Martinez
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Centro de Investigación y desarrollo en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones. Departamento de Ingeniería Civil.

MIEMBROS

Marita N. Ahumada
Instituto Superior Tecnológico de Mendoza. Argentina

Gonzalo M. Aiassa Martinez
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Argentina

Edgardo René Albouy
Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Argentina

Pedro Ariel Arrúa
Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Argentina

Liliana Castro
Universidad de Buenos Aires. Argentina

Mauricio Giambastiani
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

Claudio Lexow
Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Argentina

Julia Löffler
Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Argentina

Rubén A. López
Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina

Eduardo E. Mariño,
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. Argentina

Adriana E. Mehl
Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales de La Pampa (CONICET-UNLPAM). Argentina

José Sellés Martínez
Universidad de Buenos Aires. Argentina

Roberto A. Violante
Universidad de Buenos Aires. Argentina

Diego Alejandro Winocur
Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina

COORDINACIÓN EXCURSION TÉCNICA

Msc. Geól. Agustín Balbis

Diseño Gráfico
Alejandra Patricelli

PATROCINADORES

ORO

BRUGG Geobrugg
Safety is our nature

PLATA

srk consulting

TACA TACA
SALTA ARGENTINA | FIRST QUANTUM MINERALS LTD

GEOTUB 20 AÑOS

COLABORADORES

abyaterra

MINESUPPLIES

ROBOTA

ADHERENTES

ENGEOL IAEG AIGI

PLACET NATURA REGI TERRAM
INTERNATIONAL ASSOCIATION for PROMOTING GEOETHICS

WIM
WOMEN IN MINING ARGENTINA
diversidad para la excelencia

UBA Universidad de Buenos Aires

CONICET

ICeBA

CONICET CIC
I H L L A

AATES Asociación Argentina de Túneles y Espacios Subterráneos

SegemAR Servicio Geológico Minero Argentino

AMERHID

AIDIS ARGENTINA

ACHIGEO

COMITÉ ARGENTINO DE PRESAS

AAGG

UNLPam

COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE CÓRDOBA

saig Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica

COLEGIO DE GEÓLOGOS SANTA CRUZ BOLIVIA

FaIn UNCo FACULTAD DE INGENIERÍA

Universidad Nacional de Río Negro

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales

UCC Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba

Universidad Nacional de La Rioja Departamento Académico de Ciencias y Tecnologías Aplicadas a la Producción, al Ambiente y al Urbanismo

FCEFyN

CONSEJO SUPERIOR PROFESIONAL DE GEOLOGÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

insutec Instituto Superior Tecnológico 9-019

CONTENIDOS

Pág. 9 CONFERENCIAS

Pág. 15 RESÚMENES
Aspectos geológico-ingenieriles
Cartografía temática
Geología ambiental, urbana y ordenamiento territorial
Geología costera
Geoparques y Geoturismo
Gestión integrada de recursos hídricos
Mecánica de rocas y suelos. Fundaciones
Minería metalífera, no metalífera y rocas de aplicación
Riesgo geológico

Pág. 39 TRABAJOS
Aspectos geológico-ingenieriles
Cartografía temática
Geología ambiental, urbana y ordenamiento territorial
Geología costera
Geoparques y Geoturismo
Gestión integrada de recursos hídricos
Mecánica de rocas y suelos. Fundaciones
Minería metalífera, no metalífera y rocas de aplicación)
Riesgo geológico

CONFERENCIAS

EL DISEÑO DE PRESAS DESDE LA PERSPECTIVA GEOLÓGICA

Mauricio Giambastiani[1,2,3]
[1]Escuela de Geología, Departamento de Geología Aplicada, F.C.E.F y N., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield s/n, Córdoba, Argentina.
[2]Intertechne Consultores S.A, Av. Iguaçu 100, Curitiba, Brasil
[3]Departamento Académico de Ciencias Aplicadas a la Tecnología, el Ambiente y el Urbanismo, Universidad Nacional de La Rioja, Av. De la Fuente s/n, La Rioja, Argentina.
Mail de contacto: mgiambastiani@unc.edu.ar – mgi@inttpartner.com.br

RESUMEN

El diseño y la construcción de presas para almacenamiento de agua y múltiples usos (riego, consumo humano, generación de energía eléctrica, control de inundaciones, etc.) es la tarea que más demanda profesionalmente a los geólogos que intervienen en el proceso. Fundaciones complejas, taludes, obras subterráneas, etc., son algunas de las obras a dimensionar y estabilizar.
El desafío no se circunscribe específicamente al sitio de emplazamiento de la presa, sino que abarca también el área de desarrollo del embalse y las obras aguas abajo para completar el proyecto. El proceso de diseño involucra la conformación de un equipo interdisciplinario integrado por topógrafos/cartógrafos, hidrólogos, geólogos, ingenieros geotécnicos, hidráulicos, de estructuras, mecánicos y eléctricos, con una coordinación general que garantice la integración de todas las disciplinas.
En este contexto, la principal demanda al equipo de geología es desarrollar modelos geológicos evolutivos, desde la fase conceptual hasta la observacional, que reduzcan paulatinamente las incertidumbres geológicas y geotécnicas del proyecto. Este proceso exige del geólogo geotécnico un profundo conocimiento en algunas disciplinas específicas de la geología como petrología, tectónica, geología estructural, geomorfología, hidrogeología, geofísica, etc. y en otras que facilitan el dialogo fecundo con los ingenieros geotécnicos (mecánica de suelos y rocas, resistencia de materiales, hidráulica de medios porosos y fracturados, etc.). Sin embargo, la construcción de un modelo geomecánico que permita evitar grandes cambios entre lo previsto y lo encontrado durante la construcción, no depende únicamente de la experticia del equipo de geólogos e ingenieros geotécnicos, depende también del marco contractual en el que se desarrolla el diseño y que condiciona la cantidad y calidad de la campaña de investigaciones. El desarrollo tecnológico actual ha revolucionado las tradicionales herramientas de investigación incorporando las técnicas de televisionamiento y logueo geofísico de sondeos, sondeos orientados y dirigidos, ensayos de emisión acústica de testigos de perforación para estimar el tensor de esfuerzos, entre otras, que permiten mejorar significativamente la calidad de las investigaciones. Todas estas técnicas, comunes en la industria minera e hidrocarburífera, no están totalmente integradas a las prácticas de las obras de ingeniería civil.
Adicionalmente es necesario profundizar los esfuerzos en mejorar los métodos de prospección geofísica en un esfuerzo compartido entre las áreas de I+D de las universidades y de las empresas privadas.
El horizonte de mejoramiento de los trabajos geológicos y geotécnicos está abierto y es fundamental incidir en los planificadores sobre los beneficios de invertir en campañas de investigación serias y objetivas.

LA INUNDACIÓN EN BAHÍA BLANCA DEL 7 DE MARZO DE 2025. UNA VISIÓN DESDE LA GEOLOGÍA APLICADA

Claudina Di Martino[1,2,3]
[1]Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253 - Cuerpo B´. Piso 2º (8000) Bahía Blanca.
[2]Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires - Universidad Nacional del Sur). San Juan 670 (8000) Bahía Blanca.
[3]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca.
Mail de contacto: claudina.dimartino@uns.edu.ar

RESUMEN

El evento climático extremo del 7 de marzo de 2025 en Bahía Blanca provocó su inundación y graves consecuencias, alcanzando un record histórico de precipitación en menos de 8hs, que superó en un 125% al máximo anterior registrado. Desde su fundación, en 1828, la ciudad estuvo vinculada al arroyo Napostá Grande, que nace en el Sistema de Ventania y desemboca en el estuario de Bahía Blanca. Con núcleo fundacional en el cono aluvial del arroyo, ocupa en su expansión zonas geomorfológicamente diferentes y topográficamente más bajas, impermeabilizando el suelo a su paso, favoreciendo así el escurrimiento y disminuyendo la infiltración. El Napostá fue modificado por obras de ingeniería para mitigar el efecto de las crecidas. En la década del cincuenta se construyó el partidor regulador, se canalizó el Maldonado (260m^3/s) y, entre el 1978 y 1981, se entubó el Napostá (40m^3/s) en aproximadamente 4,5km de su recorrido. Superado el caudal del entubado el agua se conduce al canal Maldonado (Figura 1). Torres Carbonel et al. (2025) estiman para el evento del 7 de marzo, un caudal pico en el partidor de aproximadamente 900m^3/s, y de 3.675m^3/s al oeste de la ciudad, sobre la desembocadura de los arroyos Saladillo de García y Saladillo Chico, impactando en la localidad de General Cerri.

Hoy se proyecta la reconstrucción del canal Maldonado y sus 16 puentes, triplicando su capacidad, y el mejoramiento de sistemas urbanos de evacuación del agua. Sin embargo, para disminuir la vulnerabilidad, se deben modelizar distintos escenarios y dinámicas del escurrimiento, estimar caudales pico y proyectar obras con el objetivo de ralentizar, retener y evacuar el escurrimiento. Resulta indispensable además contar con un plan de actuación, sistemas de alertas tempranas, gestión eficiente de la información y una proyección ordenada del territorio.

Palabras claves: evento extremo-expansión urbana-inundación

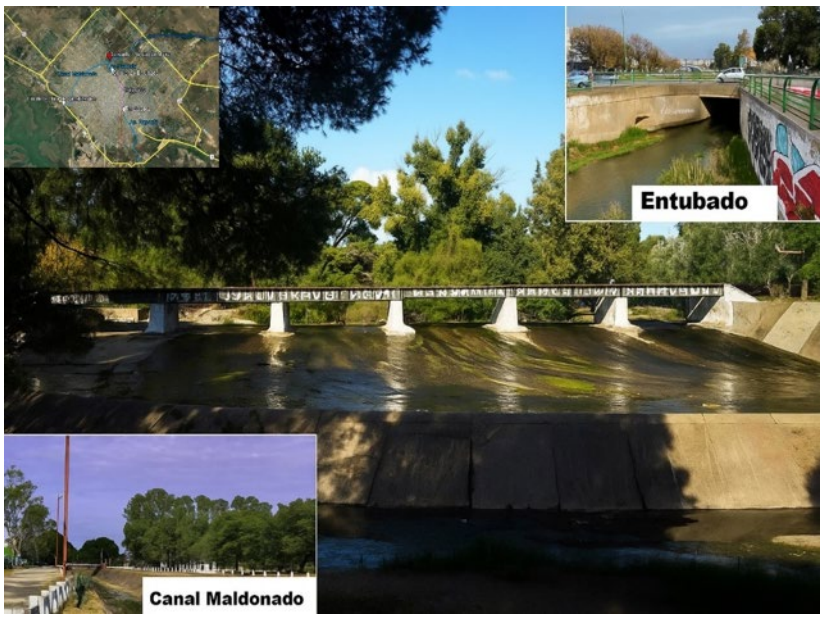


Figura 1. Ubicación: Partidor Regulador, Entubado y Canal Maldonado.

GEOTECNIA APLICADA A MINA A CIELO ABIERTO

Julio M. Bruna Novillo[1,2]
[1]Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires, Argentina
[2]Departamento de Geología Aplicada, Escuela de Geología, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, Ismael Bordabehere S/N, Córdoba X5016GCA, Argentina
Mail de contacto: julio.bruna@unc.edu.ar

RESUMEN

El diseño de una mina en etapas de un proyecto minero se basa en la información disponible al momento de realizar el estudio. Generalmente, se dispone de detalles limitados del macizo rocoso general, por lo que es necesario realizar una serie de suposiciones sobre las condiciones y características geotécnicas del sitio. A medida que la mina se desarrolla, se recopilan nuevos datos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos y se analiza el rendimiento de las excavaciones existentes, siendo necesario reevaluar las suposiciones de diseño y, de ser requerido, modificar el diseño inicial.
La diversidad del medio geológico y la complejidad de sus procesos hacen que en las minas a cielo abierto ("*open pit*") se deban resolver situaciones donde los factores geológicos son condiciones del mismo y causan la mayoría de los problemas geotécnicos. El agua en particular tiene un impacto significativo en el comportamiento de los materiales.
Los criterios para un diseño óptimo de un "*open pit*", son: económicos, geomecánicos, operativos y de seguridad.
La selección de parámetros básicos es fundamental, incluyendo: ancho y pendiente del camino de transporte, plan general del camino de transporte, talud del "open pit", ancho e intervalo de las bermas (plataformas de seguridad), ángulo global e interrampa (ángulos de las paredes y rampas) y ubicación de la infraestructura principal.
El diseño de las pendientes de una mina a cielo abierto es un proceso complejo y crítico, que requiere equilibrar la viabilidad económica con la seguridad y el cumplimiento normativo. Aumentar el ángulo de las paredes puede mejorar la rentabilidad al permitir una mayor recuperación de mineral y reducir la cantidad de estéril a remover. Sin embargo, esto también incrementa el riesgo de inestabilidad, por lo que se requiere un profundo conocimiento del proceso geológico-geotécnico local y el cumplimiento de las normativas.
La geotecnia de diseño y la geotecnia operativa son dos enfoques complementarios dentro de una mina a cielo abierto. La geotecnia de diseño establece los parámetros iniciales, mientras que la geotecnia operativa monitorea el rendimiento de las excavaciones y permite realizar ajustes a medida que se obtiene más información y se evalúa el comportamiento real del macizo rocoso.

Palabras claves: criterios, diseño, procesos, open pit.

INDUSTRIA MINERA SOSTENIBLE: ETAPAS, ASPECTOS AMBIENTALES

María N. Ahumada[1,2]
[1]Instituto Superior Tecnológico IES 9-019, Dirección de Educación Superior, San Juan 467 Mendoza, Argentina.
[2]International Association for Promoting Geoethics, Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma, Italia.
Mail de contacto: coordinacion-mineria@insutec.edu.ar

RESUMEN

Esta conferencia tiene como objetivo brindar información básica sobre la industria minera a personas que no están relacionadas con la actividad y entre los temas a desarrollar se encuentran: el ciclo minero, controles y beneficios asociados.
La minería responsable es respetuosa de los pilares fundamentales del desarrollo sostenible en cada una de sus etapas. El ciclo de la industria minera se basa en la búsqueda del recurso mineral en superficie y en subsuelo, modelamiento y análisis de factibilidad técnico-económica, la extracción del mineral y su procesamiento, la comercialización del producto, y el cierre y post cierre de minas (Figura 1: Dirección Nacional de Promoción Minera. Secretaría de Política Minera 2019).



Figura 1. Etapas del ciclo minero

En el país existen leyes de protección ambiental específicas para la industria minera y guías para el cierre de minas. Asimismo, los proyectos mineros adoptan principios y protocolos de minería sostenible a nivel internacional, lo que asegura que su desarrollo se lleve a cabo con buenas prácticas, con el aumento de valor desde la extracción del mineral y procesamiento hasta su venta; lo que además favorece la generación de una cadena de valor a través de servicios, capacidades humanas y recursos que se requiere a lo largo de toda la vida útil de la mina.
Tanto el factor ambiental como el económico y el social se ven impactados de manera positiva y negativa debido a la instalación de un proyecto minero, como de cualquier otra actividad humana. La minería responsable trabaja de manera que los impactos positivos sean maximizados, y que los negativos sean minimizados a través del trabajo preventivo con planes de mitigación y remediación para que, tras la finalización de la vida útil del proyecto, se produzca una estabilización fisicoquímica del terreno y del entorno social.

Palabras claves: ambiente, minería, responsable

INDUSTRIA MINERA. VALOR AGREGADO Y DISTRIBUCIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS

Daniel G. Jerez[1,2]; Tay A. Such[3]
[1]Universidad Nacional de La Rioja. Departamento de Ciencias y Tecnologías Aplicadas a la Producción, al Ambiente y al Urbanismo. Carrera de Geología.
[2]Universidad de Buenos Aires. Carrera de Especialización en Geología Minera.
[3]Universidad Nacional de Río Negro. Sede Alto Valle - Valle Medio. Escuela de Geología, Paleontología y Enseñanza de las Ciencias
Mail de contacto: danielgonzalojerez@gmail.com, djerez@unlar.edu.ar; tsuchpas@gmail.com

RESUMEN

La relevancia del aporte de la industria minera a la economía nacional puede quedar oculta en términos de PIB/ Valor Agregado Bruto (donde ronda el 0,8%), pero su importancia se visibiliza a nivel de PGB (en San Juan el aporte al PGB alcanzaba el 18% en 2016). Este impacto se visualiza comparando, en el período 2004–2015, el crecimiento del PGB de una provincia que desarrolló la minería metalífera (San Juan, +110%), con una que no lo hizo (Mendoza, +30%) y el PIB del país (+49%). La minería se ubica entre el 4to y 5to lugar en exportaciones por complejos y, además, forma parte del grupo de las únicas 4 actividades de la economía que en los últimos 20 años han sido siempre superavitarias en términos de balance cambiario, aportando 64.000 millones netos. Del total de las divisas generadas por exportaciones mineras, el 80% queda en el país para pago de salarios, compras a proveedores nacionales e impuestos, regalías y utilidades retenidas para reinversiones. Aguas arriba de la minería se desarrolla una importante cadena de valor nacional, cuyos principales proveedores son la industria, construcción, comercio, servicios profesionales y empresariales, petróleo y gas y transporte y logística, generando centenares de PyMEs y miles de puestos de trabajo. En términos de empleo se destaca que mientras el total del empleo asalariado privado registrado creció del 10% entre 2009 y 2025, el empleo minero lo hizo 60%, con fuerte impacto en las provincias y comunidades locales. La minería metalífera paga los salarios más altos, junto a la actividad de petróleo y gas y tiene el más alto índice de formalización y el más bajo de extranjerización. El empleo minero se reparte en todas las provincias y es muy relevante en algunas, pudiendo generar casi el 20% del empleo privado registrado (San Juan).

Palabras claves: PGB minero, impacto económico, empleo.

RESÚMENES

EROSIÓN DE MACIZOS ROCOSOS EN VERTEDEROS DE PRESAS: ESTUDIOS EN EL VERTEDERO DE LA PRESA PIEDRAS MORAS (CÓRDOBA, ARGENTINA)

Mauricio Giambastiani[1], Julieta Bruera[1], Augusto Mierez[1]
[1]Cátedra de Mecánica y Tratamiento de Rocas – FCEFyN – Universidad Nacional de Córdoba, Sede Ciudad Universitaria Calle Ismael Bordabehere s/n, CP 5016, Córdoba.
Mail de contacto: mgiambastiani@unc.edu.ar

RESUMEN

La evacuación de los excedentes hídricos de las presas de embalse es siempre un desafío para el equipo de diseño de las presas. El propósito de un buen diseño es restituir el agua al cauce fluvial de manera controlada y que los procesos erosivos que se concentran al pie de los aliviaderos no desarrollen un fenómeno descontrolado aguas abajo de las estructuras.
El desarrollo de la erosión de un macizo rocoso por la acción de chorros de agua concentrados es muy complejo pues depende principalmente de la interacción de factores hidráulicos, hidrológicos, morfológicos y geológicos. Normalmente los macizos rocosos en los lechos de restitución están fracturados y la presión dinámica oscilatoria del chorro de agua que impacta en caída libre desde los vertederos pueden generar enormes esfuerzos dentro de las fracturas, rompiendo, desestructurando y erosionando el macizo rocoso (Figura 1).
Desde mediados de la década del 70 se comenzaron a aplicar diversas clasificaciones geomecánicas para evaluar la susceptibilidad del macizo rocoso a la erosión por los flujos de los vertederos y suministrar parámetros geomecánicos para los cálculos hidráulicos. Sin embargo, raramente son verificadas las previsiones de erosión en términos de profundidad del foso y no se cuenta con información objetiva que permita evaluar la eficacia de estas clasificaciones geomecánicas.
Con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva de las diferentes clasificaciones geomecánicas disponibles en la literatura, se inició un proyecto de investigación que cotejara cada una de estas clasificaciones con los procesos erosivos desarrollados en los vertederos de las presas localizadas en la cuenca del Rio III: Cerro Pelado, Arroyo Corto, Usina Fitz Simón, Segunda Usina, Tercera Usina y Piedras Moras.
En esta oportunidad se presentarán los resultados preliminares de los estudios en el vertedero de la Presa Piedras Moras excavado en macizos basálticos.

Palabras clave: erosión, macizos rocosos, aliviaderos.

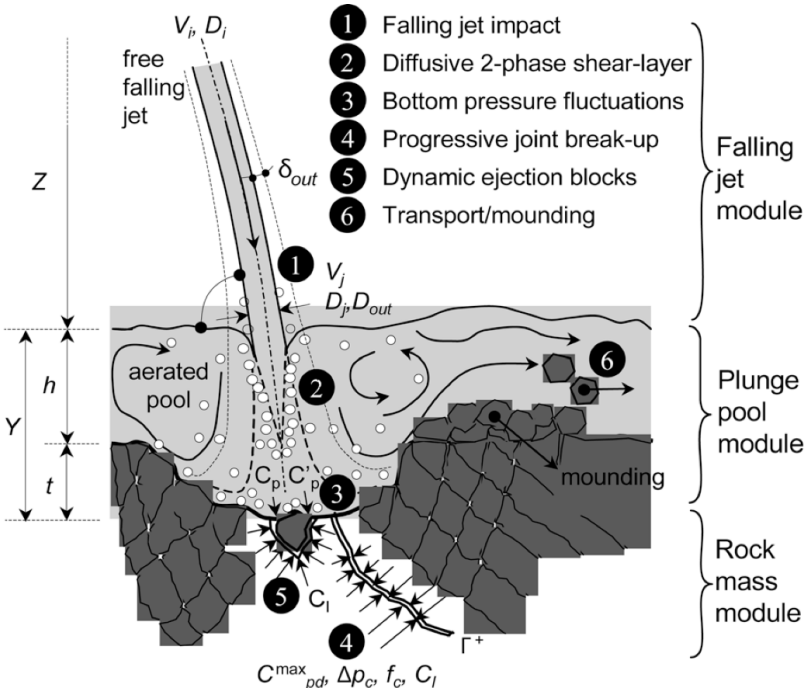


Figura 1. Esquema conceptual de los principales procesos geo-hidráulicos que genera el impacto de un chorro en caída libre sobre el macizo rocoso (tomado de Bollaert 2004).

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES GEOMECÁNICAS DE LA R.P. N° 9, TRAMO LOS CARACOLES, SAN FRANCISCO DEL MONTE DE ORO, SAN LUIS, ARGENTINA

Daniel A. Sales[1]
[1]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: sales@unsl.edu.ar

RESUMEN

Se analiza en esta contribución, las condiciones geomecánicas generales en un tramo de 6 km de longitud de la ruta provincial N°9, que une atravesando la sierra de San Luis, las localidades de San Francisco del Monte de Oro (ladera occidental) y La Carolina (ladera Oriental) en la provincia de San Luis. El sector coincide con el ascenso del camino sinuoso en caracoles de la traza vial en el frente de levantamiento occidental de la sierra de San Luis con dirección NE - SO (32°41'54"Lat S. - 66° 9'5.32" Long. O), desde la cota 1230 m s.n.m. y finaliza en la cota 1655 m s.n.m., de elevada pendiente.
En el reconocimiento de campo se observó un macizo migmatítico afectado por diferentes sistemas de fallas, donde desarrolló producto de la tectónica regional un intenso proceso de cataclasis en los afloramientos en aquellos sitios afectados por zonas de cizallas frágiles, provocando la inestabilidad en sus márgenes (Figura 1). A medida que la traza vial asciende por la ladera a su sector cumbral, y se aleja del trazo del Sistema de Falla de San Luis, aumenta el espaciamiento de las discontinuidades, disminuyendo el grado de disgregación mecánica por su alejamiento del frente de levantamiento

Palabras clave: Sierra de San Luis, falla inversa, geomecánica.



Figura 1: Afloramientos metamórficos con elevado grado de cataclasis sobre el trazo NE-SO del Sistema de Falla de San Luis.

LINEAMIENTOS BÁSICOS PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA REGIÓN METROPOLITANA BONAERENSE (RMBA)

Fernando X. Pereyra[1]
[1]Servicio Geológico Minero Argentino (IGRM-SEGEMAR). Buenos Aires, Argentina y Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de Avellaneda
Mail de contacto: fpereyra@undav.edu.ar

RESUMEN

El Cambio Climático (CC) es uno de los principales problemas del Siglo XXI ya que modifica todas las dimensiones de las actividades humanas (ambiental, social, económica e institucional). Los efectos del CC son múltiples, complejos y en muchos casos sinérgicos, sus impactos tienen lugar en todos los ambientes y regiones y esferas de actividad humana. Las ciudades son especialmente vulnerables al CC dada la concentración poblacional, de bienes y de actividades y su fuerte dependencia de la infraestructura, particularmente frente a eventos climáticos extremos. En Argentina más del 90% vive en zonas urbanas. Actualmente, en la Región Metropolitana Bonaerense (RMBA) se encuentran casi un tercio de la población del país (16 millones de habitantes). En la presente contribución se analizan, en función de los potenciales escenarios climáticos para la región y las propias características de la misma (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, poblacionales, etc.), cuales serían los principales efectos/impactos, y, en relación a los mismos, las posibles acciones de adaptación para aumentar la resiliencia frente a los efectos del CC. En particular se consideran los impactos geomorfológicos del CC (cambios en la intensidad y distribución de los procesos geomórficos). En función de lo analizado, inundaciones, ascensos freáticos y tormentas litorales aparecen como principales riesgos en la RMBA, los que se incrementarían posiblemente en relación al CC. Dentro de las posibles acciones para reducir los riesgos, el ordenamiento territorial destaca como principal aspecto para adaptarse a los diferentes impactos derivados potenciales; si bien acciones estructurales serían también necesarias. Frente a cambio climático previsto, resulta importante analizar el nivel de exposición y sensibilidad de la región para emprender medidas eficientes a corto y largo plazo que tiendan a reducir la vulnerabilidad del área urbana y su entorno. Actualmente, la RMBA se caracteriza por una nula planificación territorial, fuerte desarrollo inmobiliario privado, perdida de espacios verdes y una importante segregación social y fragmentación.

Palabras clave: Cambio Climático-Región Metropolitana Bonaerense- Adaptación

ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE LA PÉRDIDA DE HUMEDALES EN LA REGIÓN METROPOLITANA BONAERENSE (RMBA)

Fernando X. Pereyra[1,2], Cecilia Casanova[1] y Deborah Ragas[2]
[1]Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM). Buenos Aires, Argentina.
[2]Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de Avellaneda.
Mail de contacto: fpereyra@undav.edu.ar

RESUMEN

En la Argentina los humedales ocupan más del 10% del total de la superficie, mientras que en la zona de la Región Metropolitana Bonaerense (RMBA, que incluye el AMBA y el Gran La Plata) ocupaban una proporción aún mayor. Los humedales cumplen diferentes servicios ecosistémicos y roles, incluyendo su participación en el ciclo hidrológico y de nutrientes, ser habitat y sosten de la biodiversidad, entre otros aspectos. Según sus características geológicas y geomorfológicas pueden diferenciarse en la región estudiada diferentes tipos de humedales: 1) fluviales; 2) litorales marinos-estuaricos; 3) eólicos-lacustres y 4) antrópicos. En la presente contribución se evalúa, en primer lugar, los humedales que han ido desapareciendo o modificándose significativamente en las últimas décadas. Mediante la comparación de fotos aéreas e imágenes satelitales de diferentes años (desde la década de 1930 hasta el presente) se ha podido estimar el porcentaje de disminución de los humedales en ese lapso, identificando cuatro categorías: humedales desaparecidos, humedales fuertemente modificados, humedales ligeramente modificados y humedales no modificados. En las geoformas fluviales y marinas es donde han desaparecidos en mayor proporción y, donde más se preservan es en Delta del Paraná. En función del análisis realizado puede señalarse que el uso de la tierra ha sido el principal factor de destrucción de los humedales, incluyendo el relleno y levantamiento del terreno para urbanizar, la ocupación y modificación de las geoformas fluviales y la modificación de toda la zona costera. En algunos sectores se produjo el reemplazo de humedales costeros naturales por humedales antrópicos, como en la Costanera Sur. De mantenerse la actual tasa podría producirse la desaparición total de los humedales de la región con los consiguientes impactos que podrían traer aparejados (impacto en las inundaciones o pérdida de espacios verdes). Surge como una necesidad evidente detener este proceso, tomando medidas de protección, incluyendo normativas y legislación.

Palabras clave: humedales, RMBA, disminución

IMPACTO DE LOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA VIAL

Maria Fernanda Soria[1], Ana Laura Fernández[2]
[1]Instituto Geológico del Sur, Universidad Nacional del Sur, Alem 1253 Cuerpo B' 1°Piso, Bahía Blanca, Argentina
[2]Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Alem 1253 Cuerpo B´2° piso, Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: mfsoria@ingeosur-conicet.gob.ar

RESUMEN

Los eventos meteorológicos extremos generan importantes pérdidas socioeconómicas y alteran la morfodinámica del paisaje. El 7 de marzo de 2025, una tormenta en el sudoeste bonaerense y sudeste pampeano acumuló hasta 395 mm en pocas horas (INTA, 2025), provocando el desborde de escurrimientos efímeros y estacionales, y desencadenando una inundación generalizada en la región. El objetivo de esta contribución es documentar los daños en la RN N° 35 y demostrar cómo el análisis geomorfológico puede contribuir a una planificación más resiliente de las obras ingenieriles. El área de estudio se ubica entre Bahía Blanca (Buenos Aires) y Santa Rosa (La Pampa), entre los km 25 y 50, e incluye los puentes de los Arroyos Saladillo de García, Saladillo y Sauce Chico, y el acceso a Nueva Roma. El área afectada forma parte de la Planicie Poligenética Sur (Pereyra, 2018), formada por limos fluviales, loess y calcretas. El relieve es una planicie de inundación con pendientes menores al 2%, dominada por depósitos eólicos y suelos franco-limosos con cementaciones calcáreas. La cobertura vegetal es moderada, con estepa graminosa y bosque xerófilo. El evento provocó procesos de erosión hídrica (laminar, en surco, en cárcava y de cauces) y sedimentación (Toy et al. 2002) (Fig. 1).
Se identificaron cinco infraestructuras viales afectadas: un camino de acceso, dos alcantarillas y dos puentes. El acceso a Nueva Roma sufrió remoción del material y carcavamiento. Las alcantarillas mostraron obstrucción y pérdida parcial de calzada. Los puentes sobre Saladillo de García y Saladillo, presentaron desmoronamiento de estribos, superestructura y calzadas laterales (Tabla 1). Los daños registrados evidencian la vulnerabilidad de las infraestructuras viales frente a eventos meteorológicos extremos, especialmente en contextos geomorfológicos susceptibles. Afrontar eficazmente estos eventos requiere intervenir sobre sus causas, considerando las llanuras de inundación y la dinámica natural de los sistemas fluviales.

Palabras clave: Geomorfología Aplicada, Infraestructura vial, eventos meteorológicos extremos

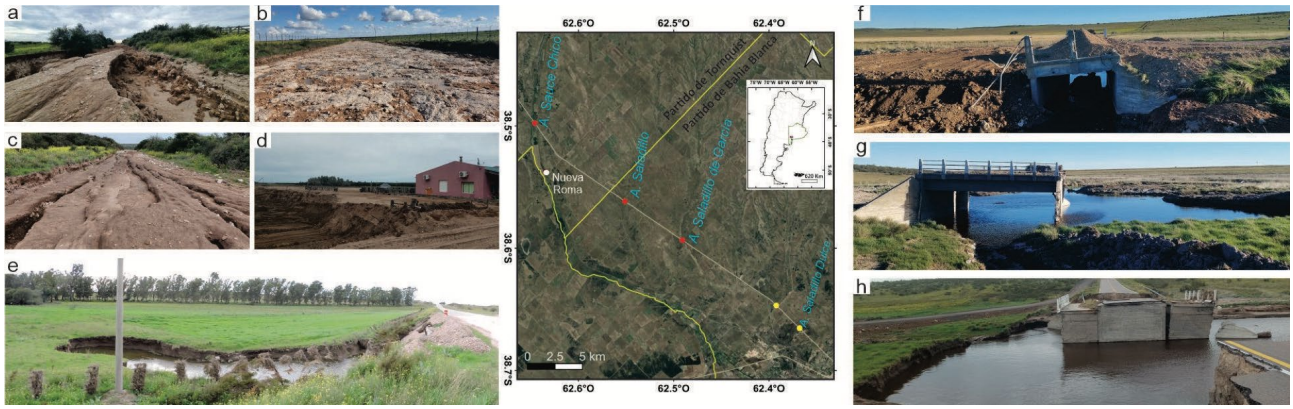


Figura 1. Localización de las infraestructuras viales afectadas sobre la RN N.° 35 (Bahía Blanca–Santa Rosa) tras la tormenta de 7 de marzo de 2025. Se indican los puentes con círculos rojos y las alcantarillas con círculos amarillos. a-d) Nueva Roma (a-c: estructuras de erosión, d: sedimentación). e) alcantarilla obstruida y colapsada. f) Puente sobre Aº Saladillo de García. g-h) Puente sobre Aº Saladillo (g: colapso de la superestructura, h: Erosión y pérdida de calzada).

INFRAESTRUCTURA	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO	DIMENSIONES AFECTADAS	PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS
Camino a Nueva Roma	Remoción de material del camino; exposición de tosca subyacente; Carcavamiento	Longitud: 1800. Ancho: 9 m	Erosión laminar, carcavamiento, erosión en surco y regueros. Sedimentación obstructiva en la entrada a Nueva Roma
Alcantarillas	Obstrucción parcial y pérdida de calzada.	Pérdida de calzada: Aº. Saladillo Dulce y Aº. sin nombre (hasta 4.5 m de ancho)	Erosión fluvial, pérdida de cohesión del suelo, sedimentación obstructiva
Puentes	Destrucción de superestructuras, pérdidas de calzadas laterales.	Aº. Saladillo de García: 176 m^2. Aº. Saladillo: 1600 m^2.	Erosión fluvial, carcavamiento, pérdida de cohesión del suelo, erosión en surco.

Tabla 1. Daños registrados en infraestructuras viales de la RN N° 35 (entre km 25 y 50) tras el evento del 7 de marzo de 2025.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTA, 2025. Diagnóstico preliminar de daños de escorrentía sobre zona rural Ruta Nacional 35 y Gral. D. Cerri (Tormenta 7-3-2025)

Pereyra, F. X. 2018. Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Ordenamiento territorial N°10: 85p., Buenos Aires.

Toy, T.J, Foster, G.R, Renard, K.G. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control.

GEOTURISMO MINERO Y PROTECCIÓN DE ARTE RUPESTRE EN LA LOCALIDAD ARQUEOLÓGICA DE "LA PLAYA"

Roberto Ormeño[1], Matías Merlo[1], Carlos Fessia[1], Lautaro Ledezma[1], Eberth Cufré[1]
[1]I.P.E.T. Nº 232 Instituto Provincial de Educación Técnica N.º 232 "Prof. Enrique A. Flores", Tecnicatura en Minería
Mail de contacto: radrianorm@gmail.com

RESUMEN

La zona de estudio se encuentra en las Sierras de Guasapampa, departamento Minas, provincia de Córdoba, a una distancia de 230 kilómetros al oeste desde la capital de la provincia, definida como sitio arqueológico de La Playa, subárea Cerro de la Cueva que contiene arte rupestre (terrenos de la familia Díaz). El presente trabajo tiene como objetivo la promoción y preservación de las representaciones rupestres involucrando a docentes y estudiantes del Instituto Provincial de Educación Técnica N.º 232 ubicado en Ciénaga del Coro, Minas, que egresan con título Técnico Minero.

Mediante Geoturismo Minero se pretende la valoración del patrimonio arqueológico, geológico y minero de esta zona enmarcado en las leyes de protección ambiental que genere una nueva perspectiva profesional para los alumnos, ampliando sus capacidades técnicas. El geoturismo de arte rupestre es una modalidad turística centrada en la visita y el estudio de sitios con grabados rupestres, buscando comprender su profundo valor cultural, histórico y geológico. En el sitio arqueológico se observan pinturas rupestres, imágenes o símbolos pintados directamente sobre las superficies rocosas, como paredes de cuevas, abrigos rocosos o incluso rocas al aire libre. A diferencia de los petroglifos (grabados), el arte rupestre añade material a la roca, constituyen un valioso registro de la historia y cosmovisión de civilizaciones ancestrales.

Esta actividad trasciende la mera contemplación estética, permitiendo una inmersión en el contexto histórico y cultural de las sociedades que los crearon. Estos sitios actúan como testimonios cruciales de la evolución humana y la interacción entre las comunidades y su entorno natural, ofreciendo una ventana única al pasado. Hoy, poder involucrar la nueva generación de estudiantes en el arte del cuidado ambiental y de zonas protegidas da a los futuros Técnicos Mineros una nueva herramienta a través de actividades educativas y recreativas que les permitirán desarrollarse como investigadores permanentes de la zona de influencia.

Palabras clave: Arte rupestre, Geoturismo Minero, Patrimonio

INFLUENCIA DEL MÉLANGE EN EL COMPORTAMIENTO DEL FRENTE DEL GLACIAR CRANE, NE DE LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Liliana Margonari[1,2], Naomi Ochwat[3,4], Sebastián Marinsek[1], Ted Scambos[3,4]
[1]Departamento de Geología, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
[2]Instituto Antártico Argentino, Buenos Aires, Argentina.
[3]Department of Geology, University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA.
[4]Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), University of Colorado Boulder, Boulder, CO USA.
Mail de contacto: liliana.margonari@hotmail.com

RESUMEN

En el 2002, tras la desintegración de la plataforma de hielo Larsen B, noreste de la Península Antártica (PA), el glaciar Crane (GC), afluente de dicha plataforma, entró en una fase de rápido desprendimiento de témpanos (*calving*) y retroceso. Desde ese año, y hasta el año el 2012, el comportamiento del GC fue variable y relacionado a la formación o desintegración de hielo marino en su fiordo. A partir del 2012, y hasta el 2021, se formó hielo marino estable en la bahía de Larsen B, periodo en el que el GC avanzó y se engrosó constantemente (Figura 1). Sin embargo, en enero de 2022, el hielo marino fijo a la costa (*fast-ice*) se rompió, provocando una nueva etapa de retroceso y pérdida de hielo (Figura 2). De esta forma, se puede afirmar que la formación de *mélange* (mezcla de hielo marino y témpanos) en el fiordo del Crane impacta en la estabilidad de su frente, pero, dado que recientemente se han registrado períodos con presencia de *mélange* en los cuales el glaciar se mantuvo en retroceso (Figura 3), se instalaron in-situ, en febrero del 2024, equipos de monitoreo meteorológico y GPS de transmisión remota y aún se siguen estudiando los detalles del mismo. Por otro lado, se ha observado a partir de imágenes satelitales Landsat y sus productos derivados, una relación entre la presencia de abundantes fracturas frontales y el retroceso del frente. Esta podría estar relacionada a la presencia de lagos subglaciares (Scambos et al., 2011), los cuales en etapas de ablación glaciar, durante períodos de temperaturas positivas, se lubrican y ayudan al patinaje basal del hielo glaciar, potenciados así mismo por la presencia de fuertes vientos del oeste y generación de eventos foehn, los cuales, a su vez, favorecen al aumento de las temperaturas en el sector oriental de la PA.

Palabras clave: Glaciar, Mélange, Eventos Foehn.

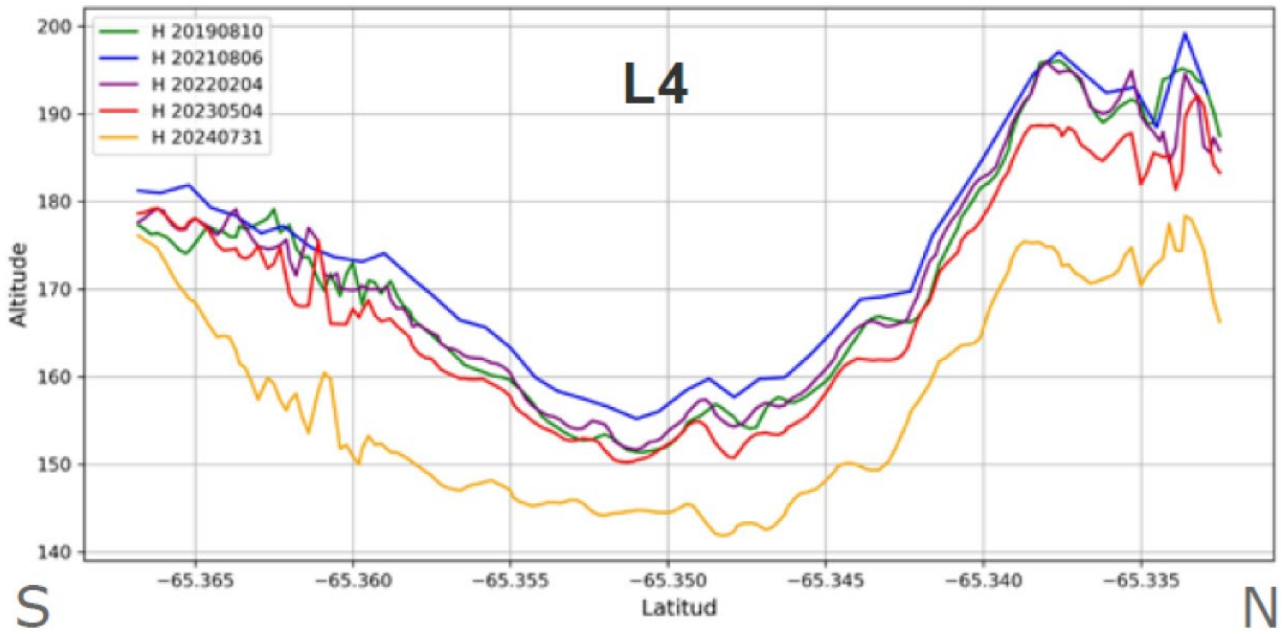


Figura 1. Evolución de la altura de la superficie tomada en el frente del glaciar Crane, posterior a la desintegración del fast-ice en diciembre de 2021, tomada de datos ICESat-2 (Smith et al, 2021).

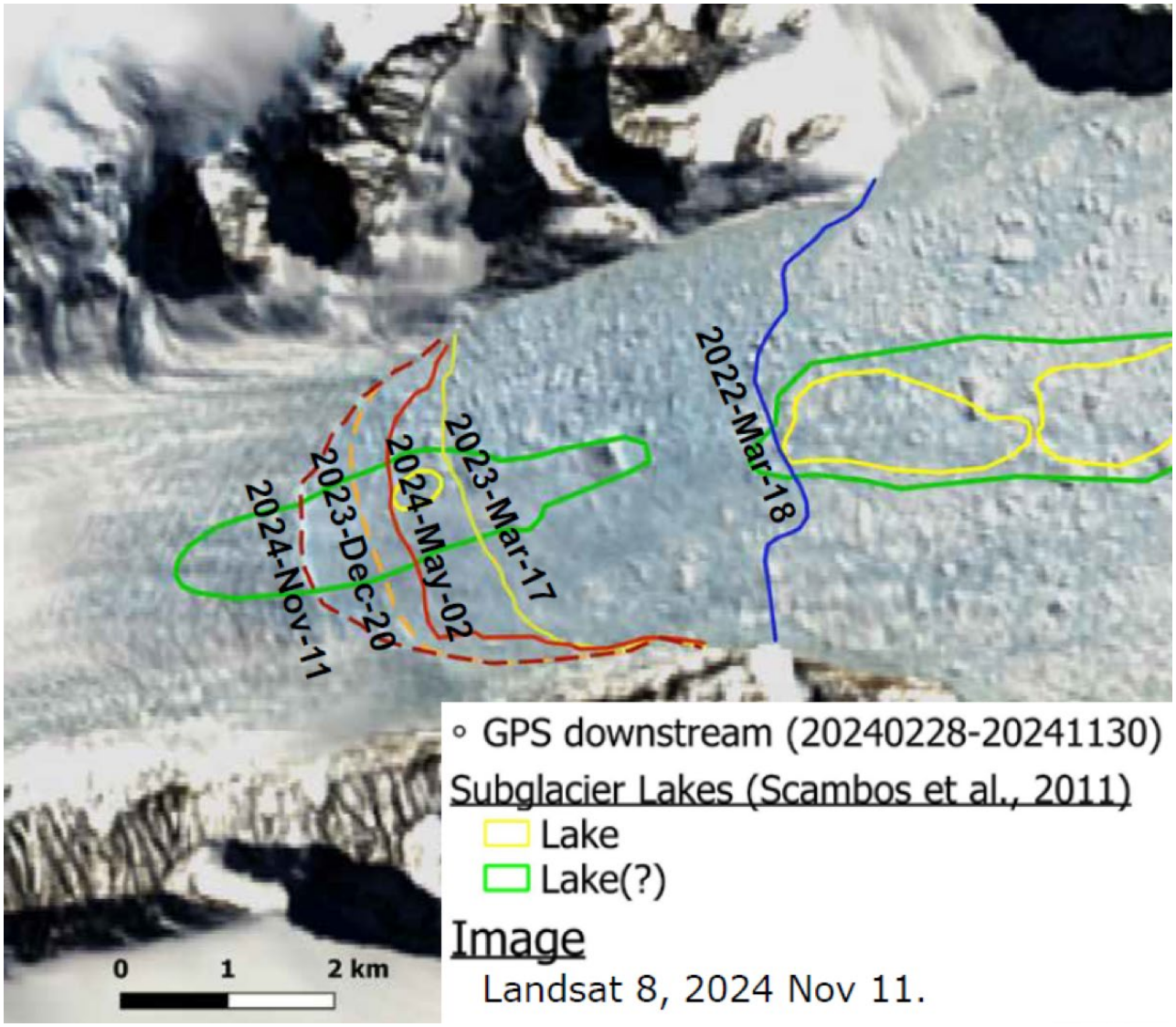


Figura 2. Evolución del frente del glaciar Crane posterior a la desintegración del *fast-ice* en diciembre de 2021.

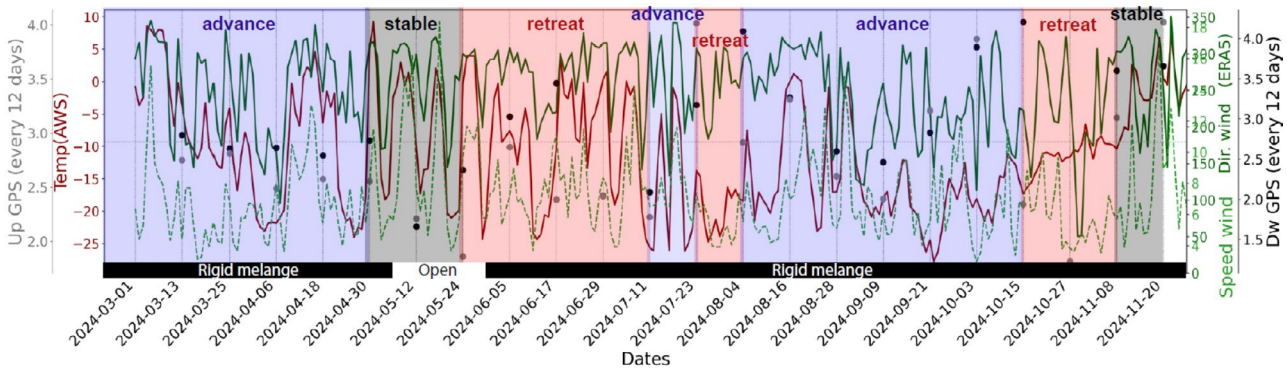


Figura 3. Curva de temperatura media diaria (rojo), tomada de la estación meteorológica automática instalada en la ladera norte del frente de glaciar Crante. Curva del promedio diario de las condiciones de viento (verde), tomado del modelo meteorológico ERA-5 (Hersbach et al., 2020). Velocidad del frente (puntos negros y grises), determinadas cada 12 días a partir de datos GPS.

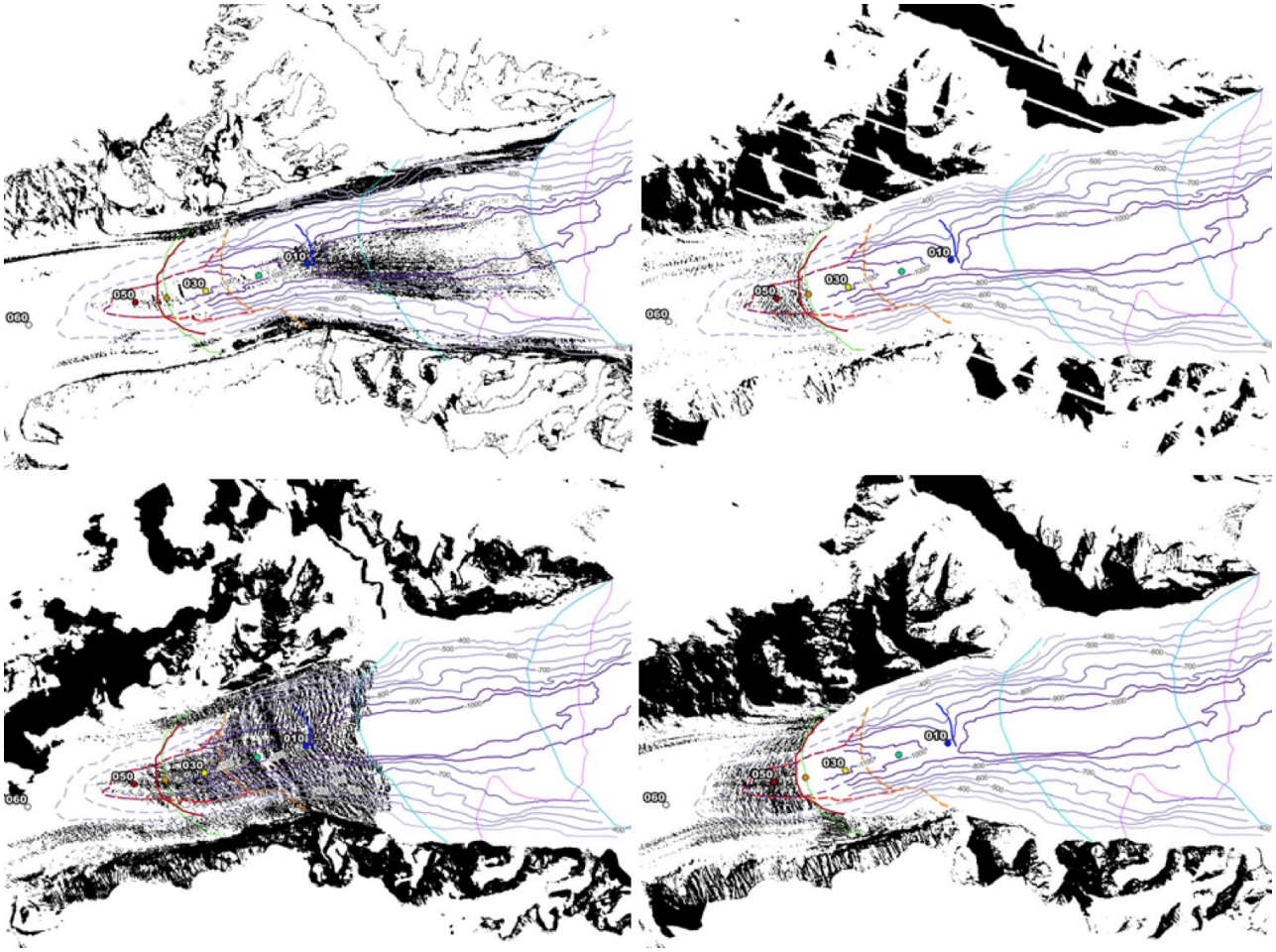


Figura 4. Presencia de fracturas en el frente del glaciar Crane y su relación con el retroceso del frente. A) Fracturas en 2002. B) Fracturas en 2007. C) Fracturas en 2017. D) Fracturas en 2024. La línea celeste oscuro es la posición del frente en diciembre del 2002; la línea celeste clara es la posición del frente glaciar en marzo del 2004, la línea verde clara corresponde a la posición del frente glaciar en febrero del 2007, la línea gruesa bordo es la posición del frente glaciar en noviembre del 2024. La línea punteada naranja corresponde al límite por delante del cual el porcentaje de fracturas supera el 50% en noviembre de 2024 y la línea punteada roja corresponde al límite por detrás del cual el porcentaje de fracturas no supera el 10% en noviembre de 2024. La línea azul corresponde a la grounding line determinada por Rack y Rott, 2004. Las líneas violetas corresponden a la batimetría del fondo (Lavoie et l., 2015).

REFERENCIAS

Lavoie, C., Domack, E. W., Pettit, E. C., Scambos, T. A., Larter, R. D., Schenke, H.-W., Yoo, K. C., Gutt, J., Wellner, J., Canals, M., Anderson, J. B., & Amblas, D. (2015). Configuration of the Northern Antarctic Peninsula Ice Sheet at LGM based on a new synthesis of seabed imagery. *The Cryosphere, 9*(2), 613–629. https://doi.org/10.5194/tc-9-613-2015.

Rack, W., & Rott, H. (2004). Pattern of retreat and disintegration of the Larsen B ice shelf, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 39, 505–510. https://doi.org/10.3189/172756404781814005.

Scambos, T. A., Berthier, E., & Shuman, C. A. (2011). The triggering of subglacial lake drainage during rapid glacier drawdown: Crane Glacier, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 52(59), 74–82. https://doi.org/10.3189/172756411799096204.

Smith, B. E., Fricker, H. A., Gardner, A. S., Siegfried, M. R., Adusumilli, S., Brunt, K. M., Csatho, B. M., Harbeck, K. E., Markus, T., Neumann, T. A., & Zwally, H. J. (2021). *ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height, Version 5* [Data set]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL06.005.

MUSEO GEOLÓGICO HORACIO HARRINGTON: UNA PROPUESTA DE GEOTURISMO Y CIENCIA EN LAS SIERRAS AUSTRALES

Santiago Jara[1], Ana Laura Fernández[2]
[1]Museo Horacio Harrington, Las Acacias 642, Villa Arcadia, Argentina.
[2]Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Alem 1253 Cuerpo B ´2° piso, Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: ana.fernandez@uns.edu.ar

RESUMEN

El Museo Geológico “Horacio Harrington”, recientemente fundado en Villa Arcadia (Sierras Australes, Buenos Aires), surge como una propuesta innovadora de gestión privada y colaboración académica para la puesta en valor del patrimonio geológico, paleontológico y arqueológico del sistema serrano de Ventania. La iniciativa responde a una deuda histórica con la comunidad local y el entorno natural, donde durante décadas se desarrollaron investigaciones científicas sin un espacio institucional para su comunicación, resguardo y proyección social.
El proyecto se originó en 2021 a partir del vínculo entre investigadores de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), profesionales independientes y actores locales. En 2023 obtuvo aval institucional del Concejo Deliberante de Coronel Suárez, y en enero de 2025 se formalizó la creación de la Fundación Habitar Bien, consolidando un modelo de gestión sustentado en la investigación, la divulgación y el respeto ambiental. La donación de tierras por un actor privado —en un sitio estratégico del paisaje serrano— y la colocación de la piedra fundacional el 27 de abril de 2025 (Figura 1), constituyen hitos decisivos en el proceso de consolidación institucional. El museo proyecta funcionar como un nodo regional de geoturismo científico, con actividades educativas, talleres, muestras y espacios para la investigación, en articulación con la Universidad Nacional del Sur (UNS), la UNLP, el Museo Paleontológico Egidio Feruglio (MEF) y otros repositorios. Esta experiencia local, de fuerte anclaje territorial y enfoque colaborativo, resulta pertinente para los debates actuales sobre gestión de geositios, protección del patrimonio natural y turismo sostenible.

Palabras clave: geoturismo, patrimonio geológico, museo.



Figura 1. Ubicación del Museo Geológico “Horacio Harrington” en Villa Arcadia, Sierras Australes, Buenos Aires, y registro fotográfico del acto de colocación de la piedra fundacional realizado el 27 de abril de 2025. El sitio fue elegido por su valor paisajístico, simbólico y geocientífico, y marcó el inicio formal del proyecto museístico.

TELEDETECCIÓN APLICADA AL ESTUDIO DE CLOROFILA-A EN UN EMBALSE SUBTROPICAL

Antonella Palazzo[1], Fernanda Maciel Yo[2], Lacunza Esteban[1,3]
[1]UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 47 N°247, La Plata, Argentina
[2]Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay
Mail de contacto: antonella.palazzo@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN

La aplicación de técnicas de teledetección en el monitoreo de la calidad del agua permite obtener información en escalas temporales y espaciales que no son alcanzables mediante el muestreo convencional in situ. Numerosos estudios han implementado esta herramienta utilizando algoritmos para estimar la concentración de clorofila-a con el fin de comprender su dinámica estacional e interanual, optimizando el monitoreo y la detección temprana de eventos de floraciones algales, los cuales representan un riesgo para la salud humana y el ecosistema acuático. Yacyretá es un embalse binacional emplazado en el tramo medio del rio Paraná en la región fronteriza entre Argentina y Paraguay. Con una superficie de 1.300 km², un volumen de 17.500 millones de m³ y una profundidad media de 14 metros, es un sistema multipropósito que incluye la generación de energía, el suministro de agua, el riego y la mitigación de inundaciones. Se han registrado floraciones de cianobacterias en el embalse durante los períodos 1996-1998, 2005-2006 y 2020. Esta investigación emplea una serie temporal de imágenes satelitales del sensor MSI de Sentinel-2 para caracterizar la distribución espaciotemporal de las concentraciones de clorofila-a en el embalse. Se realiza la corrección atmosférica de las imágenes y se desarrollan mapas de concentración estimada de clorofila-a utilizando algoritmos. El objetivo consiste en identificar patrones espaciales y temporales en la distribución de clorofila-a a partir de los mapas generados, conceptualizar el sistema físico del embalse y analizar la relación entre las concentraciones de clorofila-a y otras variables fisicoquímicas. Asimismo, se busca estudiar la ocurrencia de concentraciones elevadas que podrían estar asociadas a floraciones algales superficiales. El enfoque propuesto ofrece una herramienta para el monitoreo ambiental de embalses y la prevención de riesgos relacionados con la calidad del agua.

Palabras clave: Teledetección, embalse, clorofila-a

DISEÑO DE TALUDES: ESTABILIDAD E INGENIERÍA DE ESTABILIZACIÓN

Gonzalo M. Aiassa[1], Pedro A. Arrúa[1], Marcelo G. Eberhardt[1]
[1]Departamento de Ingeniería Civil, CIGEF (Centro de Investigación en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: gaiassa@frc.utn.edu.ar

RESUMEN

Este artículo aborda el análisis de estabilidad de taludes desde una perspectiva integral, considerando los conceptos de riesgo, peligro y vulnerabilidad asociados a su falla. Se presenta una revisión de los principales mecanismos de falla (circular, planar y compuesta) y los métodos de Equilibrio Límite (MEL) aplicados en la práctica geotécnica. Como contribución central, se desarrolla una herramienta numérica en hoja de cálculo que calcula el factor de seguridad (FS) mediante MEL, incorporando superficies de falla potenciales y la acción sísmica mediante el método pseudoestático.

La metodología incluye: (1) definición geométrica del talud y estratigrafía, (2) definición de criterios de resistencia al corte (Mohr-Coulomb), (3) análisis de equilibrio límite mediante método ordinario de dovelas y (4) evaluación del FS bajo cargas estáticas y sísmicas. La herramienta simplifica las iteraciones para localizar superficies críticas y optimiza parámetros de diseño. Se validan los resultados con casos de estudio documentados.

Los resultados destacan la sensibilidad del FS a los parámetros de resistencia del suelo, geometría topográfica y aceleración sísmica, junto con recomendaciones ingenieriles de estabilización (bermas, drenajes o anclajes). La herramienta propuesta ofrece una solución accesible para diseño preliminar, complementando análisis avanzados.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, Equilibrio Límite, factor de seguridad, acción sísmica, herramienta numérica.

GEOMEMBRANA EN VERTEDEROS SANITARIOS: DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

Gonzalo M. Aiassa[1], Pedro A. Arrúa[1], Marcelo G. Eberhardt[1]
[1]Departamento de Ingeniería Civil, CIGEF (Centro de Investigación en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: gaiassa@frc.utn.edu.ar

RESUMEN

La adecuada gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es un desafío ambiental crucial, y los vertederos sanitarios representan una solución de disposición final ampliamente utilizada. La integridad de las geomembranas, componentes esenciales en los sistemas de barreras, resulta fundamental para prevenir la contaminación del suelo y aguas subterráneas. La resistencia a tracción es una propiedad mecánica clave para el diseño de celdas.
En este trabajo, se presenta el desarrollo de un dispositivo diseñado para evaluar el comportamiento de geomembranas sometidas a esfuerzos de tracción. La metodología incluye el diseño y construcción del equipo de ensayo. Se realizaron pruebas de tracción uniaxial para analizar la deformación, resistencia a rotura y capacidad de elongación de muestras de geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE). Los resultados demostraron la eficacia del dispositivo en la medición de las propiedades mecánicas, identificando puntos críticos de falla y validando su utilidad para controles de calidad en campo. El estudio concluye resaltando la relevancia de este desarrollo para optimizar el desempeño de geomembranas en vertederos, reduciendo riesgos ambientales y costos de mantenimiento. Este aporte resulta de relevancia para la toma de decisiones en la ingeniería geotécnica ambiental.

Palabras clave: Resistencia mecánica, Polietileno de alta densidad (HDPE), Vertederos

HORIZONTES ENDURECIDOS, EFECTO DE LA ESTRUCTURACIÓN INTERNA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Sabrina Rouzaut[1], Juan José Clariá[2], Nehuén Díaz[1]
[1]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina.
[2]Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: srouzaut@unc.edu.ar

RESUMEN
En Corralito, Córdoba, Argentina, se estudió un perfil de loess de 15 m de potencia para caracterizar el grado de estructuración de la matriz de los diferentes horizontes loéssicos presentes. Se tomaron muestras inalteradas del Loess inferior I, Loess inferior II y Loess Inferior III, a partir de las cuales se caracterizaron parámetros mecánicos tales como la susceptibilidad al colapso por humedecimiento, presión de fluencia, coeficientes de compresibilidad, resistencia al corte y rigidez. Estas propiedades se midieron tanto sobre probetas inalteradas como remoldeadas a igual peso unitario y humedad. Asimismo, las muestras fueron desmenuzadas manualmente aplicando una energía controlada y posteriormente tamizada en seco para poder cuantificar el tamaño y cantidad de grumos presentes. Por otro lado, se realizaron cortes delgados de las muestras de cada horizonte en condiciones naturales y luego de ser sometidas a compresión confinada en edómetro. Los resultados de las pruebas de laboratorio mostraron que los horizontes de Loess Inferior I y III tienen mayor estructuración que el Loess Inferior II. En los ensayos de compresión confinada (doble edómetro) y de compresión simple (resistencia al corte y rigidez) se observó una clara diferencia en el comportamiento mecánico de los suelos en condición natural y en condición remoldeada en los tres horizontes. Del análisis micromorfológico, se concluyó que el Loess Inferior I puede ser definido como un fragipán. El Loess II se define como un sedimento tipo loess. Por último, el Loess Inferior III fue clasificado como un suelo calcáreo o calcificado, en un estadio evolutivo tipo 1 ó 2 y de origen pedogenético. Finalmente se pudo inferir que la estructuración se manifiesta mediante acomodamiento entre granos, compactación y cementación interpartícula, la cual es desarrollada a lo largo de los distintos procesos geológicos a los que estos sedimentos estuvieron sometidos.

Palabras clave: Loess, micromorfología, toscas.

COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS MICROMORFOLÓGICO DE SUELOS DE TESTIGOS OBTENIDOS MEDIANTE VAINA TERZAGHI Y MORETTO; CONTRASTE CON MUESTRAS INALTERADAS

Sabrina Rouzaut[1], Pablo A. Eveling[1], Tadiana Fiorio[1]
[1]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: srouzaut@unc.edu.ar

RESUMEN
El objetivo de este trabajo es identificar diferencias y similitudes en cortes micromorfológicos de muestras homólogas de suelo en su estado natural y luego de la realización del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) utilizando sacamuestras Terzaghi y Moretto. En general, la longitud de la muestra esperada es de 45 cm; sin embargo, se obtiene menor longitud cuando que se ensaya. Con lo cual, se supone que existe una extrema deformación de la muestra cuando ingresa a la vaina, ya sea por compactación o acuñamiento. En un lote ubicado en la zona sur de la ciudad de Córdoba, se realizó un Ensayo de Penetración Estándar donde se tomaron muestras inalteradas, otras con Terzaghi y Moretto con y sin vaselina para determinar si la hipótesis planteada se cumple o no; un total de 16 muestras fueron extraídas. A partir del análisis micromorfológico, se detectó una leve disminución en la porosidad general de las muestras, especialmente en las características de las cavidades y canales y un aumento de las fisuras producto del golpe en la caída de la pesa. Por otro lado, se observó una disminución de la relación de vacíos en las muestras ensayadas con respecto a las inalteradas. Sin embargo, no se observó ningún tipo de acuñamiento ni deformación. Esto permite suponer que el material parental, loess; así como como las dimensiones de los cortes micromorfológicos no permitieron comprobar la hipótesis planteada.

Palabras clave: muestreadores, micromorfología, loess.

ASPECTOS MINERALÓGICOS Y MORFOLÓGICOS DE MINERALES FIBROSOS EN CANTERAS INACTIVAS DE ROCAS SERPENTINITICAS EN LA ZONA DE ALTA GRACIA, PROVINCIA DE CÓRDOBA.

Leticia Lescano[1], Jorge Sfragulla[2], Constanza Bournod[1]
[1]Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología – CGAMA - CIC
[2]Universidad Nacional de Córdoba, Departamento de Geología Básica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Mail de contacto: leticia.lescano@uns.edu.ar

RESUMEN

La provincia de Córdoba es la más grande productora de rocas serpentiniticas de la Argentina. En el pasado, las rocas ultrabasicas serpentinizadas han sido explotadas para la obtención de cromita, talco, serpentinita (verde alpe, rojo begonia), vermiculita y asbesto (Sfragulla et al., 2009). Este último, es un término comercial que involucra un mineral del grupo de la serpentina (crisotilo) y anfíboles (crocidolita, amosita, antofilita; actinolita y tremolita). Estos poseen un hábito fibroso, son flexibles, resistentes a la tracción, a la degradación química y biológica, e ignífugos. Debido a diferentes estudios, se ha comprobado que son dañinos para la salud ya que pueden penetrar en las vías respiratorias y acumularse en los pulmones, desarrollando cáncer o asbestosis (Zoltai 1981). Por esta razón, en Argentina, a partir del año 2000 (Rodríguez 2004), se prohibió la producción, importación, comercialización y uso de fibras de asbestos.

Se han realizado múltiples investigaciones en la provincia, focalizando en la presencia y morfología de los minerales fibrosos prohibidos, con el objetivo de realizar controles de las rocas explotadas y comercializadas. Para este trabajo se analizaron canteras de rocas serpentiniticas de la faja oriental (Villar 1975) en la Sierra Chica, actualmente inactivas de la zona de Alta Gracia, emplazadas en el cuerpo ultrabásico Bosque Alegre.

En cercanías de la Estancia San Bernardo, en las canteras Vitale, se recolectaron muestras de los frentes explotados (Fig. 1A y B). Bajo microscopio óptico se observaron venillas de crisotilo discordante con el bandeamiento de la masa de serpentinitica (Fig. 1C). A partir de los diferentes métodos utilizados se concluyó que las canteras de la zona de Alta Gracia presentan minerales fibrosos y morfologías que encuadran dentro de los minerales asbestiformes. A partir de estos estudios, se deberán tomar los recaudos para las explotaciones del área y los monitores correspondientes al momento de la movilización de los mismos.

Palabras clave: serpentinitas, asbestos, Alta Gracia, Córdoba.

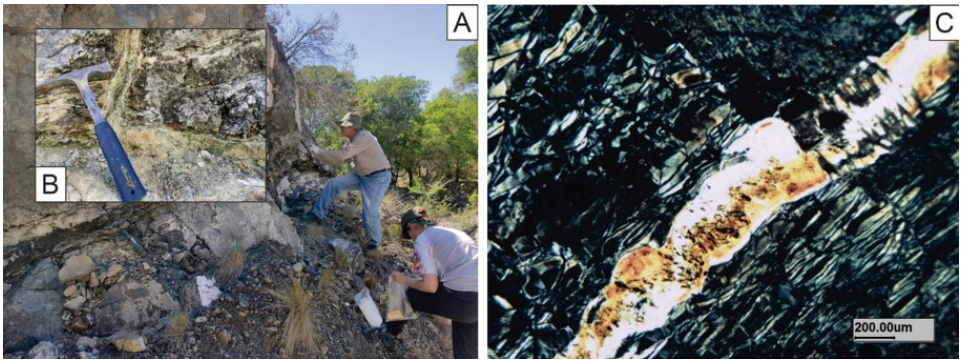


Figura 1. A: frente de una cantera de Alta Gracia. B: detalle de venillas. C. Venillas de crisotilo en la roca serpentinitica bajo microscopio óptico con nicoles cruzados.

REFERENCIAS

Sfragulla, J.A., Bonalumi, A.A., Briolini, N.M., Cabrera, J.I., 2009. Prospección de rocas ultramáficas de Córdoba, orientada a su aplicación industrial. 9° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas: 287-292. Catamarca.

Villar, L.M., 1975. Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas en la Rep. Argentina y su significado metalogenético. Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 3: 135-156.

Zoltai, T., 1981. Amphibole asbestos mineralogy. En Veblen, D.R. (Ed.) Reviews in Mineralogy 9A, Amphiboles and Other Hydrous Pyriboles, Mineralogical Society of America: 237-278, Washington.

CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES MINERALES DE MÁRMOLES DE LA CALERA, SAN LUIS: SU ESTUDIO MEDIANTE MÉTODOS QUÍMICOS Y ANÁLISIS ÓPTICO

Amancay Martinez[1], Franco Icazatti[1], Daniel A. Sales[1]
[1]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: amancaymartinez@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la proporción mineral presente en material proveniente de perforaciones en rocas calcáreas en el sector de La Calera, San Luis. La metodología utilizada en el análisis de las muestras fue por digestión ácida y gravimetría. La digestión se utilizó para atacar a los carbonatos solubles en ácido clorhídrico, luego insolubilizarlos y deshidratarlos. Los minerales silicatados insoluble quedaron como residuo. Dicho residuo fue ponderado por gravimetría, una vez eliminados los carbonatos y separados los óxidos y sales solubles. Se realizó un cuarteo manual previo en todas las muestras, se tomaron sub-muestras con un peso entre 400 a 800 mg pesadas en balanza analítica, las que posteriormente fueron sometidas a digestión mediante solución de ácido clorhídrico. Se calentaron las muestras hasta sequedad en baño de arena. Se llevaron las muestras a un crisol de porcelana donde se calcinaron en una mufla a 900°C durante media hora. Se dejaron enfriar en el desecador de vidrio y se pesó el residuo en una balanza analítica.

Los resultados arrojados en general correspondieron al 85% de carbonato y 15% de minerales silicatados. La caracterización de los minerales presentes en el residuo no-carbonático fue efectuada mediante la utilización de lupa binocular. Las muestras de color grisáceo presentaron una composición en su mayor parte por cuarzo (90%) y por minerales del grupo de las micas (10%). El cuarzo se observa del tipo hialino y blanco con fractura concoide, con una leve tinción con hematita. Dentro del grupo de las micas, se reconoce en una escasa cantidad de muscovita laminar con un brillo plateado fuerte asociada a mica negra del tipo biotita. Los minerales micáceos son de mayor tamaño que los cristales de cuarzo. Esta caracterización permitió determinar que las rocas estudiadas corresponden a mármoles impuros con cierta cantidad de silicatos asociados.

Palabras clave: estudio óptico, ensayos químicos, composición mineralógica

MAPEO Y CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE BENTONITAS DEL ÁREA DE CERRO MORADO, DEPARTAMENTO JÁCHAL, SAN JUAN

Evelin M. Rivero[1], Pablo A. Ormeño[1]
[1]Instituto de Geología "Dr. Emiliano P. Aparicio", Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
Mail de contacto: ormenopablo@unsj-cuim.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo en la zona del Cerro Morado, en el extremo sur de la Sierra de Mogna, departamento Jáchal, en el ámbito de Precordillera Oriental en San Juan.
La geología del área corresponde básicamente a una secuencia de rocas sedimentarias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, plegadas en braquianticlinal de eje norte-sur de unos 8 km de largo, con un núcleo de calizas ordovícicas elevadas por falla. En sus flancos, la formación Río Salado (Neógeno), tiene intercalaciones de bentonita de gran continuidad, aunque sus espesores en general no superan el metro. El mineral, que sigue estratos de bajo a mediano buzamiento, es explotado en forma artesanal desde el siglo pasado.
Se presentan parte de los estudios realizados por la autora para su Trabajo Final de Licenciatura de la carrera de Licenciatura en Ciencias Geológicas, en el marco de un proyecto del Gabinete de Geología Económica del Instituto de Geología Dr. Emiliano Pedro Aparicio, de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; otorgado por el Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas y de Creación Artística (CICITCA), de la Universidad Nacional de San Juan.
En primer término, se realizó el procesamiento de imágenes satelitales ASTER, con el software ENVI, mediante el que se aplicaron distintos índices, tal como el de montmorillonita, con el que se logró destacar la Formación Río Salado, portadora de los niveles de bentonita.
A partir de mapas de autores previos, de la interpretación de imágenes satelitales color natural y procesadas, y observaciones de campo, se confeccionó un mapa geológico digitalizado, en que se muestran las distintas unidades litológicas y los principales elementos estructurales, sobre el que se destacan los diferentes niveles de bentonita.
De la caracterización mineralógica de dos muestras de bentonita, por medio de un espectrómetro ASD Terra Spec 4, se determinó la presencia mayoritaria de montmorillonita (Figura 1).

Palabras clave: minerales no metalíferos, bentonita, Cerro Morado

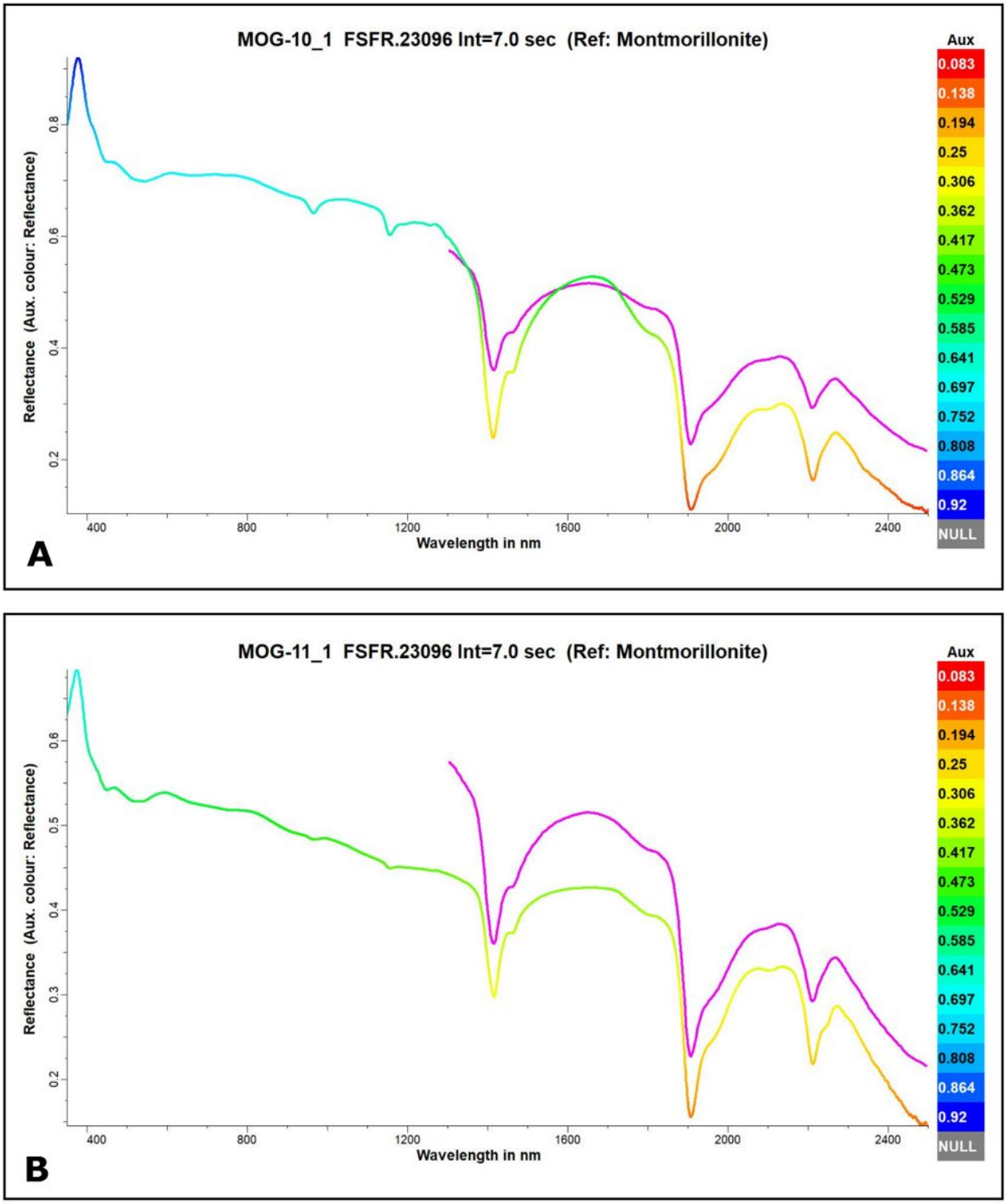


Figura 1. Firma espectral obtenida del espectrómetro Terra Spec 4 Hi-Res. A: Muestra MOG-10. B: Muestra MOG-11. En color violeta se representa el espectro característico de la montmorillonita.

POSIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE ÁRIDOS EN LA ZONA DE BASE PERTEL, CABO WELCHNESS, ANTÁRTIDA

Adrián A. Silva Busso[1, 2] y Julieta Arendar[2, 3]
[1]Instituto Antártico Argentino, Av. 25 de mayo 1147, B1650 Villa Lynch, Buenos Aires, Argentina
[2]Depto. de Cs. Geológicas, FCEN UBA, Av. Int. Cantilo, C1428 CABA, Argentina
[3]Dir. ODENAC, Ejército Argentino. Av. Constituyentes 6851, B1603 Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina
Mail de contacto: silvabusso@yahoo.com.ar

RESUMEN

La construcción del terraplén de la pista de aterrizaje y las obras de hormigón de la Base Petrel genera la necesidad de disponer de depósitos con la cantidad suficiente de material granular explotable. Este trabajo propone una primera evaluación de la disponibilidad local de áridos para la construcción. La zona de Cabo Wellchness, donde se haya la base, posee importantes acumulaciones de material clástico potencialmente aprovechable, pero las condiciones del permafrost local lo limitan. La morena actual que domina el paisaje resulta una posibilidad trunca, ya que su elevado contenido de hielo (80%) reduce mucho la recuperación del material. Son los depósitos de talud y abanico que se desarrollan al pie de la misma los que ofrecen alguna posibilidad por contener menos hielo (hasta 30%). La cubicación de áridos requiere la determinación del espesor aprovechable de cada cono u abanico. En este estudio se realizó, sobre cada depósito de interés, un análisis para estimar el espesor aprovechable evaluando la curva de resistividad eléctrica obtenida para determinar la cantidad admisible de hielo y establecer el límite inferior de la explotación cuando el contenido en hielo torna elevado. Esta metodología y el uso de una topografía detallada permiten realizar una cubicación preliminar del árido disponible. La figura 1 presenta un esquema de la determinación de cotas para la cubicación de los áridos. La diferencia entre la cota superior y el espesor estimado es la cota de corte que sirve como referencia para determinar la cantidad de material que se puede extraer durante el proceso de explotación. Luego, se calculó el volumen total del depósito y el volumen de corte a partir de un modelado de la geoforma siguiendo la regla de Simpson para aproximar el área bajo una curva calculando el porcentaje de recuperación en función del contenido estimado de hielo.

Palabras clave: áridos, Petrel, Antártida.

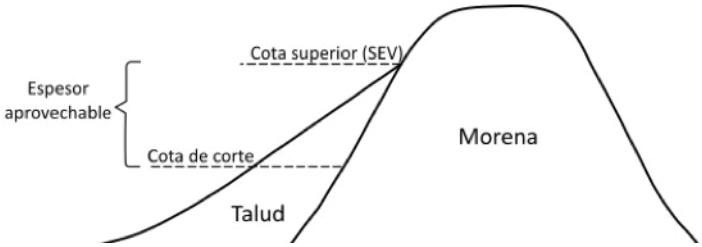


Figura 1: Esquema de cubicación de los depósitos de áridos

APLICACIÓN DE LAS ASOCIACIONES SEDIMENTO-GEOFORMA EN LA PROSPECCIÓN DE ÁRIDOS EN LA CUENCA DEL RÍO FUEGO, TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA

Federico G. Zuck[1,2], María P. Bottone[3,1], Juan F. Ponce[2,1]
[1]Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, UNTDF, Fuegia Basket 251, Ushuaia, Argentina.
[2]Centro Austral de Investigaciones Científicas, CONICET, Bernardo Houssay 200, V9410 Ushuaia, Argentina.
[3]Ministerio de Producción y Ambiente, Gob. de Tierra del Fuego, AeIAS, San Martín 1401, Ushuaia, Argentina.
Mail de contacto: zuckfederico@gmail.com

RESUMEN

Los áridos representan el recurso minero de mayor consumo a nivel mundial en la industria de la construcción, fundamentales para el desarrollo de infraestructura pública y privada. Diferentes procesos morfodinámicos ocurridos en Tierra del Fuego dieron origen a geoformas con gran potencial para la extracción de áridos, como las presentes en la cuenca del río Fuego. Estas se formaron durante el Pleistoceno y Holoceno, asociadas a diferentes eventos glaciales e interglaciales y variaciones del nivel del mar.
Este trabajo tiene como objetivo mostrar la aplicación del análisis geomorfológico mediante imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (MDE) basado en asociaciones sedimento-geoforma (Chiverrell et al. 2008) como método de prospección de áridos en la provincia de Tierra del Fuego AeIAS, útil para la planificación territorial.
Mediante el uso de QGIS 3.42.1, imágenes satelitales Google, Bing, Esri y MDE Alos Palsar, se realizó un análisis de terreno y mapeo geomorfológico escala 1:10.000, con control de campo y levantamiento topográfico con GPS diferencial (figura 1) para identificar y diferenciar las distintas unidades geomorfológicas de la cuenca, con el objetivo de clasificarlas según su potencial como fuente de áridos. Se realizaron análisis sedimentológicos en una secuencia de terrazas glacifluviales y se clasificaron según su potencial como fuente de áridos. Finalmente, se estimaron volúmenes mediante "Volume calculation tool" (plug-in QGIS) (Tabla 1).
Las principales geoformas de la cuenca corresponden a morenas fronto-laterales y basales, sandur, terrazas glacifluviales, barras de meandros, abanicos aluviales, cordones litorales y sistemas de dunas (Bottone et al. 2024). Las unidades de origen glacifluvial y fluvial son las que cuentan con un potencial alto, dada su composición predominantemente gravosa con poca matriz de finos, frente a los depósitos de origen glacial y subglacial que generalmente cuentan con una peor selección y mayor porcentaje de partículas limo-arcillosas (Zuck y Ponce, 2024). Esta metodología constituye un importante apoyo previo al trabajo de campo, ajustando los objetivos de las campañas de muestreo, reduciendo considerablemente los tiempos y costos de trabajo.

Palabras clave: áridos, geomorfología, MDE

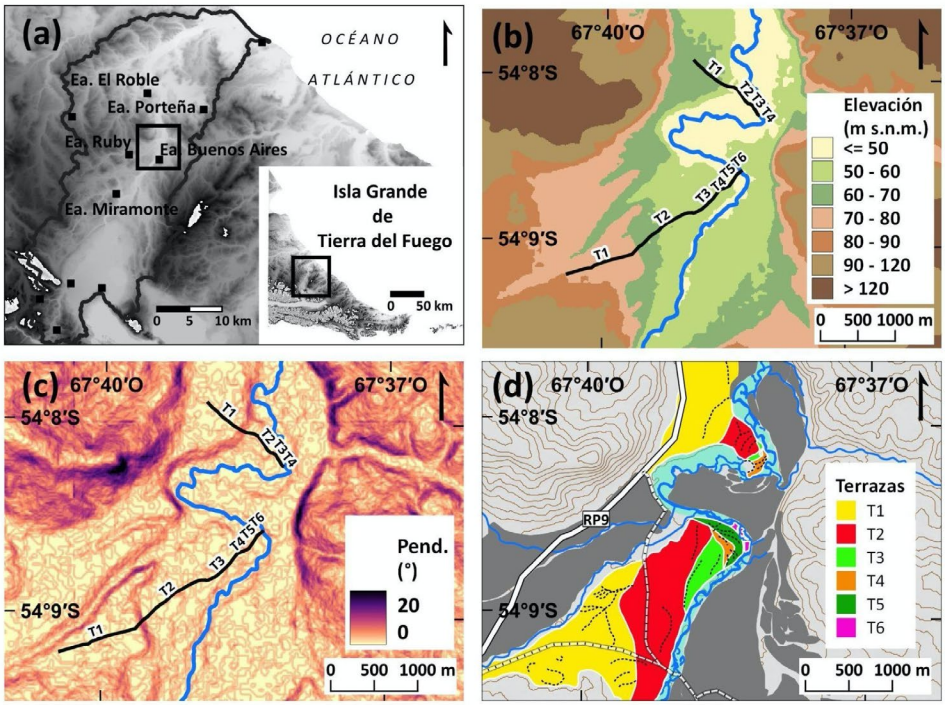


Figura 1. Levantamiento (DGPS) y análisis topográfico con MDE para definición de unidades geomorfológicas, cuenca del río Fuego. (a) Ubicación del área de estudio (b) Elevaciones. (c) Pendientes. (d) Terrazas glacifluviales.

UG	CP	Área (m²)	Volumen (m³)
T1	2	2.625.177	42.644.375
T2	2	1.256.943	65.843.750
T3	2	184.488	622.500
T4	2	66.579	142.500
T5	1	90.965	267.500
T6	3	15.464	7.500

Tabla 1: Dimensiones de las unidades geomorfológicas. UG: unidad geomorfológica. CP: cantidad de polígonos.

REFERENCIAS

Bottone, M. P., Coronato, A. J., & Ponce, J. F. 2024. Geomorfología de la cuenca del río Fuego, Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina. *XXII Congreso Geológico Argentino*. 951-952.

Chiverrell, R. C., Thomas, G. S. P., & Foster, G. C. 2008. Sediment–landform assemblages and digital elevation data: Testing an improved methodology for the assessment of sand and gravel aggregate resources in north-western Britain. *Engineering Geology*, 99(1-2), 40-50.

Zuck, F. G., & Ponce, J. F. 2024. Unidades geomorfológicas como fuente de áridos en el centro y sur de la provincia de Tierra del Fuego, Argentina. *XXII Congreso Geológico Argentino*. 640-641.

TRABAJOS

ASPECTOS GEOLÓGICOS INGENIERILES

ADAPTACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN DESAGÜE PLUVIAL URBANO A LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL TERRENO

Agustín Balbis[1], Juan P. Cerutti[1]
[1]Consultora AbyaTerra S.R.L., Albano de Labergue 6240, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: balbis.agustin@gmail.com

RESUMEN

La construcción de obras de infraestructura subterránea, como es el caso de un desagüe pluvial enterrado, implica grandes desafíos desde el punto de vista ingenieril. Estos se vuelven aún más complejos en entornos urbanos, donde la densidad de servicios, las restricciones espaciales y las interacciones con la comunidad imponen condiciones adicionales que deben gestionarse cuidadosamente en todas las etapas del proyecto.

Este artículo presenta las variantes constructivas implementadas en un tramo de aproximadamente 450 m de longitud, en una obra de desagüe pluvial urbano construida en la zona norte de la ciudad de Córdoba, Argentina.

El perfil geológico del subsuelo en el sector de la construcción está compuesto por suelos transportados por la acción fluvial del río Suquía, consistentes en limos arenosos y arenas con grava y cantos rodados, que descansan sobre un estrato sedimentario clástico, conocido como Formación Saldán. Las características geotécnicas de los suelos del sector, junto con las diferentes profundidades de cimentación del conducto de drenaje y las interferencias subterráneas existentes, determinaron la necesidad de adoptar las siguientes variantes constructivas: i) Sector I: excavación a cielo abierto con soporte estructural temporal y ii) Sector II: ejecución de un revestimiento de túnel.

Palabras clave: desagüe subterráneo, ambiente urbano, proceso constructivo, suelos granulares.

ABSTRACT

The construction of underground infrastructure projects, such as a buried storm drain, entails significant engineering challenges. These challenges become even more complex in urban environments, where the density of services, spatial constraints and community interactions impose additional technical conditions that must be carefully managed at all stages of the project.

This article presents the construction variants implemented in a section of approximately 450 m in length, in an urban storm drainage project, built in the northern area of the city of Córdoba, Argentina.

The geological profile of the subsoil in the construction sector is composed of soils transported by the fluvial action of the Suquía River, consisting of sandy silts and sands with gravel and boulders, which rest on a clastic sedimentary stratum, known as the Fm. Saldán. The geotechnical characteristics of the soils in the sector, together with the different foundation depths of the drainage conduit and the existing underground interferences, determined the need to adopt the following construction variants: i) Sector I: open excavation with temporary structural support and ii) Sector II: execution of a tunnel liner.

Keywords: underground drain, urban environment, construction process, granular soils.

INTRODUCCIÓN

La construcción de obras de infraestructura subterránea, como es el caso de un desagüe pluvial enterrado, implica grandes desafíos desde el punto de vista ingenieril. Estos se vuelven aún más complejos en entornos urbanos, donde la densidad de servicios, las restricciones espaciales y las interacciones con la comunidad imponen condiciones adicionales que deben gestionarse cuidadosamente en todas las etapas del proyecto.

En este contexto, resulta fundamental contar con un conocimiento detallado del medio geológico y sus características geotécnicas, a través de la correcta definición del modelo geológico-geotécnico del área de estudio. Este enfoque es esencial tanto para el diseño de la obra como para la planificación de su proceso constructivo.

Este artículo presenta las variantes constructivas implementadas en un tramo de aproximadamente 450 m de longitud, en una obra de desagüe pluvial urbano construida en la zona norte de la ciudad de Córdoba, Argentina.

Para el caso de la obra mencionada, se destacan los diversos desafíos que fue necesario abordar, principalmente asociados a las características geotécnicas de los suelos del sector, las profundidades requeridas para la cimentación del conducto de desagüe

y las interferencias subterráneas existentes. La interacción de estos factores condicionó la selección de los métodos constructivos empleados. Entre estos últimos, se implementaron diversas técnicas, incluyendo entibados estructurales provisorios en excavaciones a cielo abierto, la construcción del conducto mediante tecnología de túnel *liner* y reemplazos de suelos.

Ubicación y descripción del proyecto

La obra completa del desagüe pluvial urbano se emplaza en la zona norte de la ciudad de Córdoba, en una sección comprendida entre la Av. Ricardo Rojas y el río Suquía. Dentro de esta sección, la zona específica tratada en este artículo, abarca un subtramo de la calle Viracocha, entre el río Suquía y la Av. Recta Martinolli, tal como se aprecia en la Figura 1. Todo el sector bajo estudio se caracterizada por la presencia de urbanización e interferencias subterráneas complejas como acueductos, conductos cloacales, fibra óptica y gasoductos.



Fig. 1. Ubicación de zona de obra.

De acuerdo con las previsiones iniciales del proyecto, el tramo de obra en el que se intervino, se puede describir por sectores en función de las características de diseño.

- Sector I: está comprendido entre el río Suquía y la Av. Recta Martinolli. La obra prevista estaba compuesta por dos conductos de sección rectangular de 1,5 x 2,0 m cada uno. Para éstos, se preveía la utilización de módulos prefabricados de hormigón. La profundidad máxima de cimentación en este tramo es del orden de 7,0 m.
- Sector II: se corresponde al tramo de cruce bajo la Av. Recta Martinolli. La obra prevista incluía la ejecución de dos cámaras de inspección y dos conductos de sección circular de Ø1,2 m cada uno, construidos mediante la tecnología de túnel liner. En este sector, ambos conductos se emplazan a una profundidad media de 7,0 m y pasan por debajo de interferencias importantes, entre las que se destaca un acueducto maestro de Ø1,50 m. Este conducto se encuentra fundado a una profundidad de aproximadamente 3,0 m por debajo de la calzada de la avenida Martinolli y tiene más de 50 años de antigüedad, con algunos rasgos de deterioro. La singularidad de este último, es que se debía mantener en servicio durante la obra sin afectarlo.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL TERRENO

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de emplazamiento de la obra se corresponde con la Faja fluvial del río Suquía o Primero (Capitanelli, 1979a). Dentro de esta, comprende la zona de transición entre la llanura de inundación del cauce y los niveles de terrazas bajas y medias, con relieve plano a suavemente ondulado e inclinación general hacia el sur.

Todo el sector evidencia una marcada influencia fluvial en sus depósitos, destacándose la presencia de sedimentos fluvio-aluviales (arenas y gravas en lecho y terrazas), intercalados con limos loéssicos retransportados por la acción del agua. Los materiales descriptos fueron afectados en diferente medida por la dinámica fluvial pasada y actual del río, además del nivel freático, que está asociado al tirante hidráulico del cauce.

De acuerdo con información obtenida de sondeos geotécnicos ejecutados en el sector, el perfil geológico del subsuelo está compuesto por tres estratos con características diferenciables. El estrato superior de aproximadamente 3,0 m a 4,0 m de espesor, está compuestos por limos arenosos y arenas finas limosas con gravillas dispersas. El estrato intermedio se corresponde con un depósito

de materiales aluvionales gruesos (arenas gruesas con gravas y rodados de $Ø_{máx}$ 80 cm), cuyo espesor medio es del orden de 3,0 m. Por debajo de este manto fluvio-aluvial, se encuentra el estrato inferior representado por la Fm. Saldán (macizo rocoso sedimentario clástico), de la cual se observan algunos afloramientos en las inmediaciones del cauce del río Suquía. En la Figura 2 se expone el perfil longitudinal del tramo de obra y se incluyen los perfiles de suelos identificados en tres sondeos geotécnicos.

En la Tabla 1 se resume el modelo geológico-geotécnico del sector de emplazamiento de la obra con su correspondiente parametrización, conformado a partir de la información obtenidas de sondeos geotécnicos y el análisis de muestras en laboratorio. Este modelo fue continuamente ajustado con la información obtenida de las excavaciones de obra.

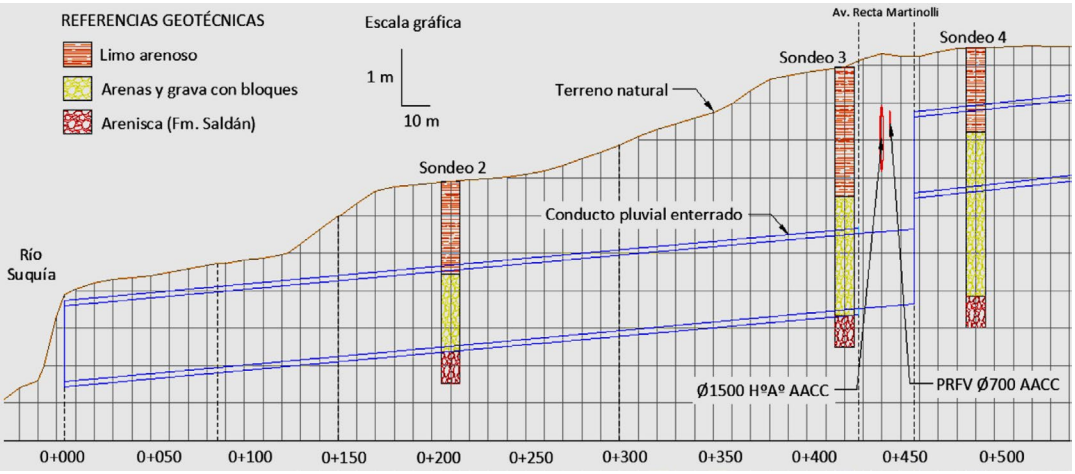


Fig. 2. Perfil geológico longitudinal en tramo de obra.

UNIDAD GEOTÉCNICA	SUCS	ESPESOR [M]	$(N_1)_{60}$	PU_D [KN/M³]	Φ´ [°]	C´ [KPA]
Limo arenoso	ML	≈ 4	5 - 8	13	18 - 20	0
Arenas y grava con bloques	SM / GM / GP	≈ 3	> 50	17	38 - 40	0
Arenisca (Fm. Saldán)	---	≈ 4	> 50	22	36 - 38	50 - 70

Tabla 1. Modelo geológico-geotécnico de la obra.

ADAPTACIONES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Partiendo de las características iniciales del proyecto descritas en la introducción de este artículo, se detallan las adaptaciones constructivas realizadas debido a las condiciones geológicas y geotécnicas encontradas en las etapas previas y durante la construcción.

La descripción se presenta del Sector I hacia el Sector II, siguiendo el orden del proceso constructivo, en dirección opuesta al flujo interno del desagüe.

Sector I: calle Viracocha entre río Suquía y Av. Recta Martinolli

En este sector, dado que la profundidad máxima de cimentación del conducto en algunos tramos era del orden de 7,0 m, fue necesario modificar un tramo del proyecto original y se planificó la utilización de entibados provisorios para la instalación del conducto, asegurando simultáneamente la seguridad de los operarios y la protección de las edificaciones circundantes, como viviendas y postes de tendido eléctrico.

El entibado se ejecutó con el fin de contener los estratos superior e intermedio (suelos granulares) que descansan sobre la Formación Saldán. En términos de resistencia al corte, estos suelos presentan una componente de cohesión aparente, que se encuentra estrechamente vinculada al contenido de humedad del depósito. Esta característica provoca que, cuando se realizan excavaciones verticales, inicialmente exhiban una estabilidad temporal. No obstante, al secarse debido al viento y/o la radiación solar, o al humedecerse por la lluvia o la rotura de tuberías de servicios, pierden rápidamente la estabilidad como consecuencia de la reducción de la cohesión aparente. Debido a la composición granular y a la microestructura de los suelos del sector, los cambios de humedad y, por ende, de las condiciones de estabilidad ocurren relativamente rápidos.

En la Figura 3 se presenta una fotografía del entibado utilizado, junto con los empujes calculados que sirvieron para su dimensionado. Para estimar estos empujes, se utilizó el modelo propuesto por Peck (1969) para suelos granulares.

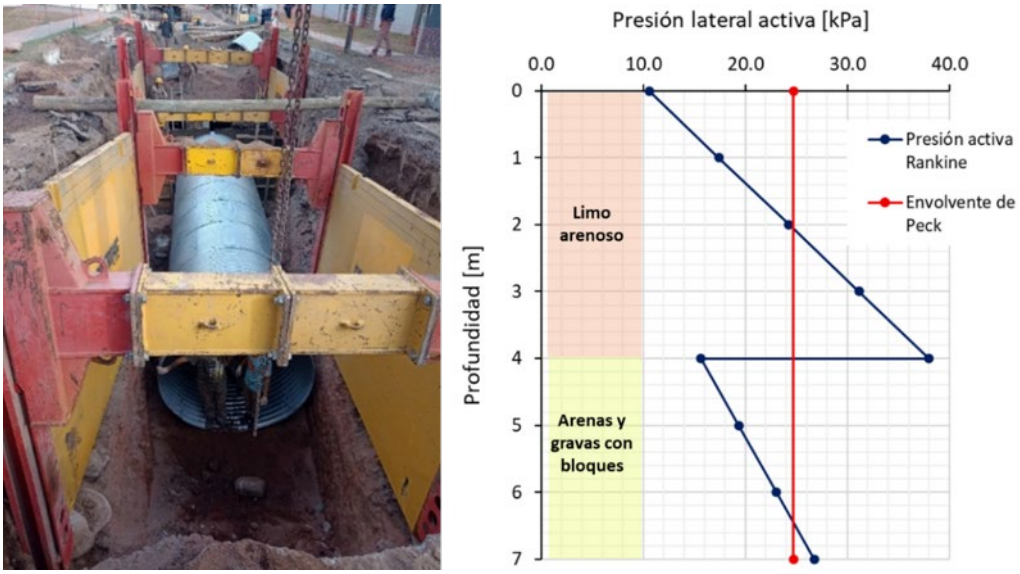


Fig. 3. Izquierda: Entibado utilizado en Sector I. Derecha: envolvente de empuje de diseño.

La utilización de los entibados mostrados en la Figura 3 impulsó la realización de ajustes en el diseño y proceso constructivo, debido principalmente a las limitaciones de espacio interior en el recinto de los módulos de entibado. Como consecuencia, en un tramo de aproximadamente 200 m, se optó por sustituir los dos conductos rectangulares inicialmente previstos por una tubería metálica circular de Ø2,2 m. Esta nueva solución se implementó por avances en tramos de 4,0 m de longitud, coincidiendo con la distancia entre los puntales del entibado.

Sector II: cruce de Av. Recta Martinolli

Uno de los principales desafíos de este tramo fue cruzar por debajo de un acueducto maestro de Ø1,5 m, asegurando su funcionamiento durante el transcurso de la obra. Para ello, el organismo provincial encargado de la gestión del agua exigió la implementación de un sistema de sostenimiento preventivo. Este sistema consistió en la instalación de una viga metálica de suficiente longitud, que pudiera sostener el caño destapado mediante bridas y eslingas, tal como se muestra en la Figura 4. Durante todo el período de construcción, un equipo de agrimensores se encargó del control continuo de los desplazamientos en puntos de control instalados en la viga y en el acueducto maestro.

Por otro lado, en este sector se había previsto la construcción de dos tuberías utilizando la tecnología de túnel *liner*. Sin embargo, dado que dichos túneles se ubicaban mayormente en la unidad geotécnica intermedia compuesta por arenas con gravas y bloques apoyadas sobre las areniscas de la Fm. Saldán, el proceso de excavación manual resultaba extremadamente complicado y peligroso. Esto se debía a la alta susceptibilidad de que ocurrieran desmoronamientos en la clave de los túneles. Además, la presencia de bloques rocosos de Ø 0,8 m representaba una complicación adicional, tanto por la dificultad para su extracción por parte de los operarios como por el obstáculo que suponían para la instalación de los arcos metálicos de la estructura de sostenimiento.



Fig. 4. Izquierda: Sostenimiento provisorio de acueducto maestro. Derecha: túnel liner Ø2,2 m.

Atento a los condicionantes mencionados, en primer lugar, se realizó un cambio de diseño consistente en reemplazar las dos tuberías inicialmente previstas por una de mayor diámetro (Ø 2,2 m), similar a la utilizada en el Sector I, tal como se observa en la Figura 4.

En segundo lugar, se propuso el reemplazo de suelos arenosos en la zona de la clave del túnel, con el objetivo de introducir un material cohesivo que evitara los desmoronamientos durante la excavación. Este reemplazo se llevó a cabo utilizando RDC (relleno de densidad controlada, compuesto por una mezcla de suelo y cemento). La secuencia constructiva adoptada fue: i) excavaciones desde la superficie, ii) vertido del RDC desde un camión *mixer* y fraguado y, iii) excavación e instalación del túnel *liner*. Las etapas i y ii se ejecutaron en tramos cortos, optimizando los tiempos de ejecución al máximo y, una vez concluidas, se ejecutó la etapa iii. En la Figura 5 se presenta un esquema conceptual de la secuencia constructiva adoptada.

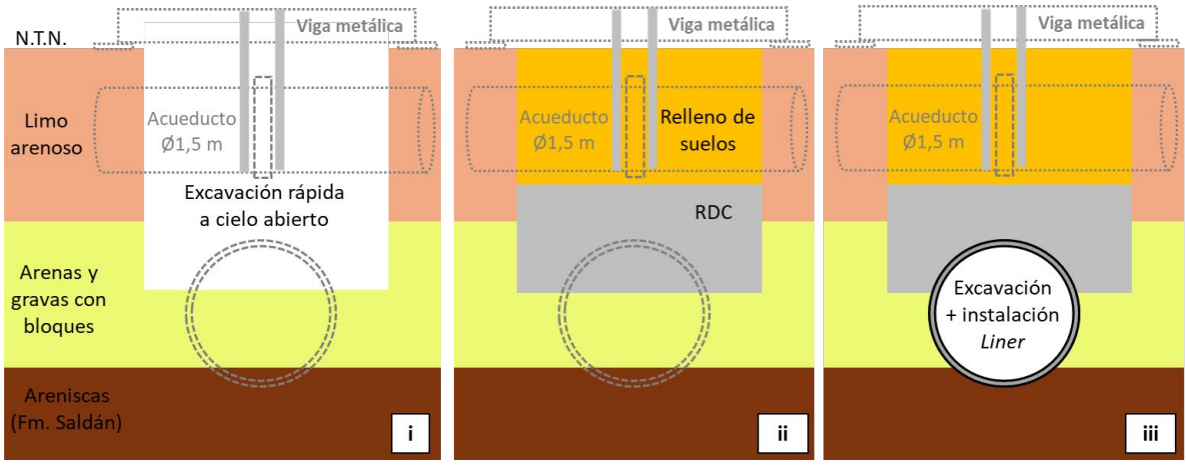


Fig. 5. Esquema conceptual de la secuencia constructiva adoptada en Sector II.

CONCLUSIONES

En virtud de la experiencia presentada en este artículo, se resalta la importancia que adquiere definir un adecuado modelo geológico-geotécnico del sitio de obra, basado en la comprensión detallada de los factores geológicos y geomorfológicos que influyen en el comportamiento del terreno. La validación continua de dicho modelo durante el avance de la obra, fue una tarea fundamental para anticipar y gestionar los riesgos durante la instalación de los conductos.

Para el caso presentado, se tuvieron que sobrepasar desafíos asociados principalmente a la variabilidad geotécnica de los suelos del sector (propias de ambientes fluviales), las profundidades de cimentación del conducto de desagüe y las interferencias subterráneas. Por todo esto, fue necesario implementar diferentes técnicas constructivas entre las que se incluyeron entibados estructurales provisorios en excavaciones a cielo abierto, la construcción del conducto mediante tecnología de túnel *liner* y reemplazos de suelos.

Finalmente, se enfatiza la importancia del trabajo interdisciplinario llevado a cabo entre profesionales y técnicos. En tal sentido, se generó una fuerte interacción entre ingenieros, geólogos, agrimensores, técnicos y obreros, lo que aseguró la implementación efectiva de las soluciones técnicas y la correcta gestión de los desafíos que surgieron a lo largo del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a la empresa constructora Anka Loo Construcciones S.R.L., por autorizar la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

Capitanelli, R. (1979a). Geomorfología. En Vázquez J.B., Miatello R.A. y Roque M.E. (eds.) Geografía física de la Provincia de Córdoba. 213–457. Editorial Boldt. Córdoba.

Peck, R. B. (1969). “Deep excavations and tunneling in soft ground. State-of-the-art report.” Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico, pp. 225-290.

FACTIBILIDAD DE USO DE MATERIAL RECICLADO (HORMIGÓN) COMO AGREGADO PARA BASE Y SUBBASE DE VÍAS

Luna Victoria Cabrera Maina[1,2,3], Gonzalo Aiassa[1,2], Lucca Emanuel Dellacasa[3], Raul López[3]
[1]Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina
[2]Centro de Investigación y Desarrollo en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones (CIGEF), Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina
[3]Centro de Desarrollo e Innovación (CDi), Holcim Argentina, Malagueño, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: luna.vcabrera@hotmail.com

RESUMEN
La gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) es un desafío creciente en Argentina y el mundo. En este contexto, el reciclaje de hormigón como agregado para bases y subbases viales representa una alternativa sostenible que podría reducir la extracción de áridos naturales y minimizar el impacto ambiental de la industria de la construcción. Esta investigación evalúa la factibilidad del uso de hormigón reciclado en infraestructuras viales en Córdoba, Argentina, considerando aspectos normativos, mecánicos y de desempeño a largo plazo.
El material utilizado proviene del hormigón de retorno de los camiones mezcladores de la planta de hormigón elaborado de Holcim Argentina en Córdoba. Este es procesado en la planta de agregados pétreos de Holcim Argentina, ubicada en Malagueño, donde se tritura hasta obtener una granulometría de 0-20 mm. Se analizan normativas locales e internacionales para establecer criterios de comparación y determinar la viabilidad técnica del material. Se realizaron ensayos de laboratorio normalizados según normas IRAM y VN, evaluando granulometría, contenido de sulfatos y sales, soporte CBR, desgaste Los Ángeles, índice de plasticidad, compactación Proctor, densidad a granel y relación de finos, entre otros.
Los hallazgos preliminares sugieren que el hormigón reciclado puede cumplir con los estándares de calidad requeridos para su aplicación en bases y subbases, siempre que se adopten criterios adecuados de selección y procesamiento, y se combine con materiales naturales. Esta investigación aporta información clave para el desarrollo de políticas de gestión de RCD y fomenta la transición hacia una economía circular en el sector vial.

Palabras clave: hormigón reciclado, infraestructura vial, residuos de construcción

ABSTRACT
The management of Construction and Demolition Waste (CDW) is a growing challenge in Argentina and worldwide. In this context, the recycling of concrete as aggregate for road base and sub-base layers represents a sustainable alternative that could reduce the extraction of natural aggregates and minimize the environmental impact of the construction industry. This study evaluates the feasibility of using recycled concrete in road infrastructure in Córdoba, Argentina, considering regulatory, mechanical, and long-term performance aspects.
The material used originates from returned concrete from mixer trucks at Holcim Argentina's ready-mix concrete plant in Córdoba. This concrete is processed at Holcim Argentina's aggregate plant located in Malagueño, where it is crushed to achieve a particle size of 0–20 mm. Local and international standards are analyzed to establish comparison criteria and determine the technical viability of the material. Laboratory tests were conducted in accordance with IRAM and VN standards, assessing particle size distribution, sulfate and salt content, California Bearing Ratio (CBR), Los Angeles abrasion resistance, plasticity index, Proctor compaction, bulk density, and fines content, among others.
Preliminary findings suggest that recycled concrete can meet the quality standards required for base and subbase applications, provided that appropriate selection and processing criteria are applied. This research provides key information for CDW management policy development and promotes the transition toward a circular economy in the road construction sector.

Keywords: recycled concrete, road infrastructure, construction waste,

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba enfrenta un desafío creciente vinculado a la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD),

producto del desarrollo urbano acelerado y la expansión sostenida del sector de la construcción. La acumulación de estos residuos, especialmente de hormigón, ha generado impactos negativos en el entorno, como la proliferación de vertederos ilegales y la presión sobre recursos naturales no renovables.

Ante este panorama, se identificó una oportunidad técnica y ambiental en la valorización del hormigón reciclado como insumo para bases y subbases viales, alineándose con principios de economía circular. Diversos estudios internacionales han demostrado el potencial de este tipo de material, sin embargo, en el contexto local aún existen vacíos normativos y técnicos que limitan su implementación.

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad del uso de hormigón reciclado triturado como agregado para estructuras de pavimento en Córdoba, Argentina. Para ello, se utiliza material proveniente del hormigón de retorno procesado en la planta de agregados pétreos de Holcim Argentina, ubicada en Malagueño. Esta caracterización local permite establecer lineamientos adaptables a las condiciones geotécnicas y constructivas propias de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del presente estudio se emplearon residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes del hormigón de retorno de la planta hormigonera RMX, procesados como agregado reciclado en la planta de agregados pétreos de Holcim Argentina, ubicada en Malagueño, Córdoba. Este material fue analizado con el objetivo de evaluar su comportamiento como agregado para capas de base y subbase en estructuras viales, comparándolo con agregados naturales utilizados habitualmente en obras de la región.

El estudio comenzó con la identificación, recolección y procesamiento de las muestras. Se seleccionaron y acondicionaron tres tipos principales de mezclas: una compuesta en un 100% por agregado reciclado, otra por agregado natural (como control) y un grupo de mezclas combinadas con distintas proporciones entre ambos materiales. Las combinaciones se diseñaron para cubrir posibles escenarios de aplicación en obra, y permitir la comparación entre diferentes porcentajes de incorporación del material reciclado.

Una vez preparadas, las muestras fueron sometidas a una batería de ensayos físico-mecánicos en laboratorio, siguiendo las normas IRAM vigentes y las especificaciones técnicas establecidas por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) y la Municipalidad de Córdoba para bases y subbases granulares. Los ensayos incluyeron análisis granulométrico (IRAM 1505), ensayo Proctor de compactación (VN-E5-93), determinación del valor soporte California (CBR, según VN-E6-84), desgaste por abrasión con máquina “Los Ángeles” (IRAM 1535), determinación de densidad a granel (IRAM 1548), límites de consistencia (VN-E2-65 y VN-E3-65), contenido de sulfatos y sales (IRAM 1647), y relación de finos (PT200/PT40).

El procedimiento experimental permitió analizar de forma sistemática el comportamiento del hormigón reciclado triturado frente a los requerimientos técnicos locales. Se evaluaron propiedades como la capacidad de soporte, la resistencia al desgaste, la trabajabilidad y la compatibilidad con el material pétreo convencional. Asimismo, se aplicaron métodos de análisis comparativo y estadístico para interpretar los resultados obtenidos, establecer relaciones entre las variables de mezcla y el desempeño final de los materiales, y validar o rechazar la hipótesis planteada.

Este enfoque integral no solo permitió verificar el cumplimiento de la normativa vigente, sino también explorar el potencial del agregado reciclado como una solución técnica y ambientalmente sostenible para la construcción de infraestructuras viales en Córdoba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de caracterización realizados sobre mezclas con diferentes proporciones de agregado reciclado permitieron establecer tendencias de comportamiento relevantes en cuanto a su desempeño mecánico e hidráulico. A continuación, se presentan y discuten las correlaciones más significativas observadas.

Relación entre contenido de agregado reciclado y capacidad de soporte (CBR)

Se evidenció que un mayor porcentaje de agregado reciclado en la mezcla disminuye la capacidad de soporte, debido a la menor cohesión interna y mayor porosidad del material reciclado. La muestra con 100% de agregado reciclado presentó un valor de CBR considerablemente inferior respecto a las mezclas con incorporación parcial de material natural. Esta tendencia se atribuye a la presencia de mortero adherido en los agregados reciclados, que reduce la rigidez del esqueleto granular. No obstante, la dosificación mixta permitió alcanzar valores de CBR compatibles con usos estructurales, lo que respalda la viabilidad técnica de emplear estos materiales en capas de base y subbase bajo criterios de diseño controlado.

Relación entre desgaste Los Ángeles y capacidad de soporte

Se observó una correlación inversa entre el índice de desgaste y el CBR, donde materiales con mayor desgaste presentaron menor resistencia a la carga. El agregado reciclado puro mostró el mayor desgaste (26,98%) y el menor CBR, reflejando su menor resistencia a la fragmentación y, por ende, su desempeño estructural limitado. Las mezclas con agregados naturales presentaron menores valores de desgaste y mayor capacidad de soporte, lo que refuerza la necesidad de limitar el contenido de reciclado para preservar

la integridad mecánica del sistema granular.

Influencia de la granulometría en la compactación

El contenido de finos mostró una relación directa con la humedad óptima e inversa con la densidad máxima. El agregado reciclado, al poseer mayor proporción de finos, requirió más agua para alcanzar su densidad máxima, la cual además fue menor que la de las mezclas. Las combinaciones con agregado natural permitieron mejorar significativamente las condiciones de compactación, logrando una mayor densidad y menor humedad óptima. Este comportamiento impacta directamente en la estabilidad estructural y sugiere la necesidad de optimizar la curva granulométrica para mejorar la respuesta del material frente a cargas repetidas.

Efecto del contenido de finos sobre la permeabilidad

Los valores de finos en el tamiz N° 200 revelaron que el agregado reciclado excede el límite permitido para capas granulares, lo que compromete su capacidad de drenaje. Esta condición incrementa el riesgo de acumulación de humedad y deterioro prematuro del pavimento. En contraste, las mezclas con menor contenido de finos se mantuvieron dentro de los rangos normativos, lo que permite inferir un mejor comportamiento drenante. Estos resultados destacan la importancia de controlar estrictamente la fracción más fina del material para asegurar una adecuada permeabilidad y prolongar la vida útil de la estructura vial.

Síntesis

Los resultados obtenidos validan el potencial uso de agregados reciclados en aplicaciones viales, siempre que se empleen en proporciones adecuadas y combinados con agregados naturales. Las mezclas mostraron mejoras en términos de capacidad de soporte, resistencia al desgaste, compactibilidad y permeabilidad, posicionándose como una alternativa sustentable y técnicamente viable para capas granulares.

CONCLUSIONES

El presente estudio permite concluir que el uso de hormigón reciclado como agregado en capas granulares de pavimentos constituye una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable. La investigación confirma que, mediante una adecuada proporción de mezcla con agregados naturales, es posible cumplir determinados requisitos técnicos y alcanzar un desempeño mecánico satisfactorio.

Desde una perspectiva técnica, se evidencia que la dosificación y el control granulométrico son factores clave para garantizar la calidad y estabilidad del material reciclado en su aplicación vial. Esta conclusión, aporta bases para el desarrollo de futuros estudios avanzados orientados a la definición de especificaciones técnicas concretas. Estos estudios, deberán incluir programas experimentales de laboratorio, modelos físicos, pavimentos experimentales a escala real, y orientarse a cubrir el vacío normativo y técnico que limitan su aplicación.

A nivel ambiental, la valorización de residuos de construcción y demolición representa un avance concreto hacia la sostenibilidad del sector, reduciendo la dependencia de recursos naturales y la generación de pasivos ambientales.

Finalmente, se destaca la importancia de profundizar en estudios aplicados que fortalezcan la incorporación progresiva de estos materiales en proyectos reales, sin comprometer la funcionalidad estructural de la infraestructura, especialmente en entornos urbanos, de bajo compromiso estructural, donde su implementación puede resultar estratégica tanto por disponibilidad como por impacto positivo en la economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Investigación y Desarrollo en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones (CIGEF) de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba por brindar el espacio y el apoyo necesario para la realización de este estudio.

Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento al Centro de Desarrollo e Innovación (CDi) de Holcim Argentina y su equipo por facilitar materiales, recursos y antecedentes técnicos fundamentales para el desarrollo experimental de este trabajo.

Agradecemos también a la Planta de Hormigones y a la Planta de Pétreos de Holcim Argentina por la provisión de los materiales utilizados en este estudio, los cuales fueron esenciales para la realización de las pruebas experimentales.

Finalmente, agradecemos al Comité Evaluador del Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente por la aceptación y apoyo en la difusión de este trabajo en el ámbito académico y profesional.

REFERENCIAS

Di Maio, A. A., Giaccio, G. y Zerbino, R. (2002). Hormigón reciclado de calidad. Memoria Trabajos Técnicos, 6, 1-10.

Hansen, T. C. y Narud, H. (1983). Resistencia del hormigón reciclado elaborado a partir de árido grueso de hormigón triturado. Concreto Internacional, 5(1), 79-83.

Hernández, M. B. y Fornasier, G. (2005). Agregados reciclados de concreto. Revista Hormigón, 41, 17-28.

Municipalidad de Córdoba. (s.f.). Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares (PETP). Córdoba, Argentina: Dirección de Infraestructura de la Municipalidad de Córdoba.

Padmini, A. K., Ramamurthy, K. y Mathews, M. S. (2009). Influencia del hormigón base sobre las propiedades del hormigón con áridos reciclados. Materiales de Construcción y Construcción, 23(2), 829-836.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). ASTM D1241-07: Standard Specification for Materials for Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ANALISIS GEOMECÁNICO DE LA INTERFASE FF8S Y FF7, MINA VELADERO

M. Belén Castro[1], M. Gabriela Fuentes[1,2], Catalina P. Verdugo[2,3]
[1]Jefatura de Geotecnia, Gerencia de Servicios Técnicos, Veladero, Argentina.
[2]Área de exploraciones, Gerencia de Exploraciones Argentina-Chile, Minera del Carmen, Argentina.
[3]Jefatura de Planificación, Gerencia de Servicios Técnicos, Veladero, Argentina.
Mail de contacto: mariabelen.castro@veladero.com; maria.fuentes@barrick.com; c.verdugoromo@veladero.com

RESUMEN
Veladero es una mina a cielo abierto de oro y plata, ubicada a 4.000 m s.n.m. en la provincia de San Juan, Argentina, operada como una empresa conjunta entre Barrick y Shandong Gold. Actualmente, la operación cuenta con cuatro fases activas: tres en etapa de pre-stripping y una en producción. Aunque inicialmente se proyectaba su cierre en 2024, nueva información geológica y cambios en variables económicas permitieron extender su vida útil hasta 2030. Las nuevas fases son angostas, de borde y anidadas, con una significativa interacción vertical.
Este trabajo se enfoca en el análisis geomecánico de la interfase entre las fases FF8 y FF7, definida por una pared continua de 400 metros de altura, conformada por bancos dobles de 30 metros, sin rampas ni desacoples intermedios. La pared está condicionada estructuralmente por fallas geológicas y por el contacto entre roca competente y material intensamente alterado tipo *steamheated*, lo que representa un desafío para la estabilidad del talud.
A partir de un abordaje multidisciplinario que incluyó mapeo estructural, simulaciones con software RocFall (Rocscience) y zonificaciones geotécnicas, se evaluaron distintos escenarios de excavación. Se propusieron medidas de mitigación, optimización geométrica de taludes, sostenimiento específico y refuerzo del monitoreo, alineados con el plan de minado 2025.
Este estudio proporciona herramientas clave para la toma de decisiones en contextos de alta complejidad geomecánica como los que presenta Veladero.

Palabras clave: Geomecánica, Interfase de minado, Veladero.

ABSTRACT
Veladero is an open-pit gold and silver mine located at 4,000 meters above sea level in San Juan Province, Argentina, operated as a joint venture between Barrick and Shandong Gold. The operation currently has four active phases: three in the pre-stripping stage and one in production. Although its closure was initially planned for 2024, new geological information and changes in economic variables allowed its mine life to be extended to 2030. The new phases are narrow, edge-to-edge, and nested, with no significant vertical interaction.
This work focuses on the geomechanical analysis of the interface between phases FF8 and FF7, defined by a continuous, 400-meter-high wall comprised of 30-meter-high double benches, with no intermediate ramps or decouplings. The wall is structurally conditioned by geological faults and by the contact between competent rock and intensely altered steam-heated material, which represents a challenge for slope stability.
Using a multidisciplinary approach that included structural mapping, simulations using RocFall software (Rocscience), and geotechnical zoning, different excavation scenarios were evaluated. Mitigation measures, slope geometric optimization, specific support, and enhanced monitoring were proposed, aligned with the 2025 Mining Plan.
This study provides key tools for decision-making in highly geomechanically complex contexts such as those presented by Veladero.

Keywords: Geomechanics, Mining Interface, Veladero.

INTRODUCCIÓN

Este estudio aborda la estabilidad del macizo rocoso en la cresta alta del pit en Mina Veladero, centrando el análisis en la interacción vertical entre la Fase 8 Sur (FF8S) y la Fase 7 (FF7), unidas por una pared continua de más de 400 metros de altura. Dada la ausencia de rampas o desacoples intermedios, y considerando que FF7 es la única fase que provee mineral a la trituradora, la integridad de esta interfase representa un aspecto crítico para la continuidad operativa, Fig. 1.

En mayo de 2024, una voladura en la cresta de FF8S derramó material hacia FF7, generando un cono de aproximadamente 80 kilotoneladas. Este evento impidió la continuidad operativa en la misma línea de fuego, por lo que inicialmente se estableció una

zona de exclusión a 40 metros del pie del último banco. Posteriormente, el 29 de junio de 2024, un bloque de roca de aproximadamente 50 kg cayó desde los bancos superiores a 445 metros de altura, atravesó tres bermas de 2 metros cada una y se proyectó a 51 metros del pie del banco en cota 4.160, recorriendo una distancia horizontal de 170 metros (Fig. 2).

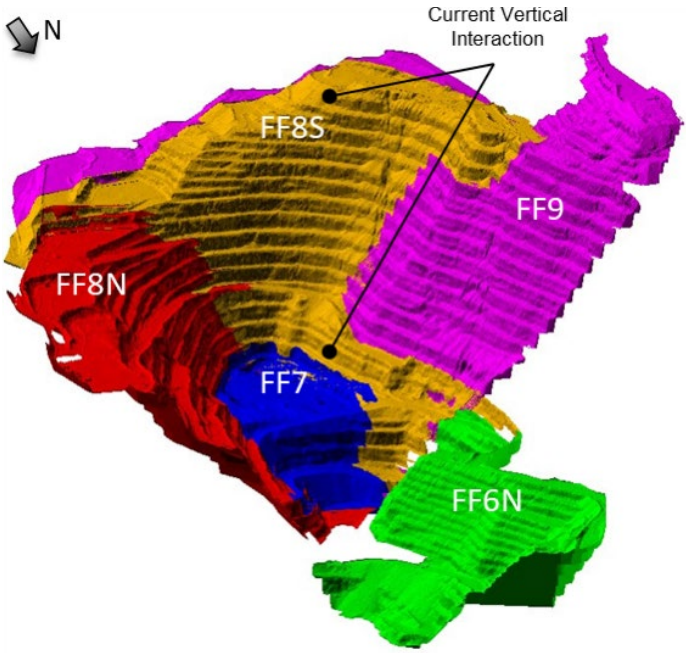


Fig. 1. Fases activas de Mina Veladero. Interacción vertical entre Fase 8 Sur y Fase 7.

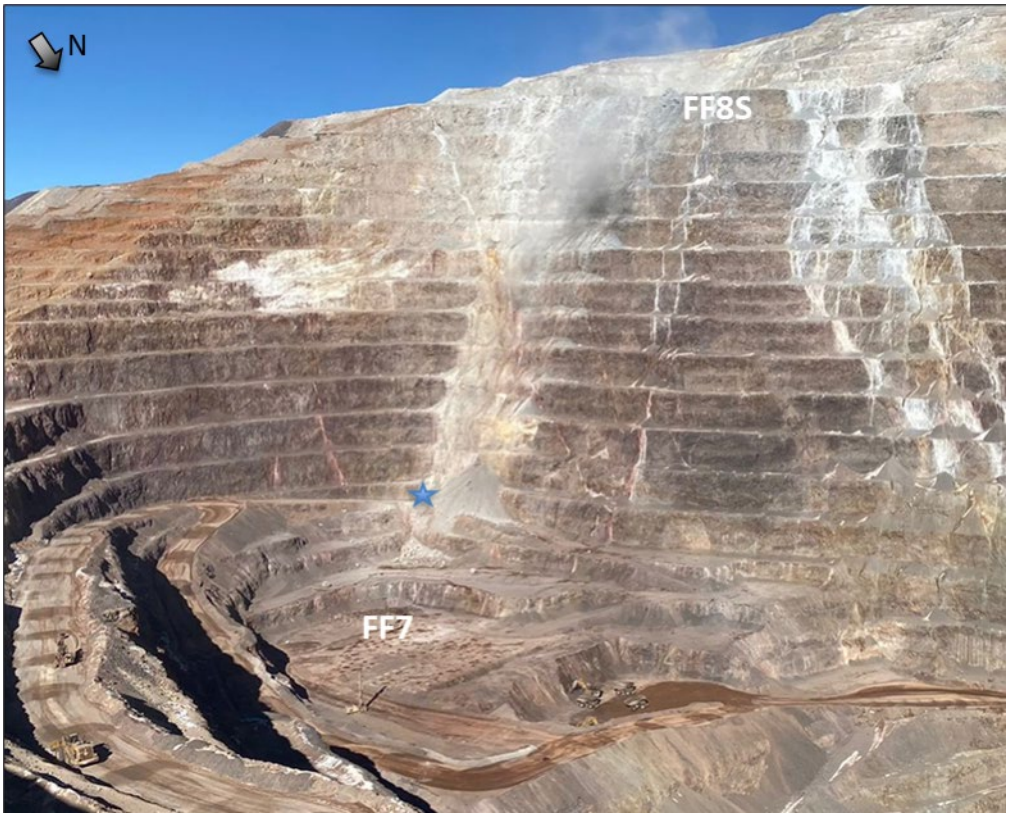


Fig. 2. Una voladura en la cresta de FF8S, que derramó material hacia FF7 y formó un cono de 80 ktn.

Tras este segundo incidente, se detuvieron todas las actividades en las fases FF7 y FF8. A partir de entonces, se implementaron distintas metodologías de análisis y planificación minera. El presente trabajo resume el abordaje multidisciplinario adoptado por el área de Servicios Técnicos, orientado a estandarizar los procesos de minería de crestas y a integrarlos eficazmente en el ciclo de producción, bajo condiciones de seguridad reforzada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo integró metodologías geológicas, geotécnicas y operativas para caracterizar la estabilidad de la cresta:

1. Mapeo geológico estructural, caracterización geotécnica de banco: Se realizaron levantamientos de campo sistemáticos en la zona de cresta, orientados a identificar estructuras relevantes (fallas, fracturas, zonas alteradas) y su relación con el comportamiento mecánico del macizo. Se determinaron parámetros como RQD (Rock Quality Designation), GSI (Geological Strength Index), y factores de fracturamiento, fundamentales para definir el grado de fragmentación esperado y la respuesta del macizo frente a la excavación.

2. Zonificación Geotécnica: consiste en dividir la malla de voladura en zonas con propiedades geotécnicas similares (UGT, RQD, GSI, JC), para ello se debe utilizar las diferentes fuentes de información, las cuales son: sondajes geotécnicos, modelo de bloques de corto plazo, mapeo geológico, mapeo geotécnico, revisiones en terreno, entre otros. La información entregada por este subproceso son sectores agrupados con sus respectivos parámetros geotécnicos, tal como se muestra en la Fig. 3 en que las líneas negras "separan" los diferentes sectores con sus parámetros correspondientes.

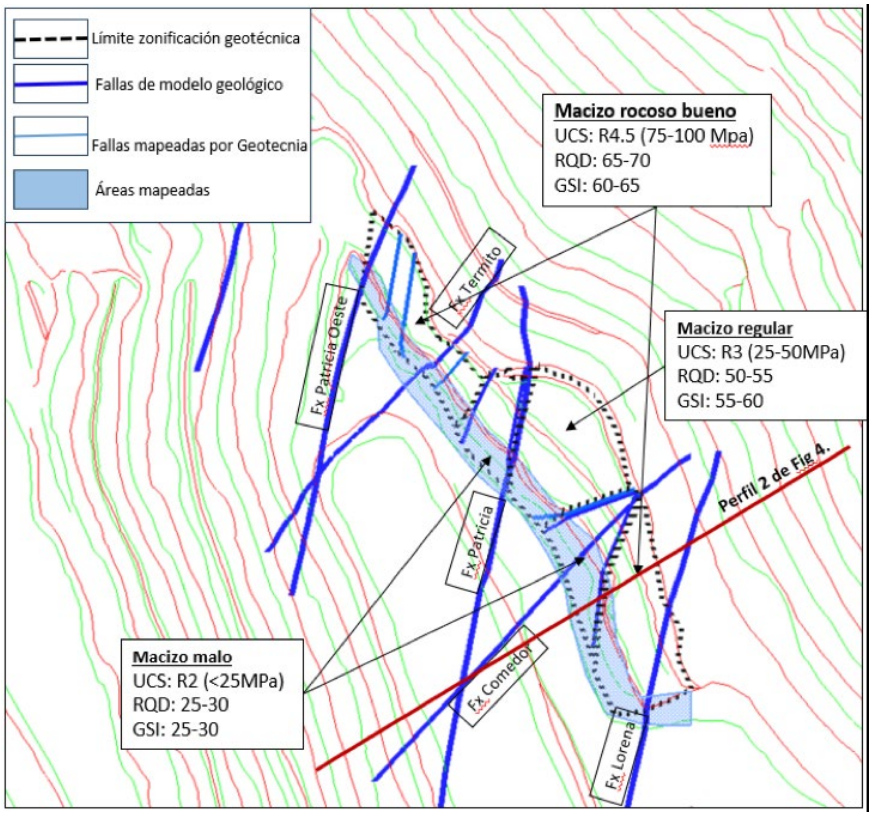


Fig. 3. Planta FF8S cresta. Zonificación Geotécnica. Se indica perfil representativo de Fig. 4

3. Simulaciones de caída de rocas: Para evaluar el comportamiento potencial de bloques desprendidos desde FF8S, se utilizaron simulaciones con el software RocFall (Rocscience), mediante perfiles representativos del talud. Estas simulaciones permitieron modelar trayectorias, velocidades de impacto y rebote, determinando distancias de alcance y zonas críticas de impacto. Como resultado, se establecieron zonas de exclusión mayores a 60 metros desde el pie del último banco, y se diseñaron bermas de 6 metros de altura junto a colchones de material fino para amortiguar posibles desprendimientos (Fig. 4).

4. Diseño y recomendaciones para perforación y voladura: A partir de la zonificación y las simulaciones, el equipo de Geotecnia elaboró recomendaciones específicas para el diseño de las mallas de perforación. Estas recomendaciones incluyeron ajustes en los patrones de perforación, uso de precorte inverso en los extremos de cresta para minimizar derrames, diseño de planos de carguío diferenciados, simulaciones de vibraciones para prever efectos colaterales y validación del protocolo de voladura. Se realizaron también capacitaciones técnicas al personal de carguío y monitoreos previos y posteriores a las voladuras.

5. Monitoreo e instrumentación: El proceso fue complementado por un monitoreo continuo de condiciones estructurales, meteorológicas y operativas, con el objetivo de retroalimentar el diseño y ajustar las medidas preventivas en tiempo real. El monitoreo incluyó revisiones visuales en campo, control de movimiento mediante radar (donde fue posible) y seguimiento de vibraciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de estas metodologías permitió redefinir la estrategia minera en FF7, donde la zona de exclusión inicial abarcaba el

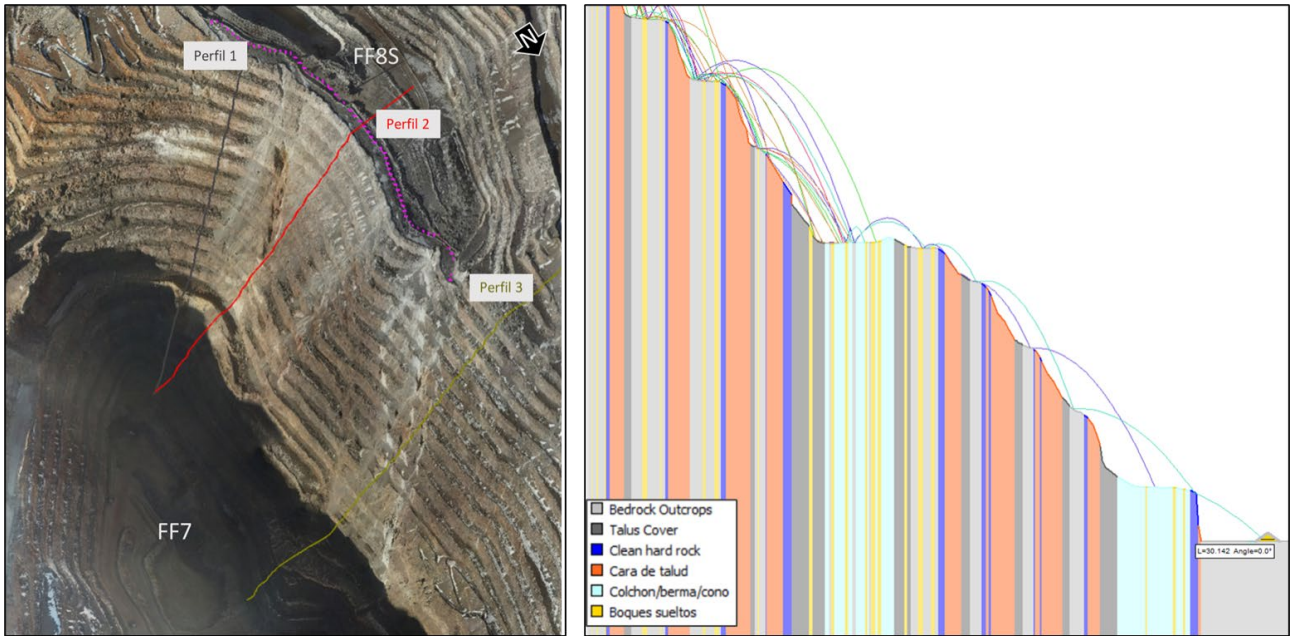


Fig. 4. Análisis de caída de roca de un perfil representativo (perfil 2) en la pared de interacción verti-cal FF8S-FF7. A la derecha interfaz del software RocFall.

50% del área de extracción de alta ley, comprometiendo la estrategia LOM (Life of Mine). Las soluciones incluyeron:

a) Enfoque de Planificación a Largo Plazo

- Zonificación de Bancos en el Plan LOM para minimizar la Interacción Vertical y optimizar la productividad de palas y camiones
- Complemento de retroexcavadora: Para explotar la cresta, el desnivel y las zonas finales de los bancos en los bancos de descreste.
- Mejoras en perforación y voladura: Control de calidad, diámetro más pequeño en el exterior de la cresta: "precorte inverso" para minimizar el derrame de material. Aprobación estricta del patio de perforación.

b) Enfoque de Planificación a Corto Plazo.

- Se estableció una limpieza de cresta estandarizada.
- Extracción de los últimos 10 m de cresta utilizando únicamente retroexcavadoras.
- Sistema de amortiguación de material de berma.
- Limpieza de bloques sueltos con excavadoras de brazo largo y bulldozer con cadena (cresta de 600 m de largo).
- Extracción de conos utilizando medidas de seguridad estandarizadas: monitoreo meteorológico y del viento, personal de seguridad capacitado.
- Prohibición de tránsito cerca de la cresta (30 m).
- Análisis y monitoreo geotécnico continuo.

CONCLUSIONES

El modelado de la interacción vertical en el presupuesto y la vida útil de la mina (LOM) se completó con éxito, minimizando los riesgos asociados con seguridad y cumplimiento espacial.

Se estableció una comunicación multidisciplinaria eficaz entre los equipos técnicos de la mina, operaciones y mantenimiento.

Se estandarizaron los procesos de trabajo de minería de cresta y se integraron en el ciclo de producción.

Se obtiene una disminución en un 50% del tiempo de ciclo de minado de cresta respecto al primer plan ejecutado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Gerencia General de Mina Veladero por confiar en el equipo de Geotecnia y priorizar la seguridad operativa. Asimismo, al Gerente del área de Servicios Técnicos por fomentar la integración de equipos y respaldar la aplicación de criterios geotécnicos.

Finalmente, un reconocimiento especial a los operadores, cuya responsabilidad y compromiso han sido fundamentales para implementar con éxito las medidas de mitigación propuestas, recordando siempre que el objetivo es retornar seguros a casa cada día.

CRITERIOS DE PROYECTO PARA EL ESTUDIO DEL CONFINAMIENTO GEOESTÁTICO E HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE CARGA 1 DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LAS PLACETAS, REPÚBLICA DOMINICANA

Rodrigo J. Contreras[1], Mauricio Giambastiani[1], Rafael Marques Cardoso[1]
[1]Intertechne Consultores S.A, Av. Iguaçu 100, Curitiba, Brasil
Mail de contacto: rjc@inttpartner.com.br

RESUMEN

El proyecto hidroeléctrico Las Placetas, situado en República Dominicana, aprovechará las aguas de los ríos Jagua y Bao para la generación hidroeléctrica, aportando 204 MW al sistema interconectado del país. El esquema del proyecto comprende tres presas de hormigón compactado con rodillo y dos circuitos de generación subterráneos.

Con foco en los conceptos de diseño del Túnel de Carga 1 (TC1), como túnel presurizado, las excavaciones subterráneas previstas combinan las metodologías tradicional Drill & Blast y mecanizada con TBM.

La condición de operación presurizada del TC1 exigió realizar el estudio de coberturas para la evaluación de las necesidades de blindaje combinado con una evaluación de las potenciales pérdidas por filtración en los tramos críticos del circuito.

En este contexto, el trabajo describe los estudios desarrollados para la verificación del confinamiento geo-estático e hidráulico del TC1, la estimación del estado de tensiones in-situ en la masa rocosa, los estudios empíricos de verificación contra hidrogateo, y los estudios analíticos y numéricos de pérdidas a través del macizo.

El estudio permitió demostrar que, bajo las premisas de diseño adoptadas, el TC1 no presenta tramos vulnerables a hidrogateo y que las pérdidas por filtración a través del macizo se encuentran en rangos aceptables. Las informaciones obtenidas de los ensayos de hidrogateo previstos para determinar el coeficiente K0, permitirán confirmar o re-evaluar las conclusiones del presente estudio.

Palabras clave: confinamiento geo-estático, confinamiento hidráulico, coeficiente K0.

ABSTRACT

The Las Placetas hydroelectric project, located in the Dominican Republic, will use the waters of the Jagua and Bao rivers for hydroelectric generation, contributing 204 MW to the country's interconnected system. The project layout comprises three roller-compacted concrete dams—and two underground independent generation circuits.

Focusing on the design concepts of pressure Tunnel 1 (TC1), as a pressurized tunnel, the planned underground excavations combine traditional Drill & Blast methods with mechanized excavation using a Tunnel Boring Machine.

The pressurized operating condition of TC1 required a cover study to assess the need for lining, combined with an analysis to evaluate leakage losses in the critical sections of the circuit.

In this context, the work describes the studies carried out to verify the geostatic and hydraulic confinement of TC1; estimation of the in-situ stress state in the rock mass; empirical studies for hydrojacking verification; and analytical and numerical studies of infiltration through the rock mass.

The study demonstrated that, under the adopted design assumptions, the TC1 design does not present sections vulnerable to hydrojacking and that leakage losses through the rock mass are within acceptable ranges. The information obtained from the hydrojacking tests to determine the K0 coefficient will help to confirm or re-evaluate the conclusions of this study.

Keywords: geo-static confinement, hydraulic confinement, K0 coefficient.

INTRODUCCIÓN

El trazado del Túnel de Carga 1 (TC1), cruza cinco litologías diferentes: esquistos y anfibolitas del Completo Duarte, las dioritas y tonalitas del Batolito de Bao y una zona de contacto (Fig. 1). El túnel tendrá sección arco-herradura de 5,60 m de diámetro en los tramos excavados con el método Drill & Blast y sección circular de 5,20 m en el tramo excavado con TBM. La longitud desde la Obra de Toma hasta la Casa de Máquinas es de 7.880 m, de los cuales aproximadamente 6000 m serán excavados con TBM.

La cobertura de roca en el TC1 varía entre los 60 m y los 220 m. El nivel freático a lo largo del trazado se estimó a unos 20 m

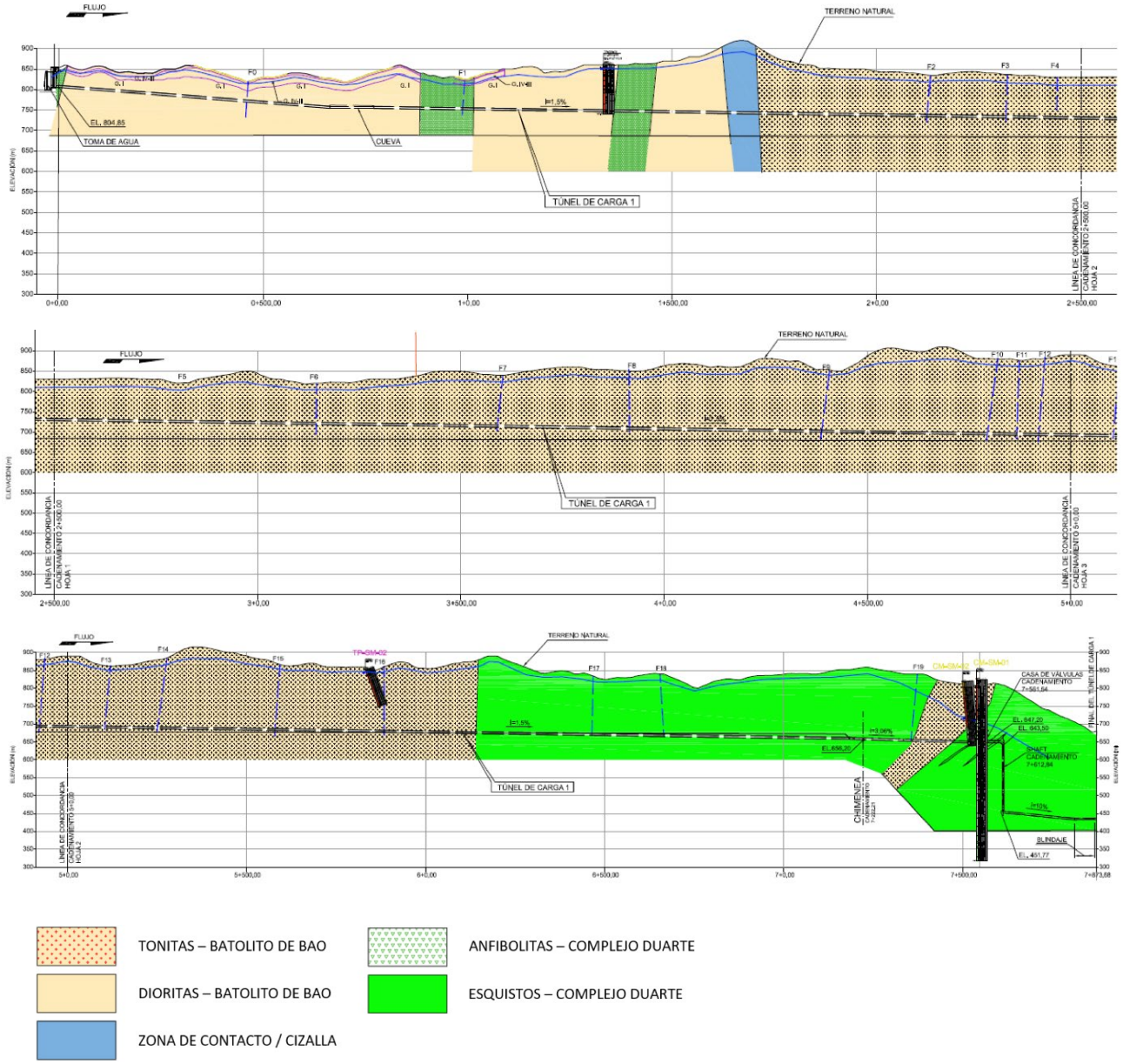


Fig. 1. Perfil geológico del Túnel de Carga 1. Intertechne (2024).

por debajo del nivel del terreno, por lo que las máximas presiones externas previstas durante la construcción alcanzan los 180 m de carga. La presión interna máxima de operación será de aproximadamente 190 m establecida por el nivel del embalse de la Presa Los Limones (NAMO 836m).

En este contexto, para garantizar el correcto comportamiento del TC1 se requirió: a) verificar el confinamiento geo-estático para identificar los tramos que requieren blindaje; b) identificar los tramos con falta de confinamiento hidráulico y c) estimar las pérdidas del circuito. A continuación, se describen los métodos de análisis utilizados en cada verificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de las coberturas mínimas necesarias y la definición de las longitudes necesarias de blindaje del TC1 se realizó considerando el Criterios Snowy Mountain descrito a continuación.

Criterio Snowy Mountain, EPRI (1987): La verificación de la cobertura busca establecer el confinamiento mínimo vertical y lateral necesario de la roca en el entorno del Túnel de Carga para garantizar el correcto comportamiento del macizo rocoso frente a las cargas impuestas por la presión interna de operación.

$$H_{rm} \geq \frac{H_e \cdot \gamma_w}{\gamma_r} . FS$$

La cobertura mínima de roca se calcula como (Fig. 2):

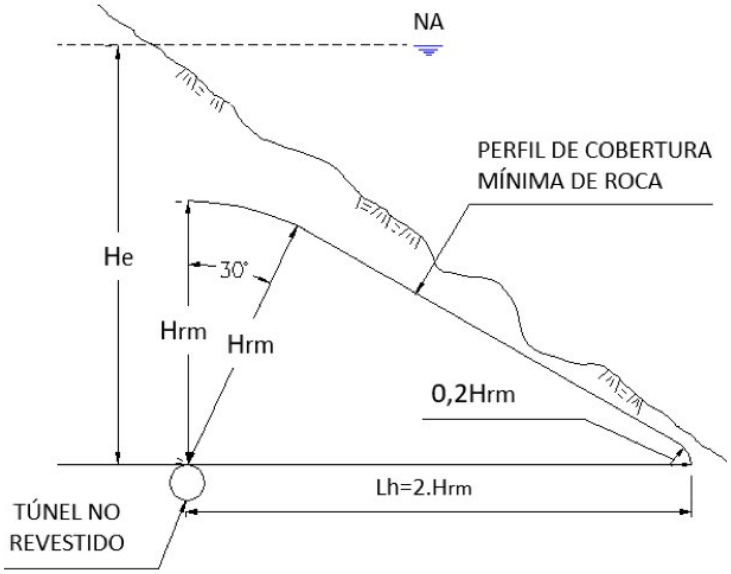


Fig. 2. Critério empírico de cobertura Snowy Mountains. EPRI (1987).

Siendo:
H_{rm}: altura de la columna de roca, en m.
H_e: carga estática interna en el túnel, en m.
γ_w y γ_r: peso específico del agua y del macizo rocoso respectivamente, en kN/m³.
FS: factor de seguridad adoptado.
El análisis de confinamiento hidráulico y estimación de fugas desde el circuito se realizó siguiendo un abordaje analítico, con el método de Fernández (1994), y uno numérico con el programa RS2 (Rocscience).

Método de Fernández (1994): para una masa isotrópica y homogénea, la magnitud de la fuga desde el túnel y la distribución de la presión de poros en el macizo rocoso alrededor de la excavación se pueden aproximar utilizando el método "image well" (Hart, 1962), para evaluar el flujo entre dos pozos, una fuente y un sumidero, de igual potencia. El túnel presurizado se puede considerar como una fuente ubicada a una distancia L del centro de un sumidero de imagen especular como se muestra en la Figura 3.

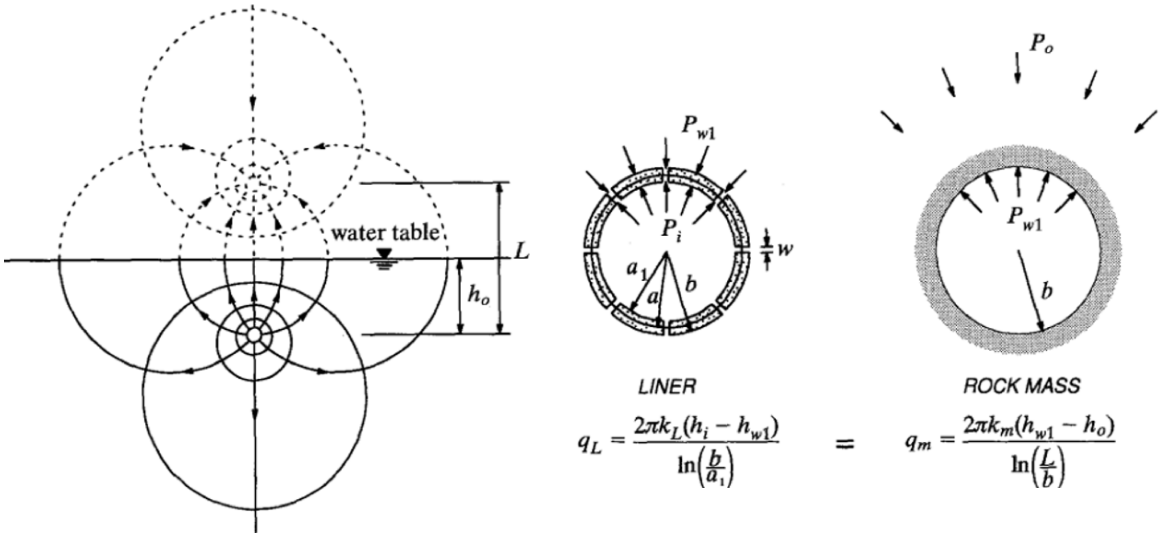


Fig. 3. Modelo hidráulico para la estimación de la tasa de fuga de un túnel. Fernández (1994).

Modelación numérica en RS2 de Rocscience: el abordaje numérico permitió considerar en el análisis el perfil topográfico, la geometría de las excavaciones y la posición del nivel freático estimada en la región. Se utilizó la opción de análisis de elementos finitos con régimen permanente de nivel de agua y se modeló como Total Head (H) la condición de contorno dada por la elevación del nivel

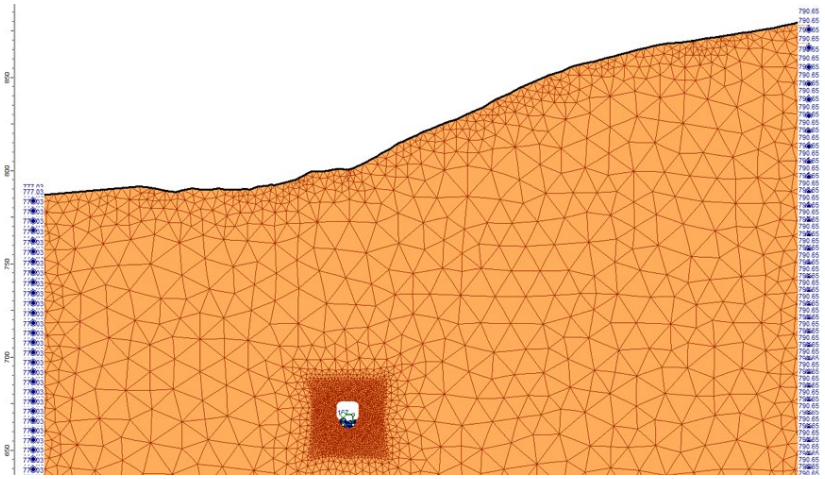


Fig. 4. Condiciones de contorno hidráulicas en RS2 de la Sección, progresiva 6+671.

freático. La presión interna dentro del túnel se simuló como Pressure Head (PH) considerando la distancia entre el eje del túnel y el nivel del embalse. La Fig. 4 muestra el modelo adoptado en una de las secciones de análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siendo conocidas las elevaciones del túnel, las cargas hidráulicas y las coberturas de roca en cada sitio (Fig. 1), fue posible calcular el factor de seguridad FS resultante para las condiciones de operación con NAMO del embalse Los Limones (836m), siguiendo el *Criterio Snowy Mountain.*

Del estudio del perfil geológico se han identificado diez zonas de interés para el análisis

La Tabla 1 resume los parámetros de entrada de cada tramo y los Factores de Seguridad alcanzados bajos las condiciones de cobertura natural vertical y lateral.

TRAMO		CONDICIONES DE OPERACIÓN NAMO			CRITERIO DE COBERTURA MÍNIMA					COBERTURA LOCAL		FACTORES SEGURIDAD	
		El Bóveda-Túnel	El NAMO	H_e, m	γ_w, kN/m^3	γ_r, kN/m^3	H_{rm}, m	L_h, m	r_h, m	H_{roca}, m	L_{roca}, m	FS Vert.	FS Lat.
TC1	0+0,00	810,50	836,0	25,50	10	30	8,5	17,0	1,70	33,0	85,1	3,88	5,01
	0+228,5	792,80	836,0	43,20	10	28	15,4	30,9	3,09	30,5	135,6	1,98	4,39
	0+464,0	774,60	836,0	61,40	10	28	21,9	43,9	4,39	33,4	142,3	1,52	3,24
	0+698,0	762,20	836,0	73,80	10	28	26,4	52,7	5,27	47,5	143,4	1,80	2,72
	0+993,0	755,90	836,0	80,10	10	30	26,7	53,4	5,34	59,2	173,9	2,22	3,26
	2+390,0	734,80	836,0	101,20	10	27	37,5	75,0	7,50	78,9	163,3	2,11	2,18
	3+375,0	720,00	836,0	116,00	10	27	43,0	85,9	8,59	95,1	167,9	2,21	1,95
	6+761,0	669,20	836,0	166,80	10	30	55,6	111,2	11,12	111,5	166,3	2,01	1,50
	7+613,0	654,20	836,0	181,80	10	30	60,6	121,2	12,12	134,0	186,6	2,21	1,54
	7+877,0	437,20	836,0	398,80	10	30	132,9	265,9	26,59	240,4	341,8	1,81	1,29

Tabla 1. FS obtenidos aplicando el Criterio de cobertura Snowy Mountain para operación con NAMO.

Los resultados obtenidos indican que no es necesario blindar ningún tramo del Túnel de Carga 1 por razones de falta de cobertura.

Por su parte, el estudio de cobertura hidráulica y estimación de pérdidas del circuito se centró en las zonas de falla de previsible mayor permeabilidad. Los tramos donde se espera que la presión interna supere la presión externa, de menor confinamiento hidráulico, ocurre en las Progr. 0+464, 2+390 y 6+671, asociadas a las Falla F0 a F7, F17 y F18. Las premisas de análisis fueron:

- Macizo rocoso con permeabilidad de 20 UL (2.10-4 cm/s) para la clase V (núcleo de la falla) y 10 UL (1.10-4 cm/s) para la clase IV (adyacente a la zona de núcleo);
- El espesor de la clase V es de 5m y el de la clase IV de 10m;
- El macizo rocoso se considera homogéneo e isotrópico mecánica e hidráulicamente;
- Se desconsideró la permeabilidad del revestimiento secundario.
- Las condiciones de confinamiento del túnel son adecuadas para impedir hidrojacking del macizo rocoso circundante.
- Radio del túnel = 2,8m

La Tabla 2 presenta los parámetros de entrada al método y el caudal de fuga total estimado con el método de Fernández (1994).

TRAMO	ALTURA NIVEL FREÁTICO H_0 (M)	PRESIÓN INTERNA H_{W1} (M)	L (M)	CAUDAL POR TRAMOS L/S	CAUDAL DE FUGA TOTAL L/S
0+464	39,6	61,4	79,2	6,9	9,1
2+390	78,9	104,9	157,8	0,9	
6+671	124,1	167	248,2	1,3	

Tabla 2. Caudales de fuga estimados. Fernández (1994).

TRAMO	CAUDAL POR TRAMOS L/S	CAUDAL DE FUGA TOTAL L/S
0+464	3,5	5,4
2+390	0,6	
6+671	1,2	

Tabla 3. Caudales de fuga estimados. RS2 (Rocscience).

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos a partir de los modelos numéricos en RS2 de Rocscience.

Los resultados con ambos métodos muestran que las fugas estimadas se encuentran en el rango de entre 5 l/s y 10 l/s en todo el TC1, considerado consistente con la permeabilidad global del macizo y con las cargas de operación del circuito.

CONCLUSIONES

Dado que en todos los casos analizados se han calculado FS mayores al mínimo de 1,30 recomendado por las referencias internacionales, USACE (1997), puede concluirse que, a partir de las informaciones actualmente disponibles, los criterios empíricos de verificación de cobertura a lo largo del trazado del túnel se satisfacen. Este resultado indica que el riesgo de hidrofracturar el macizo durante la puesta en carga y operación del circuito es despreciable y por lo tanto no es necesario reforzar con blindaje ningún de tramo del TC1.

En términos generales los criterios empíricos aplicados consideran los principales factores físicos intervinientes (presión hidrostática en el túnel, densidad de la roca, morfología del terreno, profundidad, gradientes hidráulicos), sin embargo, los resultados obtenidos deben ser considerados como una evaluación inicial dado que no pueden capturar los detalles geológicos menores que puedan presentarse de manera local. Los criterios empíricos no reflejan totalmente el efecto de los agentes geológicos sobre las características locales del macizo rocoso tales como la erosión y el tectonismo que afectan a las tensiones *in situ* del macizo. El estado tensional natural controla la abertura de las fracturas de la roca bajo la acción de la presión interna del túnel determinando así la estanqueidad del macizo y la necesidad (o no) de blindar el túnel para evitar fugas de agua, erosiones, etc.

El criterio empírico de confinamiento deberá ser verificados mediante la realización de ensayos de hidrogateo en sondeos exploratorios, (Kanji, 1998), a través de los cuales la tensión mínima *in situ* del macizo rocoso puede verificarse de forma directa y bajo las condiciones locales.

Los estudios de confinamiento hidráulico para la estimación de fugas desde el circuito mostraron que las magnitudes de caudales de fuga son aceptables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la Empresa de Generación Hidroeléctrica Dominicana (EGEHID) y a la empresa Andrade Gutiérrez por permitir la divulgación de los datos y resultados.

REFERENCIAS

EPRI, Electric Power Research Institute (1987), Design Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts, Research Project 1745-17, Final Report, Palo Alto, EUA.

Fernandez, G. (1994). Behavior of pressure tunnels and guidelines for liner design. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 10, October 1994.

US Army Corps of Engineers (1997), Tunnels and Shafts in Rock – Engineering and Design, Manual No. 1110-2-2901, Washington D.C., EUA.

Benson, R. P. (1988), Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels, International Symposium on Tunneling for Water Resources and Power Projects, Nova Delhi, India.

Kanji, M. A. (1998), Experiences with Hydro-Jacking Tests for the State of Stress Determination in Jointed Rock Masses, Proceedings of the 5th South American Conference on Rock Mechanics, Design and Construction in Mining, Petroleum and Civil Engineering, Santos, Brasil, pp. 99-105.

Sheorey P. R. (1994). A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. Vol. 31, No 1, pp. 23-34.

VARIACIONES EN EL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL TERRENO EN FUNCIÓN DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS EXTRAORDINARIOS Y SUS CONSECUENCIAS EN EL SECTOR SUDESTE DE LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Claudina Di Martino[1,2,3], Lenís Madsen[1,2] Juan Manuel Giorgi[1,2]
[1]Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253 - Cuerpo B´. Piso 2º (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[2]Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires - Universidad Nacional del Sur). San Juan 670 (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[3]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: claudina.dimartino@uns.edu.ar

RESUMEN
El contexto actual del cambio climático trae aparejadas variaciones en los patrones normales de precipitaciones con eventos lluviosos extraordinarios cada vez más frecuentes. Estos cambios impactan directamente en la humedad del suelo y, en consecuencia, en el comportamiento geotécnico del terreno. En el sudeste de la ciudad de Bahía Blanca, se han detectado patologías constructivas en viviendas asociadas a estas condiciones, por lo que surge la necesidad de un abordaje integral de los parámetros geológicos, climáticos, ingenieriles y antrópicos. El objetivo de esta investigación aplicada es evaluar la variación en la respuesta geotécnica asociada a los cambios de humedad del suelo, con el fin de caracterizar el terreno para anticipar riesgos geológicos. Para ello se realizaron ensayos in situ como tomografías de resistividad eléctrica y penetrómetro de cono dinámico, a fin de correlacionar sus resultados con los parámetros estudiados. Además, se efectuó una caracterización geomorfológica, el relevamiento de viviendas y obras afectadas, y la identificación de las patologías vinculadas a las condiciones del subsuelo. En el contexto de expansión urbana que atraviesa Bahía Blanca, este estudio busca aportar herramientas técnicas que orienten una planificación territorial sostenible.

Palabras clave: urbanización, eventos pluviométricos extraordinarios, respuesta geotécnica.

ABSTRACT
The current context of climate change brings with it variations in normal precipitation patterns, with increasingly frequent extraordinary rainfall events. These changes directly impact soil moisture and, consequently, the geotechnical behavior of the terrain. In the southeast of the city of Bahía Blanca, construction pathologies associated with these conditions have been detected in homes, raising the need for a comprehensive approach to geological, climatic, engineering, and anthropogenic parameters. The objective of this applied research is to evaluate the variation in the geotechnical response associated with changes in soil moisture, in order to characterize the terrain and anticipate geological risks. To this end, in situ tests such as electrical resistivity tomography and dynamic cone penetrometer were performed to correlate their results with the parameters studied. In addition, a geomorphological characterization was carried out, along with a survey of affected homes and structures, and the identification of pathologies linked to subsoil conditions. In the context of urban expansion in Bahía Blanca, this study seeks to provide technical tools to guide sustainable territorial planning.

Keywords: urbanization, extraordinary rainfall events, geotechnical response.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la Geología Aplicada esta investigación busca generar información relevante para abordar problemáticas ambientales e ingenieriles derivadas de la interacción entre la geología, las obras y las actividades humanas. Asimismo, se propone contribuir a la predicción y mitigación de riesgos, promoviendo un ordenamiento territorial racional. Particularmente en zonas periféricas, la expansión urbana, suele llevarse a cabo sin un planeamiento adecuado. La ciudad de Bahía Blanca, no escapa a esta problemática: su crecimiento urbano se ha desarrollado de modo disperso y con baja densidad, provocando la ocupación de los suelos inestables. Esto ha dado lugar a la expansión de la urbe sobre suelos colapsables, expansibles y zonas inundables, generando daños tanto en las viviendas como en obras de infraestructuras, incluyendo caminos pavimentados y vecinales. Estas patologías detectadas, se

manifiestan con mayor intensidad en función de la alternancia climática característica del área de estudio, especialmente durante las estaciones húmedas y secas. Ante esta problemática, se llevó a cabo el relevamiento de obras y la realización de ensayos geotécnicos para ambos períodos climáticos en diferentes sitios (Figura 1). El objetivo del presente trabajo es corroborar que la expansión urbana sin planificación adecuada en el área de estudio ocasionó impactos significativos en las obras. Por otro lado, se busca comparar la respuesta geotécnica del terreno mediante el relevamientos de campo y ensayos in situ, realizados en estaciones climáticas contrastantes, una seca y otra húmeda, y así vincular los resultados obtenidos con el contenido de agua en el suelo, la litología, las unidades geomorfológicas y las intensidad de las patologías observadas.



Fig. 1. Ubicación de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE).

ZONA DE ESTUDIO

La localidad de Bahía Blanca se encuentra en el sector Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, ubicada a los 38° 44' Latitud Sur y 62° 16' Longitud Oeste, sobre la costa del océano Atlántico. El área de estudio se ubica en el sector Sudeste de la localidad, sobre la RN N°3 y a unos 6 Km hacia el Norte del estuario de Bahía Blanca, abarcando un área aproximada de 10 km^2 (Figura 1). Involucra los barrios oficiales: Grünbein, B. Palermo, y los Barrios no oficiales: Portal de Este, Punta Blanca y Villa Elena. Todos ellos poseen calles sin asfaltar cuyo trazado se da en el sentido de máxima pendiente del sector (norte-sur). Las vías de acceso pavimentadas que unen los barrios son: Calle Rafael obligado, RN n°3 y la RN n°229.

CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA

La ciudad de Bahía Blanca se encuentra en una región de clima templado, con temperaturas medias anuales entre 14°C y 20°C y estaciones térmicas bien diferenciadas (Capelli de Steffens et al., 2006). La precipitación media anual es de 650mm (Campo de Ferreras et al., 2004) con valores históricos máximos y mínimos de 1.093mm en 1976 y 207mm en 1861, respectivamente. En años normales, la concentración de lluvias en esta región se produce durante dos estaciones bien definidas: otoño y primavera, sigue una estación seca a fines de invierno y otra semiseca en verano, con alta evapotranspiración. No obstante, en las últimas décadas se ha registrado una tendencia hacia una mayor humedad, con eventos pluviométricos extraordinarios cada vez más frecuentes. Estos cambios han derivado en una transición climática de carácter semiárido (Bs) a subtropical húmedo (Cfa), según la clasificación de Köpen (1936), con temperatura media anual de 25,5 °C, precipitación total anual es >620 mm y una humedad media anual: 57% (Servicio Meteorológico Nacional). En respuesta a estos cambios, los eventos pluviométrico extraordinarios (gran milimetraje en poco tiempo) traen aparejados grandes consecuencias en el medio, sumado a la falta de planificación urbana en función al uso de los suelos.

Desde el punto de vista geomorfológico, el área presenta una variación altimétrica entre los 5 y los 80 msnm en sentido norte-sur. Al norte se extiende una peniplanicie, con pendientes suaves (0–2 %) que transiciona hacia una zona de fuerte pendiente (6–8 %), donde se desarrolla un coluvio-aluvio entre las cotas 60 y 20 m. Esta zona da origen al desarrollo de conos aluviales de gran extensión (pendientes de 2-6%), que conectan topográficamente con la planicie aluvial, desarrollada por debajo de los 20 m s.n.m., y que finalmente desemboca en la llanura de marea emergida (Caló et al., 1999). Cada una de esas unidades geomorfológicas está asociada a distintas formaciones geológicas. La llanura de marea corresponde a la Fm. Maldonado constituida por arenas, arcillas con porcentajes variables de smectitas y limos de origen lagunar y sedimentos biogénicos (Fm. Las Escobas). Estos depósitos se extienden hasta la peniplanicie, Fm. Pampiano, compuesta por limos loessoides con depósitos de calcáreos ("tosca"). Entre ambas se sitúa la unidad de faldeo, compuesta por coluvio-aluvio que conecta las zonas elevadas con la llanura costera. En esta transición se desarrolla el cono aluvial, compuesto por sedimentos arenosos, limosos, gravas cuarcíticas, "tosca" recementada y depósitos eólicos limosos y arenosos, correspondientes a la Formación Bahía Blanca (Caló et al., 1998). El perfil A–A' se encuentra en la llanura

de marea emergida, mientras que el B–B' se ubica en la planicie aluvial (Figura 1). En cuanto al comportamiento hidrogeológico, el escurrimiento superficial responde al relieve, fluyendo hacia los sectores de menor altura. Naturalmente la superficie freática tiende a copiar el perfil topográfico, en la zona de planicie se ubica a profundidades cercanas a los de 15 m aproximadamente, siempre que no existan niveles impermeables interrumpan la percolación y generen niveles "colgados". En sectores de menor pendiente, donde el gradiente hidráulico es bajo, el nivel freático se localiza a profundidades más someras, en torno a los 3 m. Las arcillas presentes en estas geoformas, facilitan el ascenso capilar del agua hacia la superficie. Estas condiciones hacen que los sectores bajos se comporten como zonas de descarga local del acuífero (Di Martino et al., 2022)

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cuatro tomografías de resistividad eléctrica (TRE), distribuidas equitativamente entre los períodos seco y húmedo, con el objetivo de obtener imágenes bidimensionales del subsuelo que permitieran caracterizar los materiales según sus propiedades eléctricas. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un resistivímetro automático modelo ARES (GF Instruments), equipado con 48 electrodos distribuidos a intervalos regulares de hasta 3 m. El arreglo electródico empleado fue del tipo Wenner Alpha, con una longitud total de progresiva de 141 m, lo que permitió alcanzar profundidades de exploración del orden de los 25 a 28 m.

En gabinete, los datos de campo fueron procesados e interpretados mediante el software Res2Dinv (Loke, 2004), el cual aplica algoritmos de inversión que transforman las resistividades aparentes en un modelo de resistividades verdaderas, representado gráficamente como una imagen de resistividad eléctrica (IRE).

Para la parametrización del método, se seleccionó una de las TRE y se complementó con ensayos in situ, como el penetrómetro de cono dinámico y pala hélix, que permitieron identificar la litología del subsuelo, permitiendo asignar significación geológica e hidrogeológica a los valores de resistividad obtenidos, fortaleciendo la interpretación de la estructura y comportamiento hidráulico de los materiales. En paralelo se realizó un relevamiento del área, identificando patologías en las viviendas y procesos de acarcavamiento en caminos vecinales, a fin de vincular las condiciones del subsuelo con los daños observados en superficie.

RESULTADOS

Se realizaron cuatro TRE con orientación noreste-suroeste (NE–SO), distribuidas entre los períodos seco y húmedo. La TRE A–A' se ejecutó en el sector topográficamente más bajo del área de estudio (7 m s.n.m.), mientras que la TRE B–B' se llevó a cabo en el punto más elevado (19 m s.n.m.). Ambas tuvieron una extensión de 141 m y profundidades de detección entre 25 y 28 m (Figura 1).

Durante el período seco, las IRE procesadas (Figuras 2 y 3) muestran que, en la TRE A–A' las resistividades varían entre 2 y 40 Ω.m. Se observa una disminución progresiva de la resistividad con la profundidad, con un cambio más abrupto en torno a los 8 m, lo que sugiere el inicio de la zona saturada. En la zona no saturada, se registran resistividades más elevadas en el sector noreste, mientras que hacia el suroeste los valores disminuyen. Esta variación podría estar relacionada con una pérdida de agua domiciliaria detectada aproximadamente a los 50 m de la progresiva, la cual habría generado un aumento de humedad superficial localizada.

En la TRE B–B', situada 16 m por encima de la A–A', los valores de resistividad se encuentran entre 2 y 14 Ω.m, lo que indica una menor variabilidad. Bajo una capa superficial de resistividad elevada, atribuida al camino donde se realizó la medición, se detectó un nivel altamente conductivo, interpretado como una capa arcillosa con cierto grado de humedad. Entre los 6 y 8 m de profundidad, las resistividades aumentan, lo que sugiere un cambio hacia litologías de mayor granulometría, posiblemente limosos. Finalmente, entre los 23 y 24 m se observa una disminución de los valores de resistividad, lo que indicaría el inicio de la zona saturada.

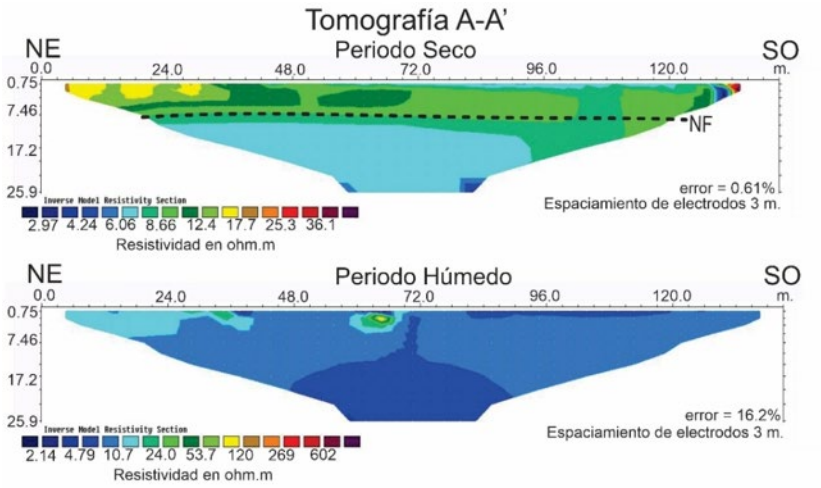


Fig. 2. Imágenes de Resistividad eléctrica obtenidas a partir del procesamiento de las TRE realizadas durante el periodo húmedo y el período seco en el perfil A-A´.

Durante el período húmedo (Figuras 2 y 3), la TRE A–A' presenta un rango de resistividades que oscilan entre 2 y 700 Ω.m, con un error de inversión del 16,2 %, valor elevado para este tipo de metodología. Esta anomalía se atribuye a la alta saturación del terreno al momento de la medición. No obstante, la imagen obtenida permite evidenciar un sustrato prácticamente saturado en toda su extensión.

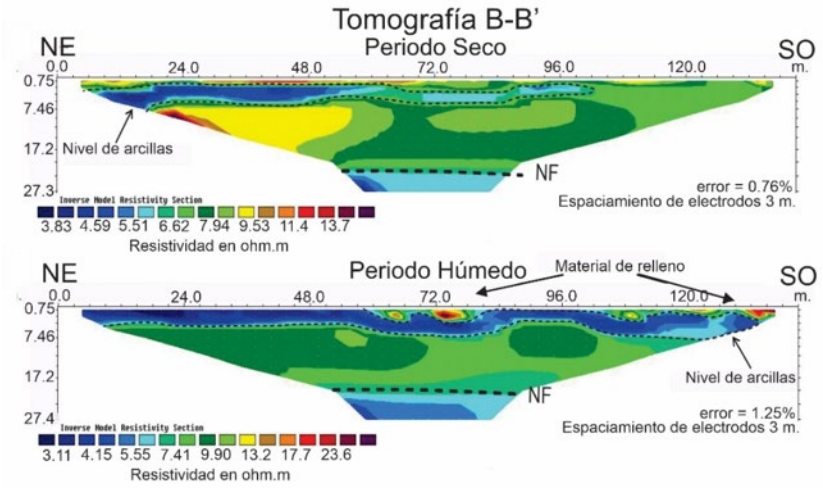


Fig. 3. Imágenes de Resistividad eléctrica obtenidas a partir del procesamiento de las TRE realizadas durante el período húmedo y el período seco en el perfil B-B´.

En cuanto a TRE B–B', realizada en el mismo perfil que en el período seco, se registraron resistividades entre 2 y 24 Ω.m. El aumento del límite superior respecto al período anterior se asocia a la presencia de material de relleno (arena y tosca) utilizado para reparar cárcavas formadas sobre el camino tras la inundación del 7 de marzo. En esta medición, el nivel arcilloso muestra una mayor extensión, posiblemente debido al incremento en el contenido de humedad y al comportamiento hidráulico característico de las arcillas, facilitando su detección mediante métodos geofísicos.

Asimismo, el contraste litológico entre los 6 y 8 m de profundidad se evidencia con mayor claridad. Finalmente, el nivel freático fue identificado a una profundidad cercana a los 20 m.

CONSIDERACIONES FINALES

- Se comprobó que la variación en el contenido de humedad en el suelo condiciona el comportamiento geotécnico de los materiales presentes en el área. Este efecto se manifiesta tanto de los materiales finos, que presentan cambios de volumen (expansión y contracción), como en materiales gruesos susceptibles al colapso.
- Se verificó un aumento del nivel freático durante el período húmedo en comparación con el período seco. La variación fue más marcada en el perfil A-A´, donde el nivel freático llegó a aflorar, mientras que en el perfil B–B' se registró un ascenso aproximado de 3m.
- En el período húmedo se observó un incremento notable de las patologías constructivas, incluyendo una mayor cantidad de rajaduras en viviendas y un acentuado proceso de acarcavamiento en caminos vecinales.
- El sector del perfil A–A' presenta una mayor vulnerabilidad geotécnica e hidrológica atribuible a: una mayor cantidad de arcilla expansiva, mayor humedad, proximidad del nivel freático y su ubicación topográfica más baja, dentro de una zona potencialmente inundable (llanura de marea).
- La eficiencia del método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) quedó demostrada para aplicaciones geotécnicas y en la identificación de problemáticas geológico-ingenieriles. Este método permitió visualizar variaciones en la resistividad del subsuelo asociadas a cambios litológicos y de humedad.
- Mediante el uso del penetrómetro y la Pala Hélix se corroboro la existencia de arcilla identificada en la TRE B-B´.
- Se verificó una clara correspondencia entre los resultados del método indirecto (TRE) y los datos obtenidos mediante técnicas directas, fortaleciendo la confiabilidad de la interpretación litológica e hidrogeológica del subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires - Universidad Nacional del Sur) y al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur.

REFERENCIAS

Caló, J., Fernández, E., Marcos, A., Aldacour, H. 1998. Urban unvironmental geology and its relation to building foundation for urban development planning in Bahía Blanca City, Argentina. Proceedings 8th Congress International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), Canadá. Vol IV: 2711-2716.

Caló, J., Fernández, E., Marcos, A., Aldacour, H. 1999. Construcción de mapas geológicos ingenieriles a partir de conocimientos previos compilados en un Sistema de Información Geográfico. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 3: 1-10.

Campo de Ferreras, A., Capelli de Steffens, A., Diez, P. 2004. El clima del suroeste bonaerense. Dpto de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 105pp.

Capelli de Steffens, A.M., Piccolo, M.C., Campo de Ferreras, A.M. 2006. Clima urbano de Bahía Blanca. Revista Universitaria de Geografía, 15(1), 183-186.

Di Martino, C., Albouy, R., Aliotta, S. 2022. Evaluación geotécnica preliminar de las unidades geológicas del frente costero portuario de Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. Revista De Geología Aplicada al Ingeniería y al Ambiente. 48: 15–21.

Estadísticas Climatológicas Normales: República Argentina - Periodo 1991-2020. Servicio Meteorológico Nacional. (www.smn.gob.ar).

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. En Köppen, W., & Geiger, R. (Eds.). (1930). Handbuch der klimatologie (Vol. 1). Berlin: Gebrüder Borntraeger. 44p.

Urriza, G. (2018). Expansión urbana en ciudades intermedias de crecimiento demográfico bajo: el caso de Bahía Blanca, Argentina. X Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Córdoba, (pp. 105-123) https://doi.org/10.5821/siiu.9151

COMPORTAMIENTO GEO-TERMOMECÁNICO DE SEDIMENTOS PROVENIENTES DE LA ISLA MARAMBIO (ANTÁRTIDA ARGENTINA)

Fabio S. Luna[1], Marcelo A. Calvo[1] y Cristian E. Cocchiarale[1]
[1]Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Av. General Paz 5445, San Martín, Buenos Aires, Arg.
Mail de contacto: fluna@inti.gob.ar

RESUMEN
En el presente trabajo se realiza una evaluación del comportamiento geo-termomecánico de probetas de sedimentos de la isla Marambio para su potencial uso en obras de relleno y terraplenado en la base y pista. Mediante la metodología propuesta se obtuvieron una serie mediciones de laboratorio, en condiciones normales y de congelamiento para analizar las características geo-termomecánicas tales como: resistencia a la compresión, velocidad de pulsos ultrasónicos y seguimiento térmico hasta -20°C. Adicionalmente, se presentan datos levantados en el campo (perfiles térmicos y ensayos *in situ*) que complementan los análisis de laboratorio y vinculan los estudios realizados.

Palabras clave: Antártida Argentina, geotecnia, ensayos geo-termomecánicos.

ABSTRACT
This study presents an evaluation of the geo-thermomechanical behavior of sediment specimens from Marambio Island, aimed at assessing their potential use in fill and embankment works for the base and airstrip. Through the proposed methodology, a series of laboratory measurements were obtained under both normal and freezing conditions, to analyze geo-thermomechanical properties such as uniaxial compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and thermal tracking down to -20°C. Additionally, field data (thermal profiles and in situ tests) are presented to complement the laboratory analyses and establish a connection between the conducted studies.

Keywords: Argentine Antarctica, geotechnics, geo-thermomechanical testing

INTRODUCCIÓN

La Base Marambio es la principal puerta de entrada de la logística argentina en la Antártida y desde ella se despliega el mayor número de campamentos científicos durante las campañas antárticas de verano, operativa todo el año. Además de su importancia logística para las 13 bases argentinas en Antártida, Marambio se ha constituido en un polo de acti vidad científica. Se ubica en la isla homónima a los 64°14,5'S y 56°37,5'O, rodeada por el mar de Weddell, tal como se muestra en la Figura 1. La base cuenta con edificios científicos, alojamiento, talleres y una pista de aterrizaje de cerca de 1600 m de extensión para aviones de gran carga, tipo Hércules C-130.

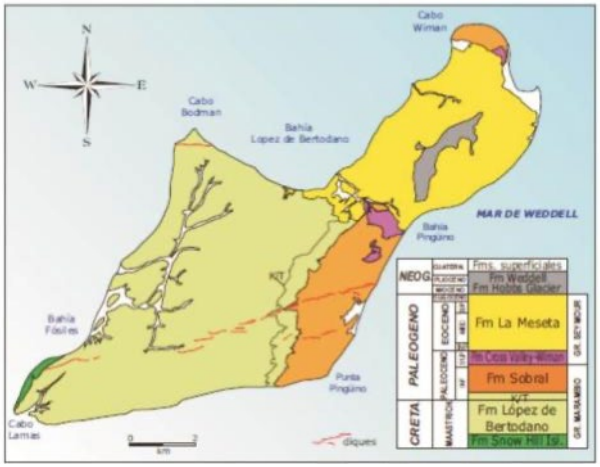


Figura 1: Imagen tomada y modificada de "Mapa geológico 1:20.000 de la isla Marambio" (Montes et al, 2008). El cuadro rojo indica la ubicación de la base Marambio.

En base a la bibliografía geológica disponible, distintos autores han estudiado y definido una serie de formaciones geológicas cretácicas-terciarias (Figura 1), de origen marino con abundante fauna fósil. La Formación Weddell representa la litología que se observa superficialmente en el terreno de trabajo y constituye un depósito glacimarino de edad post-pliocena, con un desarrollo menor a 5 metros. Corresponde a geoformas de acumulación denominadas morenas, compuestas por lo que se conoce como *till*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar este trabajo, se muestra una serie de estudios realizados tanto in situ como en laboratorio; estos corresponden a campañas en base Marambio entre los años 2018 y 2020 (INTI, 2019a; INTI, 2020) y trabajos de laboratorio en 2019 (INTI, 2019b). Las probetas ensayadas fueron provistas por el DODENAC (Departamento de Obras para el Desarrollo Nacional del Ejército Argentino); las mismas fueron compactadas en laboratorio y constituidas por muestras representativas de sedimento suelto que forma parte de los depósitos superficiales ubicados en proximidad a la pista aérea y base Marambio. De acuerdo con la clasificación SUCS, se encuadran dentro del grupo SM (arenas limosas).

En primer lugar, los ensayos realizados en laboratorio (Figura 2) a las probetas fueron: Relevamiento dimensional y control de pesada, con Balanza digital marca Sartorius; Ensayos de compresión simple a 19,5 y -20 °C con medición de deformación axial, siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 10518:1970, realizado con prensa ELE de capacidad 10 KN y aro dinamométrico marca Digimess; Mediciones ultrasónicas, con equipo digital marca V-Meter MK II. Para el ciclado térmico de las probetas (rango de temperaturas de 19,5 y -20 °C) se empleó una cámara térmica marca Discovery; el proceso de variación de temperatura se visualizó mediante imágenes térmicas con cámara termográfica marca FLIR Therm 400.

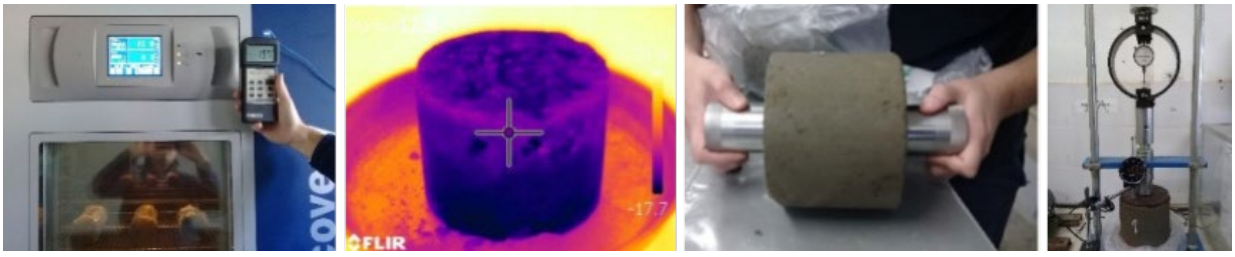


Figura 2. Ensayos de laboratorio de ciclado térmico, termografía, ultrasonido y compresión simple.

En segundo lugar, los ensayos realizados en campo se centraron en la determinación del perfil térmico del terreno, para lo cual se instaló un dispositivo vertical con cuatro termistores marca HOBO modelo TMC20-HD, espaciados cada 45 cm hasta los 180 cm (Figura 3); el registro de medición abarcó un periodo 2 años y 3 meses. Paralelamente a este trabajo, se realizó una descripción del perfil geo-edafológico mediante calicata y tomando muestras del terreno a distintas profundidades; estas muestras fueron analizadas para su clasificación granulométrica (SUCS) y para su composición mineralógica-petrográfica general, mediante lupa binocular, microscopio petrográfico y difracción de rayos X para las arcillas (Figura 4).



Figura 3. Instalación de termistores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través del perfil geo-edafológico, tal como se muestra en la Figura 4, se observa una zona parcialmente saturada con agua (capa activa), cuya base se encuentra aproximadamente a los 40 cm de profundidad. A partir de aquí, se distingue hielo intersticial (permafrost), comprobando de forma cualitativa que las características geomecánicas mejoran notablemente a mayor profundidad.

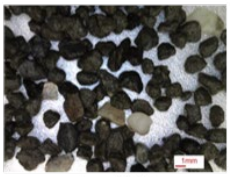
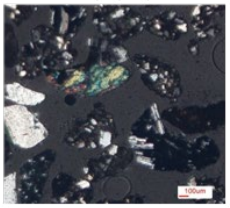
Perfil litológico (calicata)	Descripción visual	Granulometría SUCS (%)				MINERALOGÍA/ PETROGRAFÍA
		Gra	Are	Lim	Arc	
	a) 0-35 cm b) Gris verdoso oscuro (4 10Y GLEY1) c) Algo friable d) Saturado parcialmente de agua e) Plasticidad baja a intermedia	5,9	40,7	49,8	3,6	**Rocas / Minerales**: - Sedimentitas (volcaniclásticas?) gris oscuras, con plagioclasas y máficos - Rocas máficas, de texturas granosas y texturas porfíricas, con plagioclasas, máficos y opacos - Rocas graníticas y gneissicas blancas y negras, con cuarzo, feldespatos y máficos. - Cuarzos y feldespatos incoloro a blanquecinos - Mármoles blancos y blancos verdosos **Arcillas(DRX)**: Caolinita - Vermiculita -Illita  Lupa (10X)  Corte delgado (25X)
	a) 35-45 cm b) Gris verdoso oscuro (4 10Y GLEY1) c) Firme d) Saturado parcialmente de agua - Hielo de 0,1-1 cm e) Plasticidad baja a intermedia	2,7	30,6	62,3	4,4	
	a) 45-100 cm b) Gris verdoso oscuro (4 10Y GLEY1) c) Muy firme d) Hielo de 0,1-5 cm e) Plasticidad baja a intermedia	0,0	36,2	59,8	3,9	
	a) 100-150 cm b) Gris verdoso muy oscuro (3 10Y GLEY1) c) Muy firme d) Hielo de 0,1-100 cm e) Plasticidad baja a intermedia	3,6	44,7	49,2	2,5	

Figura 4. Descripción del perfil geo-edafológico y composición mineralógica-petrográfica y granulométrica

Los resultados indican un perfil del terreno homogéneo respecto a su composición mineralógica-petrográfica y granulométrica.

Los resultados obtenidos del ensayo de compresión de las probetas representativas del material del terreno se presentan en la Figura 5.

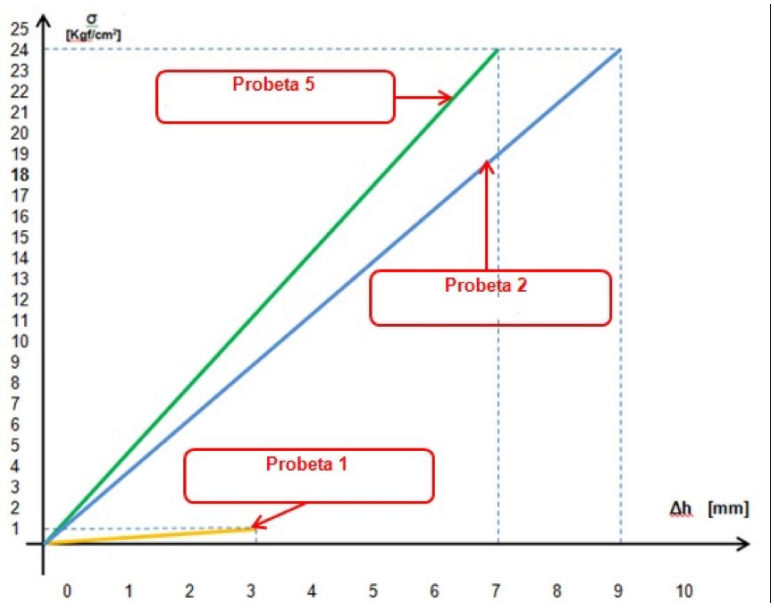


Figura 5. Gráfico comparativo de los comportamientos geo-termomecánicos ("Probeta 1" a 19,5 ºC; "Probeta 2" y "Probeta 5" a -20 °C)

El espécimen identificado como “Probeta 1” resultó con comportamiento mecánico del tipo plástico, alcanzando una carga de colapso muy baja y con mucha deformación (σ = 1 kg/cm^2 - Δh = 3 mm). El espécimen identificado como “Probeta 5” resultó con comportamiento mecánico mucho más favorable, aumentando considerablemente su rigidez mecánica, alcanzando una carga de colapso más alta y con menos deformación (σ = 24 kg/cm^2 - Δh = 7 mm). El espécimen identificado como “Probeta 2” resultó con comportamiento mecánico similar al de la probeta 5, pero aumentando sensiblemente la deformación alcanzada para la carga de colapso (σ = 24 kg/cm^2 - Δh = 9 mm).

Por otro lado, a través de los registros obtenidos en campo de los termistores a distintas profundidades del suelo, se muestran en la Figura 6 los registros obtenidos.

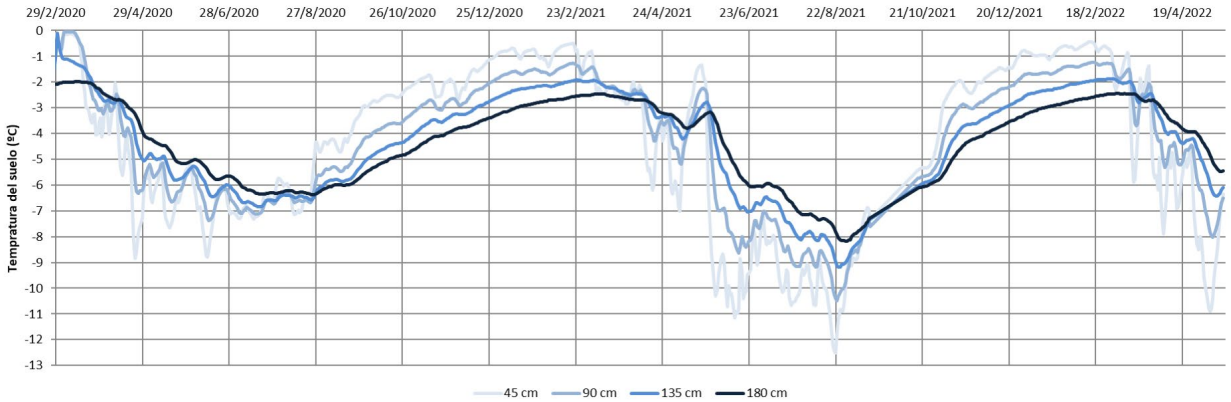


Figura 6. Se muestran todos los valores de temperatura registrados por los sensores instalados a 45, 90, 135 y 180 cm de profundidad. (Datos: febrero de 2020 a mayo de 2022).

La correlación entre los valores obtenidos de resistencia a la compresión y mediciones térmicas del perfil del terreno permiten establecer parámetros de seguridad en las instalaciones existentes.

CONCLUSIONES

Como conclusión se menciona que, mediante los ensayos de laboratorio realizados en las probetas, se pudo evaluar el comportamiento geo-termomecánico de las muestras representativas. Las probetas arrojan mayores valores de resistencia a la comprensión simple a menores temperaturas debido al congelamiento del agua contenida en sus poros y por su composición, compactación y relación granulométrica.

Es fundamental para este tipo de ambiente de características climáticas como las de la isla Marambio, el desarrollo de ensayos específicos de índole térmicas para un mejor conocimiento y performance geo-termomecánica de suelos y/o sedimentos para un uso determinado, así como para controles en operación o uso.

Mediante la instalación de termistores en profundidad se pudo estudiar y registrar, de manera directa y confiable, las condiciones térmicas del perfil del terreno. Estas mediciones determinaron que el rango de temperaturas del terreno en la profundidad de zapatas del sector “Alojamiento” de la base Marambio, se encuentra entre -2 y -8 °C aproximadamente, dentro del periodo estudiado. Se propone para futuros trabajos realizar nuevos ensayos geo-termomecánicos cercanos a estos valores, para conocer con mayor certeza el comportamiento mecánico del suelo en la cota de fundación.

La medición directa con termistores puede ser aplicado para advertir perturbaciones térmicas, tanto naturales como antrópicas, en el terreno de fundación y en pista a nivel superficial que terminan repercutiendo en cambios de las propiedades geomecánicas del terreno. En Marambio se hace muy importante y se recomienda la utilización de estos sensores a nivel superficial a lo largo de la pista y en las fundaciones de las bases, ya que los mismos constituyen un método de control de la capacidad portante del terreno en estudio y para realizar un monitoreo con seguimiento remoto de las temperaturas del suelo como sistema de alerta temprana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Departamento de Obras en Apoyo al Desarrollo Nacional (DODENAC – Ejército Argentino), en especial al Cnel. Rafael Guerrero, My. Federico Devoto, Cap. Luis Grecca y colaboradores; al personal de INTI, en especial de la Subgerencia de Infraestructura y Construcciones y al personal de las dotaciones de la Base Marambio en los periodos 2019-2022.

REFERENCIAS

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2019a). Informe de Asistencia Técnica – Relevamiento Base Marambio. Informe inédito de la SOCEI – INTI.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2019b). Asistencia Técnica "Pista Marambio" - Primera etapa y segunda etapa. Informe inédito del Departamento de Geología y Medioambiente - INTI.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2020). Informe geológico - Base Marambio. Informe inédito del Departamento de Geología y Medioambiente - INTI.

Montes Santiago, M. J., Nozal, F., Santillana, S., Marenssi, S., Olivero, E. B., & Maestro González, A. (2008). Mapa geológico 1:20.000 de la isla Marambio (mar de Weddell, Antártida). Geotemas (Madrid), ISSN 1576-5172, N.º. 10, VII Congreso Geológico de España), págs. 709-712.

CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL SUBSUELO MEDIANTE TDEM: VALIDACIÓN OPERATIVA DEL EQUIPO WALKTEM2 (ABEM)

Fabiana E. Robledo[1], Ma. Eugenia Franzoni[2], Agustina Martín Pedrol[3], Julián Ramos[4,5], Regina Mancuso[6]
[1]Departamento de Investigación y Tecnología Aplicada, Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, Argentina.
[2]Departamento Prospección, Gerencia de Exploración de Materias Primas (GEMP), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, Argentina.
[3]Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur (UNS), Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.
[4]Departamento del Agua, CENUR LN, Universidad de la República. Ruta 3, Km 363, Salto 50000, Salto, Uruguay.
[5]Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón I, Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina.
[6]Departamento Evaluación Ambiental, Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: fabianarobledo@cnea.gob.ar; frobledo@fi.uba.ar

RESUMEN

Durante el período 2022–2025, en el marco del Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (PNGRR), se desarrolló una línea de trabajo orientada a fortalecer las capacidades técnicas en caracterización eléctrica del subsuelo mediante la validación y aplicación de procedimientos geofísicos avanzados. Por primera vez en Argentina, se realizaron trabajos de campo con el equipo WalkTEM2, basado en el método TDEM (Inducción Electromagnética en el Dominio del Tiempo), para validar protocolos de adquisición, procesamiento e interpretación de datos geofísicos esenciales para estudios geológicos, hidrogeológicos y de disposición de residuos radiactivos.

La caracterización geofísica permite diseñar modelos conceptuales del subsuelo, identificar formaciones con capacidad de confinamiento y evaluar condiciones estructurales e hidrogeológicas. Se realizaron campañas metodológicas en Entre Ríos, seleccionada por su diversidad geológica, accesibilidad y cercanía a instituciones técnicas. Las actividades fueron coordinadas por CNEA a través del PNGRR y la Gerencia de Exploración de Materias Primas (GEMP), con participación de la Universidad Nacional del Sur (UNS) de Argentina y la Universidad de la República (UDELAR) de Uruguay.

El equipo WalkTEM2-TX60, de alta resolución y gran portabilidad, permitió explorar hasta varios cientos de metros de profundidad, generando secciones verticales de resistividad eléctrica que evidencian contrastes litológicos e hidrogeológicos. Las campañas incluyeron adquisición, procesamiento e interpretación de datos, obteniéndose modelos 1D y 2D consistentes con estudios previos (SEV y TRE), consolidando así una herramienta clave para futuras aplicaciones en geociencias y en la disposición final de residuos radiactivos.

Palabras clave: Geofísica, WalkTEM2, TDEM.

ABSTRACT

During the period 2022–2025, within the framework of the National Radioactive Waste Management Program (PNGRR), a workstream was developed to strengthen technical capabilities in subsurface electrical characterization through the validation and application of advanced geophysical procedures. For the first time in Argentina, fieldwork was carried out using the WalkTEM2 system, based on the Time-Domain Electromagnetic (TDEM) method, to validate data acquisition, processing, and interpretation protocols essential for geological, hydrogeological, and radioactive waste disposal studies.

Geophysical characterization plays a critical role in designing conceptual models of the subsurface, identifying formations with confinement potential, and assessing hydrogeological and structural conditions. Methodological field campaigns were carried out in the province of Entre Ríos, selected for its lithological diversity, accessibility, and proximity to technical institutions. The activities were coordinated by the Argentine Atomic Energy Commission (CNEA) through the PNGRR and the Raw Materials Exploration Management (GEMP), with the participation of the National University of the South (UNS) of Argentina and the University of the Republic (UDELAR) of Uruguay.

The WalkTEM2-TX60 system enables high-resolution exploration to depths of several hundred meters, facilitating the detection of deep geological structures. This first systematic application of the technology in Argentina demonstrated advantages in portability and accuracy over conventional methods. The system generates vertical resistivity sections by applying current pulses and measuring the induced electromagnetic response, revealing contrasts associated with lithological and hydrogeological variations. The campaigns

produced 1D and 2D models consistent with previous studies (VES and ERT), consolidating a valuable tool for future applications in geosciences.

Keywords: TDEM, WalkTEM2, geophysical characterization, radioactive waste, geophysical modeling.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del subsuelo es esencial para evaluar condiciones estructurales e hidrogeológicas en estudios de selección y validación de sitios. El método TDEM permite explorar a gran profundidad con buena sensibilidad a contrastes de resistividad, lo cual resulta útil para identificar unidades confinantes, acuíferos y estructuras geológicas relevantes.

Entre 2022 y 2024 se inició la validación operativa del sistema WalkTEM2-TX60 (ABEM) en campañas desarrolladas en la provincia de Entre Ríos. Esta región fue seleccionada por su diversidad litológica, accesibilidad y antecedentes geofísicos disponibles. Los objetivos principales del trabajo fueron:

- Evaluar el desempeño del equipo WalkTEM2 en condiciones reales de campo.
- Generar protocolos técnicos para futuras aplicaciones.
- Comparar resultados con métodos tradicionales como Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

Marco Teórico - Operativo del Método TDEM

En los métodos de prospección electromagnética con fuente controlada como lo es el TDEM, se emplea una espira transmisora y otra receptora, con distancia fija o variable, siendo las configuraciones más comunes el Loop Único y el Loop Receptor Central (Chelotti et al., 2009). En la Figura 1a se muestra el arreglo utilizado en los trabajos de campo.

La Figura 1b muestra el principio de funcionamiento del método: la corriente variable que se hace circular en la espira transmisora (TX) genera un campo magnético primario (Hp) que induce corrientes en conductores subterráneos, produciendo un campo secundario (Hs) detectado por la espira receptora (RX), revelando características del objeto generador (Lascano, 2007).

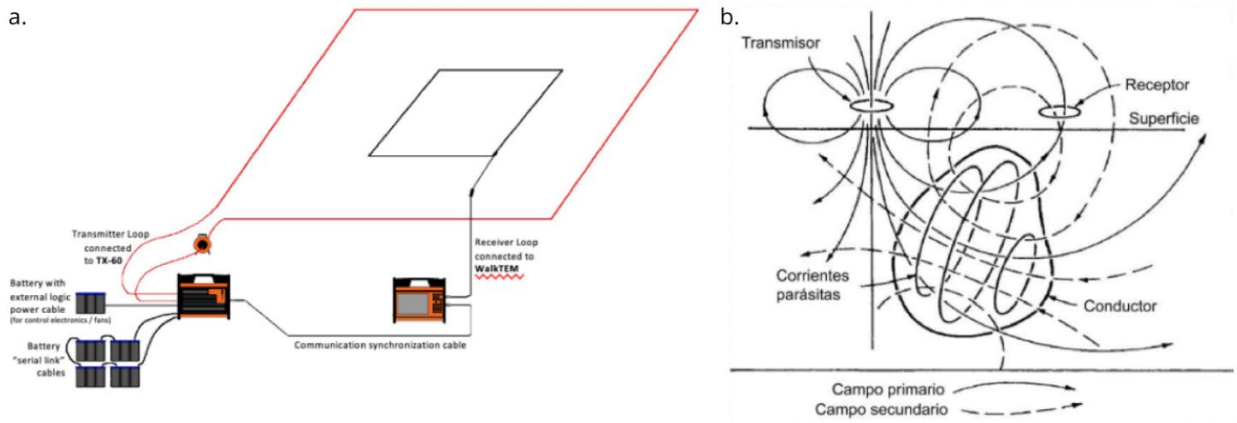


Fig. 1. a. Arreglo del equipo WalkTEM2 utilizado durante los trabajos de campo para la validación del protocolo geofísico (Tomada del Manual de Usuario WalkTEM2). b. Esquema generalizado del método TEM (Tomada y modificada de Reynolds, 2011).

En este método, el campo primario se aplica mediante pulsos de 20-40 ms de duración, midiendo el campo secundario tras la desactivación durante intervalos posteriores (~100 ms). Una ventaja es que la misma bobina puede funcionar como transmisor y receptor (Reynolds, 2011).

La espira receptora capta ambos campos simultáneamente. El campo secundario se descompone en componentes en fase y cuadratura respecto al primario (partes real e imaginaria). La componente en cuadratura se vincula exclusivamente a la conductividad eléctrica, mientras que la componente en fase también depende de la permeabilidad magnética. Los datos se visualizan tanto en cortes verticales como en secciones horizontales, lo que permite identificar rápidamente cuerpos conductores y anomalías geofísicas (Lascano, 2007). A partir de las lecturas de voltaje se construye una curva de decaimiento del campo magnético versus tiempo: para un mismo instante, un voltaje más alto refleja una conductividad del subsuelo mayor. Finalmente, la conductividad eléctrica, y su inversa, la resistividad eléctrica, se obtiene aplicando el modelo físico-matemático desarrollado por Reynolds (2011), quien estableció el procedimiento para convertir las mediciones de potencial en valores de resistividad eléctrica.

Marco Geológico Aplicado al Análisis de la zona de Estudio

La provincia de Entre Ríos está situada en el borde sur de la cuenca Chaco– Paranaense, que presenta depósitos someros en el sureste y profundizaciones hacia el oeste y noroeste. Tipificada como de intraplaca y no vinculada a procesos de subducción, alberga sedimentitas continentales y marinas de edades comprendidas entre el Paleozoico Medio y el Cuaternario (Santi, et al 2013). En la Tabla 1 se sintetiza la caracterización geológica e hidrogeológica de la sección de sedimentos depositados desde el Cretácico hasta la actualidad, en la zona de estudio. Debido a que la columna estratigráfica completa excede el alcance de este trabajo, la información se ha focalizado en los niveles suprabasálticos más relevantes para los objetivos del proyecto.

FORMACIÓN	EDAD	LITOLOGÍA	HIDRO ESTRATIGRAFÍA
Hernandarias	Pleistoceno Medio	Depósitos de limos y arcillas limosas con contenido variable de arena fina a muy fina.	Acuitardo
Ubajay	Holoceno	Predominan las arenas finas a medianas donde se intercalan delgados niveles conglomerádicos de tipo matriz-sostén.	Acuífero libre
Salto Chico	Pleistoceno Inferior	Arenas cuarzosas gruesas, medianas y finas arcillas y estratos irregulares de rodados finos y gruesos.	Acuífero semiconfinado
Fray Bentos	Oligoceno Inferior a Medio	Areniscas muy finas a limos calcáreos.	Acuitardo y/o Acuífero
Puerto Yeruá	Cretácico Superior	Arenas y areniscas conglomerádicas de origen fluvial, que en ocasiones presentan lentes irregulares de arcilitas	Acuífero
Serra Geral	Cretácico Inferior	Derrames basálticos con intercalaciones clásticas	Acuífero en basaltos fisurados

Tabla 1. Unidades estratigráficas presentes en el área de estudio, con detalle de su litología y caracterización hidro estratigráfica. Modificada a partir de Filí (2001), Santi et al. (2013), Silva Busso y Amato (2017) y Tofalo (1986).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el equipo WalkTEM2-TX60, configurado con lazos transmisores de 100 × 100 m y 200 × 200 m, y un lazo receptor central de 25 × 25 m. Esta disposición permitió alcanzar profundidades de investigación del orden de 300 a 400 metros, compatibles con los objetivos del estudio, manteniendo una resolución vertical adecuada para la caracterización geofísica del subsuelo.

Las campañas se desarrollaron en diversas etapas:

1. Preparación:

Incluyó la selección y georreferenciación de puntos de medición, verificación del equipo (baterías y funcionamiento) y obtención de permisos de acceso.

2. Adquisición de datos:

Se configuró el equipo para alcanzar la profundidad de investigación deseada, registrando coordenadas GPS y condiciones ambientales. Se ajustaron parámetros como duración de pulsos, ventanas temporales y repeticiones. En el sitio, se evaluó la calidad de las curvas de decaimiento y se controlaron interferencias. Los datos fueron registrados en fichas de campo y se respaldaron digitalmente. Las mediciones se realizaron en áreas rurales de Concordia y su entorno, seleccionadas por su baja interferencia electromagnética y antecedentes geológicos conocidos.

3. Procesamiento y análisis:

Se aplicaron procedimientos de limpieza, corrección de ruido y modelado 1D mediante software especializado. Los resultados fueron contrastados con datos SEV y TRE obtenidos entre 2022 y 2024. La Figura 2 muestra la distribución espacial de los puntos relevados, los métodos aplicados TDEM, SEV y TRE, y evidencia la cobertura alcanzada y la complementariedad de las técnicas utilizadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se presentan los modelos de inversión de resistividad correspondientes a las estaciones TEM 1, TEM 2, TEM 3 y TEM 4, tal como están posicionadas en el mapa del zona de estudio.

En los sondeos TEM 1, TEM 2, TEM 3 Y TEM 4 se identifica un modelo estratigráfico compuesto por tres capas: una capa superficial de alta resistividad, seguida por una segunda capa con resistividades más bajas, y una tercera capa en la que se observa nuevamente un aumento en los valores de resistividad. Este patrón también se evidencia en el SEV 1, realizado en la misma ubicación que el TEM 3, y puede corroborar adicionalmente con los registros del POZO 1, ubicado en las proximidades del TEM 2. Estos resultados

ID	Latitud	Longitud
TEM 1	-30.882944°	-57.925778°
TEM 2	-31.249614°	-57.945932°
TEM 3	-31.453720°	-58.295087°
TEM 4	-31.527161°	-58.088824°
TEM 5	-31.190893°	-58.084845°
TEM 6	-31.263578°	-57.991166°
TEM 7	-31.303056°	-57.974444°
TEM 8	-31.354212°	-58.041032°
TEM 9	-31.368672°	-57.999091°
TEM 10	-31.428113°	-58.056215°
TEM 11	-31.443333°	-58.101944°
POZO 1	-31.254171°	-57.954723°
SEV 1	-31.453720°	-58.295087°
TRE 1	-31.475451°	-58.215982°

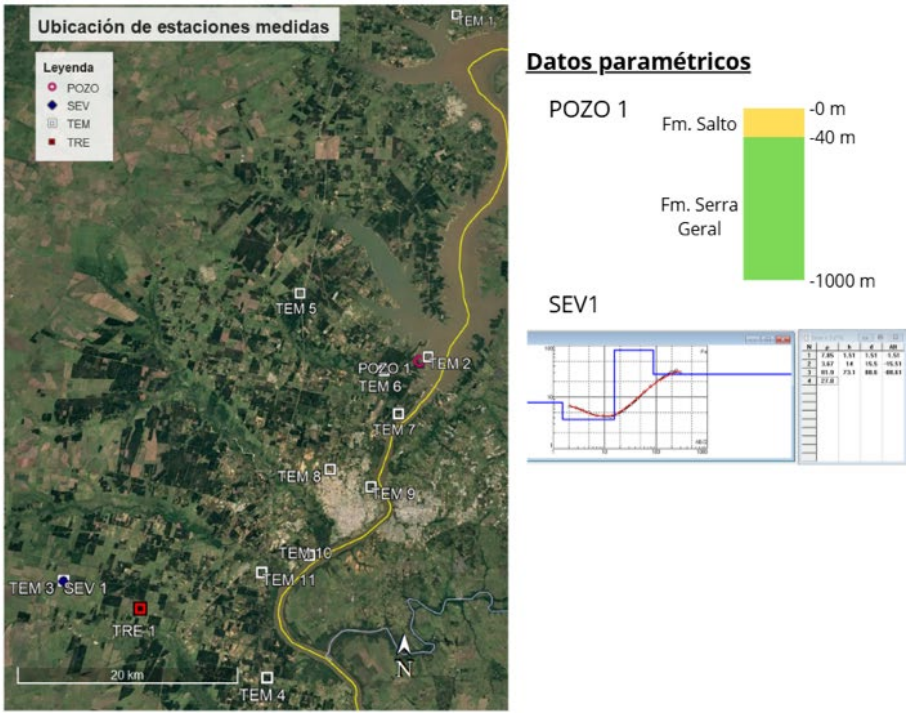


Fig. 2. Ubicación georreferenciada de los puntos relevados en la zona de estudio, con indicación de los métodos geofísicos aplicados (TDEM, SEV y TRE) y referencia a los datos paramétricos obtenidos en el Pozo 1 y el SEV 1.

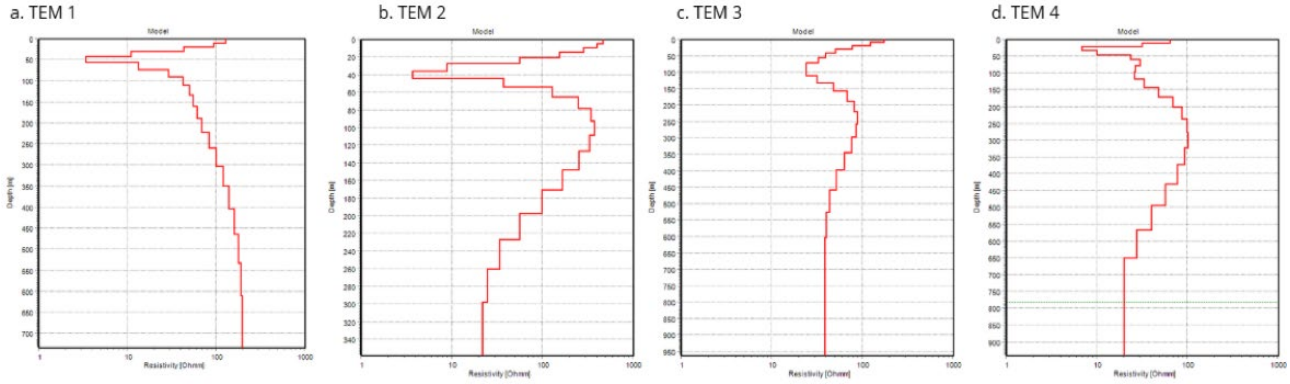


Fig. 3. Modelos de inversión de resistividad obtenidos en las estaciones TEM1, TEM2, TEM3 y TEM4.

indican una buena concordancia entre los métodos TEM y SEV en la caracterización de la estructura del subsuelo, aunque debe señalarse que el SEV presenta una menor profundidad de investigación. Por otro lado, en los sondeos TEM 2, TEM 3 y TEM 4 se detecta una disminución de resistividad a mayor profundidad, que sugiere la posible presencia de una cuarta capa. Sin embargo, esta interpretación debe considerarse con cautela, ya que dicha anomalía se encuentra por debajo del límite confiable de profundidad de investigación.

CONCLUSIONES

El sistema WalkTEM2, equipado con la espira transmisora TX60, ha sido validado con éxito en campañas de campo reales, demostrando su eficacia para la caracterización profunda del subsuelo.

Se generaron modelos coherentes con la geología conocida y los resultados de métodos geofísicos previos. La implementación conjunta de métodos geoeléctricos (TRE y SEV) y electromagnéticos (TEM) permitió enriquecer la interpretación de los datos y evaluar la aplicabilidad de diferentes técnicas geofísicas.

Los tres métodos proporcionaron resultados coherentes entre sí, aunque presentaron ventajas específicas: las TRE facilitaron la interpretación de datos debido a su representación bidimensional; los SEV ofrecieron simplicidad en la ejecución de campo; mientras que los TEM, pese a requerir mayor planificación de campaña debido a la necesidad de áreas extensas libres de interferencias electromagnéticas (alambrados, cables de alta y media tensión), proporcionaron facilidad operativa en campo y mayores profundida-

des de investigación comparado con los métodos eléctricos convencionales, el sistema permitió investigar profundidades del orden de 300–400 m bajo parámetros convencionales, superando el alcance de los métodos SEV y TRE.

Este método aporta ventajas en eficiencia, resolución y portabilidad, por lo que se recomienda su aplicación sistemática en áreas candidatas para instalaciones de disposición final de residuos radiactivos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente al Mg. Ing. Julián Ramos, a la Geol. Ma. Eugenia Franzoni, a la Lic. Agustina Martín Pedrol, a la Esp. Lic. Regina Mancuso y al Técnico Sebastián Pérez por su compromiso y dedicación en el desarrollo de las campañas, así como a la Geofísica Andrea Rodríguez por su valioso aporte. Este trabajo contó con el respaldo institucional y técnico de la Comisión Nacional de Energía Atómica, el Programa Nacional Gestión de Residuos Radiactivos, Gerencia Exploración de Materia Primas, Universidad Nacional del Sur y Universidad de la República.

REFERENCIAS

Fili, M. (2001). Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Rios- República Argentina. Boletín Geológico y Minero, 112, 25–36.

Lascano, M. E. (2007). Métodos eléctricos y electromagnéticos aplicados a geofísica ambiental (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Reynolds, J. M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.

Silva Busso, A., y Amato, S. (2017). Los sedimentos fluviales del subsuelo y sus implicancias hidrogeológicas en la provincia de Entre Ríos. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 74 (3), 338–356.

Tofalo, O. M. (1986). Depósitos clásticos y carbonáticos del Cretácico Superior, Formación Puerto

Yerua, Entre Rios. En Reunión argentina de sedimentología. 1 (pp. 201–204).

PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DE TALUDES DE PRE-CORTE RELACIONADOS A LA TECTÓNICA EXTENSIONAL DEL SUR DE LA SIERRA DE SAN LUIS

Daniel A. Sales[1], Carlos E. Gardini[1]
[1]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: sales@unsl.edu.ar

RESUMEN
Se analizan los taludes de pre-corte de los principales caminos del extremo sur de la sierra de San Luis, donde se sitúan las depresiones tectónicas Potrero de los Funes y Las Chacras - Cruz de Piedra, originadas a partir de la configuración de un paisaje influenciado por la tectónica extensional de alcance regional.
En estos sectores la incidencia de las fallas normales con dirección entre 290° y 340° e inclinación al noreste, generaron en un macizo granítico, diferentes tipos de inestabilidad en los taludes a partir de roturas del tipo planar, en cuña y vuelco, según la disposición de la traza vial respecto a las estructuras extensionales, desarrollando principalmente constantes deslizamientos traslacionales. Las trazas paralelas a las fallas extensionales generan roturas tipo planar y los sectores oblicuos a dichas fallas generan roturas en cuña y planares con menor proporción de vuelcos.
Los sectores analizados, según el índice RMR corregido por orientación, presentan clase “muy mala” a “mala”, y según el índice GSI, predominan los bloques irregulares con una condición del frente buena (BI/B).

Palabras clave: Sierra de San Luis - taludes de pre-corte - fallas extensionales - deslizamientos.

ABSTRACT
The pre-cut slopes are analyzed along the principal routes in southernmost San Luis, where the Potrero de los Funes and Las Chacras - Cruz de Piedra tectonic depressions are located. These depressions originated from a landscape configuration influenced by regional-scale extensional tectonics. In these sectors, the incidence of normal faults with strikes between 290° and 340° and dips to the northeast generated different types of instability in the slopes of a granitic massif. This instability resulted from planar, wedge, and toppling failures, depending on the orientation of the road with respect to the extensional structures, primarily developing constant translational landslides.
Traces parallel to extensional faults generate planar-type fractures, and sectors oblique to these faults generate wedge-shaped and planar fractures with a lower proportion of overturns.
The sectors analyzed, according to the orientation-corrected RMR index, are classified as “very poor” to “poor,” and according to the GSI index, irregular blocks with good front conditions predominate (BI/B).

Keywords: San Luis mountain range – pre-cut slopes – extensional faults – landslides.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica en el interior serrano del extremo austral de la sierra de San Luis, donde se desarrollaron dos depresiones a partir de la tectónica extensional durante la orogenia Andina. Estas depresiones tectónicas están limitadas en su extremo occidental por la sierra de los Venados, que separa la Ciudad de San Luis con el municipio de Juana Koslay, y en su extremo oriental por la culminación de la sierra al pie de la localidad de Potrero de los Funes (Fig. 1).

Se accede desde la Ciudad de San Luis por la Ruta provincial N° 20, la autovía los Puquios y la Autopista 25 de Mayo para luego acceder a la Av. del Portezuelo en el municipio de Juana Koslay.

Motiva este trabajo, conocer las condiciones geomecánicas de los taludes de pre-corte desarrollados principalmente en rocas graníticas, con la finalidad de identificar las condiciones de rotura y sus procesos gravitacionales asociados.

El macizo serrano en el área de estudio está compuesto predominantemente por granitos, donde se desarrollaron cortes para la construcción y ampliación de las trazas viales de los caminos de los perilagos de Potrero de los Funes y Cruz de Piedra, y de la autovía de la ruta provincial N° 20 entre las localidades de Juana Koslay y El Volcán.

Entre los objetivos del trabajo es relacionar el comportamiento geomecánico de los diferentes taludes de pre-corte y evaluar si presentan similares características entre ellos, a partir de la identificación de los mecanismos de rotura y de los procesos gravitacionales asociados.

Entre los antecedentes de la zona de estudio, se destacan los estudios realizados por Sales et al. (2001), Farioli y Sales (2014), Denaro y Sales (2021) y Lorca et al. (2021).

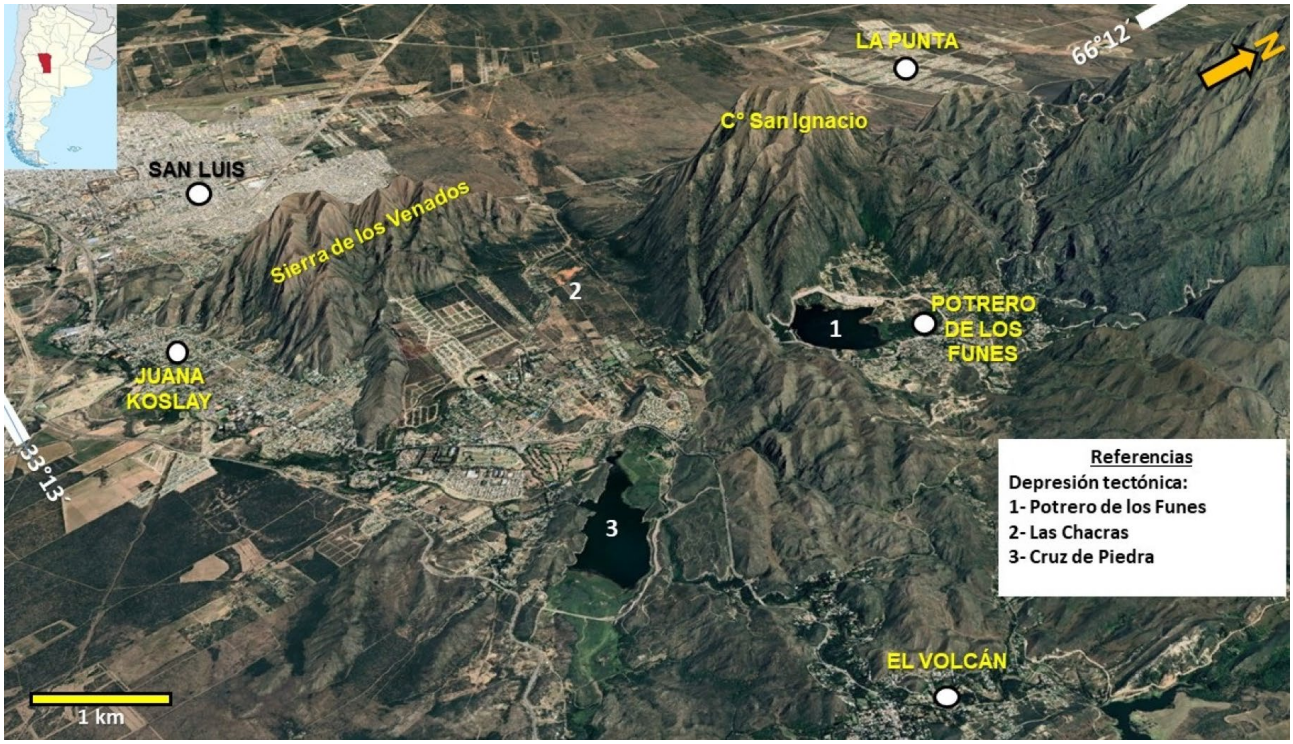


Fig. 1. Imagen con relieve exagerado, donde se observan las depresiones tectónicas y su ubicación con respecto a las diferentes localidades (Imagen modificada del Google Earth)

El marco geológico está constituido por un basamento cristalino de edades desde el Paleozoico inf., representado por esquistos del complejo metamórfico Pringles (fuera del área de estudio) y rocas graníticas de los plutones El Volcán y Los Puquios, y la Tonalita Potrero de los Funes (Morosini, 2011). Culmina la secuencia, areniscas de la Formación San Roque (Neógeno), el Fanglomerado Potrero de los Funes (Cuaternario) y depósitos modernos. Según Ojeda et al. (2007) definieron el área que nuclea las depresiones en el sur de la sierra de San Luis, como "Asociación Geomorfológica de las Depresiones Tectónicas del Sur de Sierra".

Desde el punto de vista estructural, Costa y Cortéz (1991) agruparon los diferentes sistemas de fallas extensionales de la depresión Tectónica de Potrero de los Funes, en los grupos de fallas del Salto de la Moneda, Potrero de los Funes y de la Dorsal de la Quebrada de Los Cóndores, con direcciones predominantes entre los 280° y 300° e inclinación al noreste (Fig. 2). Varias contribuciones han interpretado que la interacción de fracturas con orientaciones N-S y NO-SE, configuró la depresión tectónica homónima y la depresión Las Chacras – Cruz de Piedra.

Por otro lado, la depresión tectónica Las Chacras - Cruz de Piedra se encuentra marginada por el sistema de fallas de la dorsal de la Quebrada de los Cóndores (Fig. 2). Este sistema de fallas ha generado una alta densidad de fracturas por el escaso espaciamiento entre los planos de un mismo set, que varían desde diferencias milimétricas hasta 0,50 m de separación como lo observado en los taludes de pre-corte del camino del perilago del embalse Potrero de los Funes (Sales et al., 2001) y en el camino del perilago de Cruz de Piedra (Lorca et al., 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la descripción y caracterización del macizo rocoso, se utilizó la metodología sugerida por la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) para la descripción cuantitativa de macizos rocosos. En el análisis de la orientación de las discontinuidades, se puedo determinar los diferentes tipos de roturas del macizo. La resistencia de la matriz rocosa fue estimada a través del martillo de Schmidt. El cálculo del índice de Calidad RQD (*Rock Quality Designation Index*) fue estimado en afloramiento a partir de la expresión empírica de Palmstrom (1975), que involucra el total de discontinuidades por metro cúbico (Jv).

Para determinar la calidad del macizo, se utilizó el índice GSI (Hoek y Brown, 1997) y el índice RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1979).

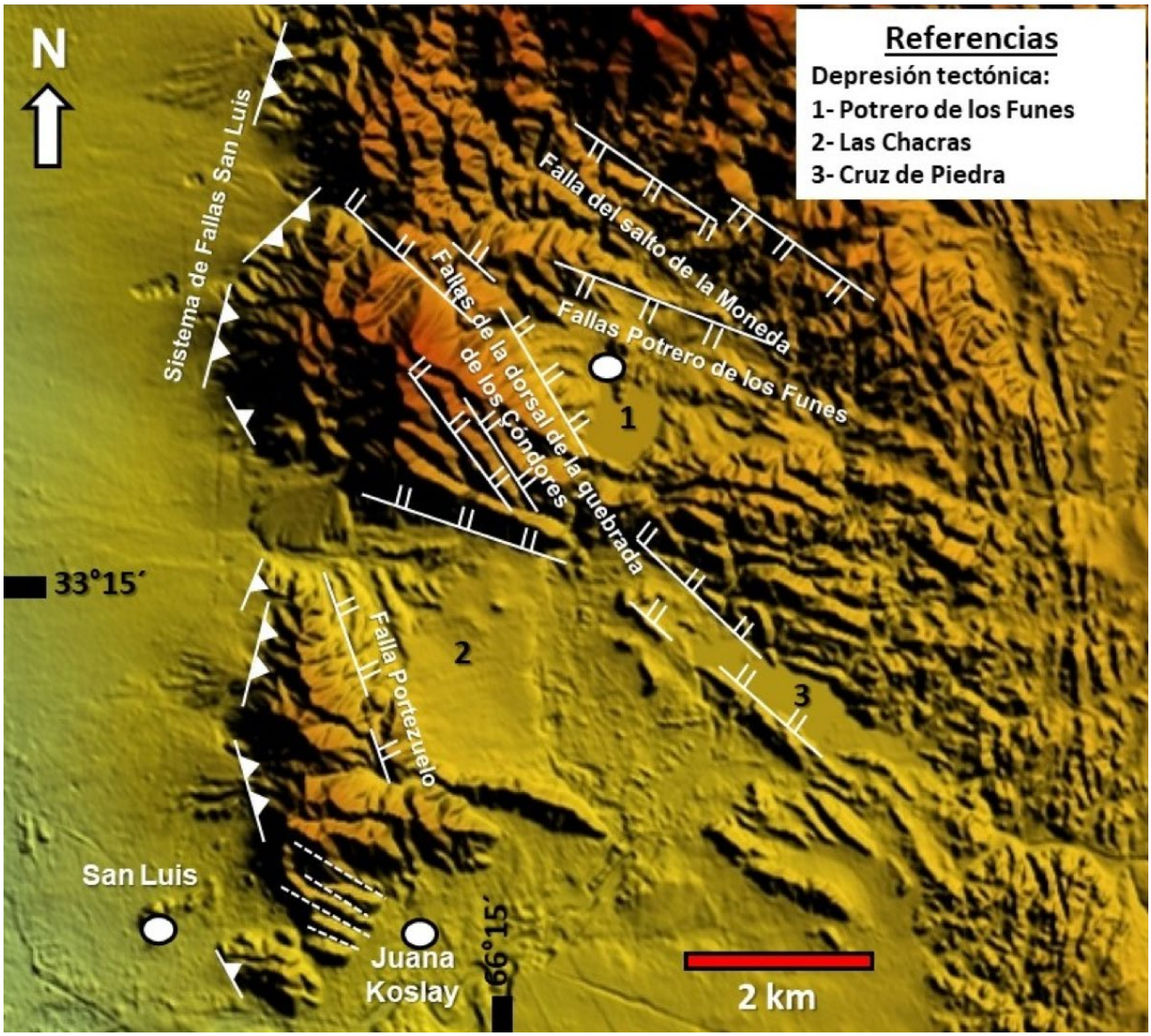


Fig. 2. Imagen DEM donde se muestran las diferentes depresiones tectónicas y su relación con las estructuras extensionales principales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de los parámetros geomecánicos analizados en los taludes de pre-corte involucrados en las trazas viales que limitan ambas depresiones, en relación a las condiciones de las estructuras extensionales, se puede sintetizar que predominan en los diferentes sectores espaciamiento entre 20 y 60 cm, persistencia menor al metro, rugosidad media y aberturas entre 1-10 mm, con un índice RQD de afloramiento entre 25 y 75%.

Respecto al tipo de rotura observadas en los taludes, predominan del tipo planar cuando coinciden la orientación de las estructuras respecto a la dirección e inclinación de la cara libre del talud, los que desarrollan deslizamientos traslacionales asociados a precipitaciones pluviales. En menor presencia lo siguen las roturas en cuña por la interacción que se desarrollan entre las discontinuidades secundarias con orientación transversal a las fallas normales. En algunos sectores, los taludes de pre-corte desarrollan rotura del tipo vuelco, como lo observado en el ingreso al Hotel Internacional de Potrero de los Funes en el camino del perilago homónimo y en la zona de la cuesta del Gato en la RPN° 20 en la margen norte de la traza vial.

Las figuras 3 y 4, destacan las características de los taludes de pre-corte, donde se observó roturas planares y sus movimientos gravitacionales asociados.

La Fig. 3a, muestra un sector asociado a la Falla Potrero de los Funes, sobre la margen sur del camino desde Potrero de los Funes hacia La Punta (coordenadas 33°12’39” S - 66°14’9” O). La Fig. 3b, describe el principal talud ubicado en la margen sur del camino del perilago de Potrero de los Funes (coordenadas 33°14’ S - 66°14’16” O), cuyas estructuras extensionales se asocian al sistema de fallas de la Dorsal de la quebrada de los Cóndores.

La Fig. 4a, muestra los problemas de inestabilidad de la margen austral de la RPN° 20 en el sector de la Cuesta del Gato con

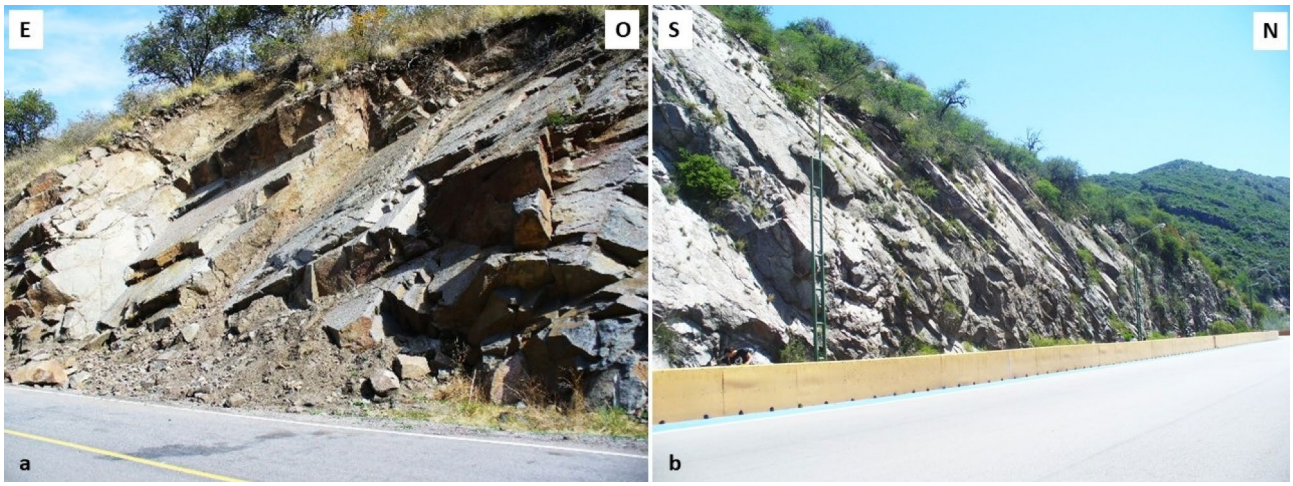


Fig. 3. a) Vista de un talud de pre-corte en un macizo granítico, afectado con el desarrollo de roturas planares, b) Vista de los taludes de pre-corte con dirección paralela a las fallas normales, en el camino del perilago del embalse Potrero de los Funes

deslizamientos planares de bloques graníticos (coordenadas 33°15'1" S - 66°12'55" O). En la margen septentrional de la ruta, se observó mecanismos de rotura por vuelco. Estas estructuras están relacionadas a la continuación del sistema de falla de la Dorsal de la Quebrada de los Cóndores (Fig. 2).

La Fig. 4b, muestra un talud sobre el camino del perilago del embalse de Cruz de Piedra, donde los planos de fallas normales presentan zonas de cizalla frágil, desarrollando disgregación mecánica en el macizo granítico (coordenadas 33°15'35" S - 66°12'16" O).

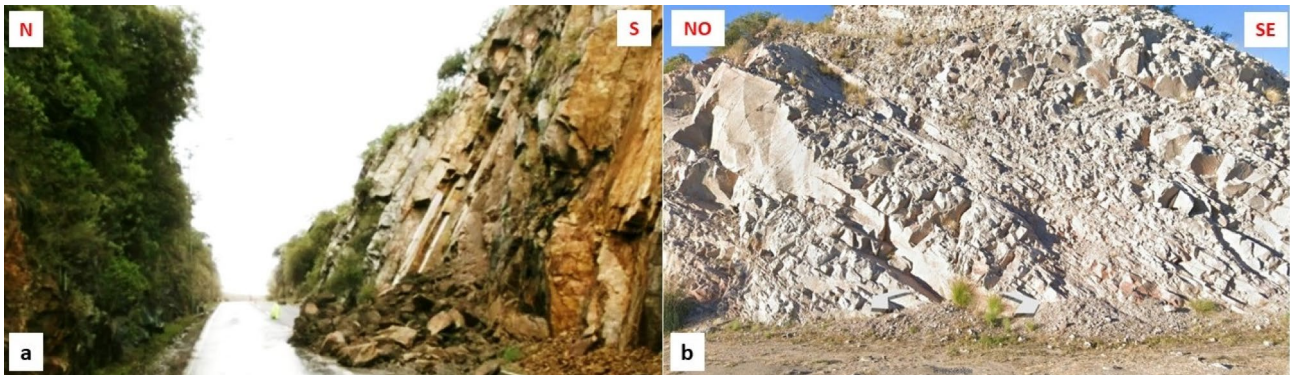


Fig. 4. a) Deslizamientos traslacional del tipo planar en la cuesta del Gato, autovía RPN° 20 (imagen obtenida del Diario de la República, 03/02/2015), b) Vista de un talud en el nuevo camino del perilago Cruz de Piedra, donde se observa un marcado trazo de las estructuras extensionales con fajas de cizalla frágil

CONCLUSIONES

Las fallas normales desarrolladas a partir de la tectónica extensional de esta región, generaron planos con bajo espaciamiento entre sí, con baja discontinuidad, que en algunos sectores fueron afectados por cizalla frágil.

Los planos, cuando coincide su orientación con la cara del talud, se desarrollan principalmente roturas del tipo planar, que en épocas de lluvias, los bloques se deslizan hacia la traza vial de manera traslacional. Cuando las fallas interactúan con otros sistemas de fracturas y los taludes de pre-corte tienen una disposición oblicua o transversal a las discontinuidades, se desarrollan roturas en cuña y planares. Por último, se reconocieron en menor medida roturas por vuelco en los granitos, pero que mantienen mayor estabilidad que los bloques deslizados.

Las condiciones geomecánicas analizadas en el macizo granítico en los diferentes sitios de ambas depresiones, permite definir que el comportamiento de la masa rocosa y sus discontinuidades, desarrollan similares condiciones geotécnicas. Esto surge de las clasificaciones geomecánicas del macizo, donde los resultados muestran similares condiciones.

Los sectores analizados, según el índice RMR corregido por orientación, presentan clase "muy mala" a "mala", y según el índice GSI, predominan los bloques irregulares con una condición del frente buena (BI/B).

REFERENCIAS

Bieniawski, Z.T. (1979). The Geomechanics classification in rock engineering applications. 2º Int. Congress on Rock Mechanics, vol. II. Suiza.

Costa, C. y Cortés, J. (1991). Tectónica extensional en el extremo sur de la sierra de San Luis. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo 3: 113-118.

Denaro, J. y Sales, D. (2021). Caracterización geomecánica de los taludes de la autovía RPN° 20, municipio de El Volcán, provincia de San Luis. Revista Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 47: 43-56. ISSN: 1851-7838.

Farioli, C. y Sales, D. (2014). Análisis geotécnico de taludes en el circuito de Potrero de los Funes, sur de la Sierra de San Luis. 19º Congreso Geológico Argentino, Actas en CD.

Hoek, E. y Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. Int. Journal of Rock Me-chanics and Mining Sciences. Elsevier, Vol. 34 (8): 1165-1186.

International Society for Rock Mechanics - ISRM (1981). Suggested methods for rock characteriza-tion, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

Lorca, f., Gardini, C. y Sales, D. (2021). Análisis geotécnico de los taludes del circuito del dique Cruz de Piedra, Provincia de San Luis. 1° Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Actas (Libro digital), ISBN 978-987-21766-6-2, pág. 367-373 y 84-85.

Morosini, A.F., 2011. El Granito la Escalerilla, Provincia de San Luis. Tesis Doctoral (Inédita). Universidad Nacional de San Luis.

Ojeda G., Lacreu, H. y Sosa, G. (2007). Geomorfología. Atlas de Recursos Geoambientales - Municipio de Potrero de los Funes. Ed. Laboratorio de Alternativas Educativas (LAE). http://lae.unsl.edu.ar/ . ISBN 978-987-23360-5-9. 57 p.

Palmstrom, A. (1975). Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Int. Report Ing. A.B. Berdel, A.S. Oslo, 62 pp.

Sales, D., Gardini, C. y Origlia, D. (2001). Caracterización geomecánica de taludes en Potrero de los Funes, Provincia de San Luis. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 16: 153-159. ISSN: 0326-1921.

GESTIONAR EL PRESENTE PENSANDO EN EL FUTURO DE LA ACTIVIDAD NUCLEAR: PROYECTOS DE DISPOSICIÓN FINAL PARA RESIDUOS RADIACTIVOS DE MUY BAJO Y BAJO NIVEL EN ARGENTINA

N. Sileo[1], I. Juárez[1], N. Grattone[1], F. Robledo[1]
[1]Depto. Investigación y Tecnología Aplicada e Ingeniería, PNGRR, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, Argentina
Mail de contacto: noeliasileo@gmail.com

RESUMEN
Desde el comienzo de la actividad nuclear en Argentina, en la década de 1950, la CNEA ha desempeñado un papel esencial en el estudio, desarrollo y uso pacífico de la energía nuclear, realizando actividades como la exploración y producción de uranio, la construcción de reactores de investigación y centrales nucleares, y la producción de radioisótopos. Estas actividades han dado lugar a la generación de combustibles gastados y distintos tipos de residuos radiactivos (RR) que presentan diferentes tiempos de vida media y niveles de radiactividad. Por ello, resulta imperioso implementar una solución eficaz y definitiva que contemple las necesidades actuales y a futuro respecto a la disposición final de los RR. A nivel internacional, los Repositorios Cercanos a la Superficie (RCES) son una solución efectiva y segura para gestionar RR de muy bajo y bajo nivel (RNMB y RNB).
En este marco, la CNEA ha iniciado proyectos para la construcción de RCES específicos utilizando distintos conceptos multibarrera para aislar los RR del ambiente y poblaciones cercanas. En el contexto del PEGRR (Plan Estratégico de la Gestión de Residuos Radiactivos) 2025-2050, se establecen metas como “Desarrollar estudios de prefactibilidad para el emplazamiento de repositorios”, y “Repositorios para residuos de nivel muy bajo y bajo”.
La metodología general de trabajo para el diseño, la construcción y puesta en operación de un RCES debe seguir una serie de etapas estructuradas en fases para garantizar la seguridad, eficiencia y cumplimiento con las regulaciones nacionales e internacionales. En este contexto, se ha propuesto desarrollar la primera etapa del proyecto ConfinAR CES en 6 fases, implementando un proceso de toma de decisiones escalonado y fundamentado en la participación activa de las partes interesadas. El presente anteproyecto busca desarrollar una solución definitiva para la disposición de los RR de baja y muy baja actividad mediante la construcción de repositorios cercanos a la superficie.

Palabras clave: Repositorios cercanos a la superficie, seguridad nuclear, residuos radiactivos de bajo y muy bajo nivel

ABSTRACT
Since the beginning of nuclear activity in Argentina in the 1950s, the National Atomic Energy Commission (CNEA) has played a key role in the research, development, and peaceful use of nuclear energy. Its activities include uranium exploration and production, the construction of research reactors and nuclear power plants, and the production of radioisotopes. These activities have led to the generation of spent fuel and various types of radioactive waste (RW) with different half-lives and levels of radioactivity. Therefore, it is essential to implement an effective and definitive solution that addresses both current and future needs regarding the final disposal of RW.
Near-Surface Disposal Facilities (NSDF) are a safe and effective solution for the management of very low-level and low-level waste (VLLW and LLW). Within this framework, the CNEA has initiated projects for the construction of specific NSDFs using different multi-barrier concepts to isolate RW from the environment and nearby populations.
In the context of the PEGRR 2025–2050 (National Radioactive Waste Management Plan), goals have been set such as to “Develop pre feasibility studies for repository siting” and “Repositories for very low- and low-level waste.” The general methodology for the design, construction, and commissioning of an NSR must follow a series of structured phases to ensure safety, efficiency, and compliance with national and international regulations. In this context, the first stage of the ConfinAR CES project has been proposed in six phases, implementing a step-by-step decision-making process based on the active participation of stakeholders. This preliminary project seeks to develop a definitive solution for the disposal of very low- and low-level radioactive waste through the construction of near-surface repositories.

Keywords: Near Surface Disposal Facilities, Nuclear Safety, very low and low level Radioactive Waste.

INTRODUCCIÓN

La actividad nuclear en la República Argentina comenzó en la década de 1950 con la creación de la CNEA la cual, desde entonces, ha desempeñado un papel esencial en el estudio, desarrollo y uso pacífico de la energía nuclear. Actualmente, la actividad nuclear cuenta con instituciones y empresas estatales y privadas dedicadas a la exploración, la producción de uranio, la investigación aplicada, la formación de recurso humano, la construcción de reactores de investigación y centrales nucleares, la producción de radioisótopos y sus aplicaciones en medicina nuclear y la industria distribuidas a lo largo del territorio nacional (Figura 1).



Figura 1: Distribución de las actividades de la CNEA en el territorio nacional. (Modificado de CNEA, Usos de la Energía Nuclear, s.f.).

Estas actividades han dado lugar a la generación de combustibles gastados (CG) y distintos tipos de RR que presentan diferentes tiempos de vida media y niveles de radiactividad.

La gestión de RR y CG requiere la implementación de un enfoque riguroso y sistemático. Distintos países han desarrollado soluciones para la disposición final de RR de muy bajo y bajo nivel en RCES a profundidades de entre 30 y 50 m, y de medio y alto nivel en repositorios geológicos a profundidades de entre 450 y 1000 m, así como para el almacenamiento de CG. En este marco, y con el fin de cumplir con los objetivos estratégicos establecidos en el PEGRR 2025-2050, la CNEA a través del PNGRR, ha iniciado proyectos para la construcción de repositorios específicos utilizando conceptos multibarrera para aislar los RR del ambiente, garantizando una disposición segura, eficiente y en conformidad con las normativas nacionales e internacionales, minimizando el impacto ambiental y protegiendo la salud pública a largo plazo.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en la guía SSG-35 establece los lineamientos necesarios a seguir para la caracterización y selección de sitios destinados a la operación de instalaciones nucleares. En el mismo se detallan las distintas etapas del proyecto y las fases y actividades a llevar a cabo (Figura 2).

El Proyecto ConfinAR CES busca desarrollar una solución definitiva para la disposición de los RR de bajo y muy bajo nivel generados en la República Argentina mediante la construcción de RCES.

En particular, este proyecto se desarrollará durante la Etapa Pre-Operativa (CNEA, 2025).

MATERIALES Y MÉTODOS

En Argentina, la gestión de RR de muy bajo, bajo, medio y alto nivel se lleva a cabo a través de proyectos y programas liderados

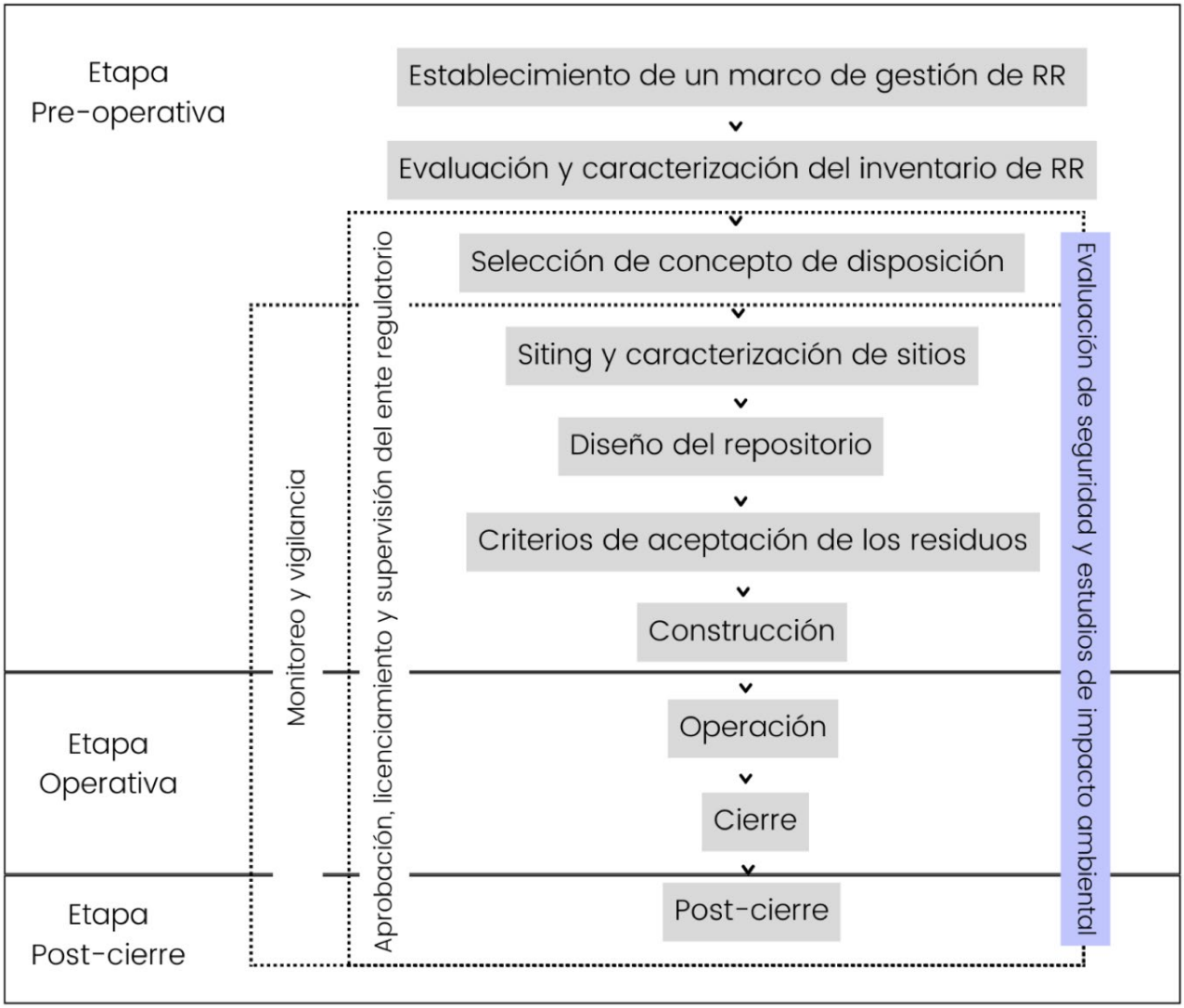


Figura 2. Etapas de un proyecto de disposición final de residuos radiactivos según los lineamientos del OIEA. Modificado a partir del documento SSG-35 (OIEA, 2015).

por la CNEA. Desde 1980, la CNEA ha trabajado en diferentes proyectos para desarrollar soluciones seguras para la disposición final de los RR, en consonancia con las prácticas internacionales.

El Proyecto ConfinAR CES se diseñó en función de las etapas y fases citadas en la Figura 3, mediante un proceso de toma de decisiones escalonado basado en la metodología PRISM (IAEA, 2012). Este enfoque asegura que cada fase del proyecto se gestione de manera rigurosa y transparente, integrando las opiniones e inquietudes de todos los actores involucrados. La etapa Pre-Operativa consta de 6 fases que se llevarán a cabo de manera simultánea y consecutiva contemplando ciertos plazos estipulados. Durante la fase inicial, se define la estrategia que regirá la forma de llevar a cabo el proyecto. A continuación, se realiza un estudio a nivel regional de potenciales áreas de interés, lo que da lugar a la pre-selección de 2 o 3 sitios nominados en donde se realizará la caracterización detallada para evaluar la idoneidad de los sitios.

La caracterización detallada de los sitios nominados contemplará la realización de diferentes estudios y evaluaciones del ambiente, como, por ejemplo: estudios geológicos (estratigrafía, petrografía), hidrológicos, geoquímicos, geotécnicos, geofísicos, sísmicos, erosión/sedimentación, meteorización/transporte, meteorológicos, flora, fauna y actividades humanas. Durante esta fase, también se desarrollará el diseño de la infraestructura de ingeniería del repositorio, considerando tanto las características del sitio como el inventario de los residuos a disponer. A partir de la implementación de esta metodología se determinaron una serie de criterios para la selección de potenciales sitios nominados.

RESULTADOS

Para el Proyecto ConfinAR CES se sugieren dos sitios candidatos a partir de los 5 criterios específicos descritos a continuación.

1.Cercanía de los sitios a las centrales nucleares: La propuesta de emplazar los repositorios en las cercanías de las centrales

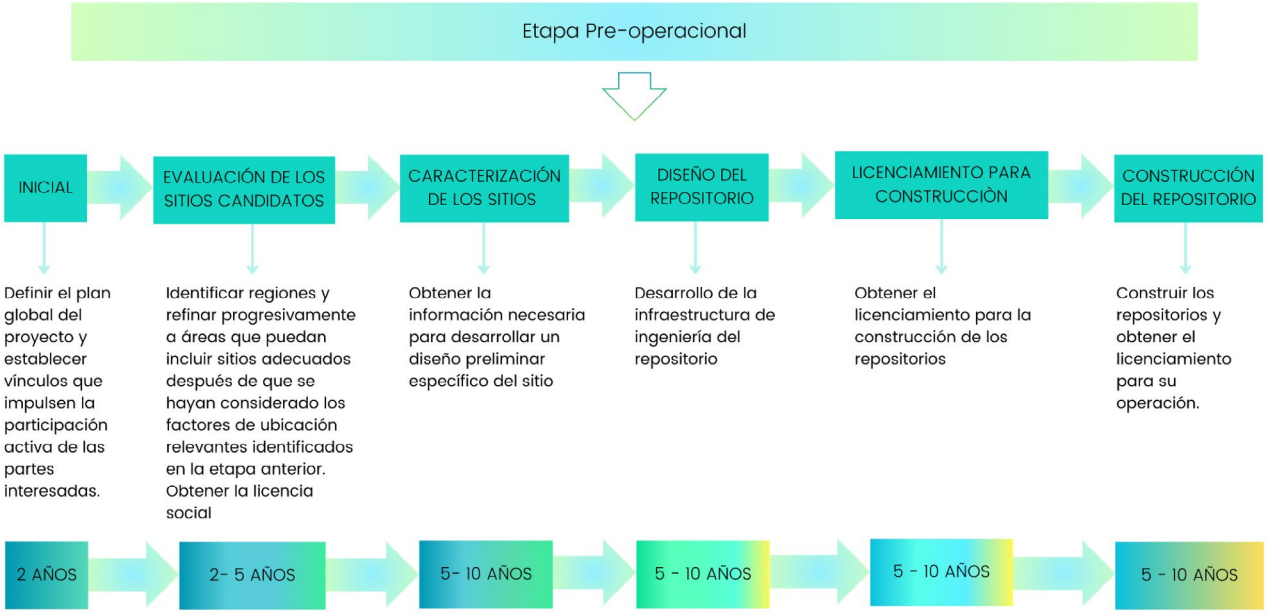


Figura 3: Fases, objetivos y plazos de la etapa Preoperacional del Proyecto ConfinAR CES.

nucleares se fundamenta en que, una vez comenzado el periodo de desmantelamiento, se generarán grandes volúmenes de RR de baja y muy baja actividad. Los sitios seleccionados, cercanos a las centrales, evitarán la movilización de dicho material radiactivo a grandes distancias, desde su ubicación actual, favoreciendo la seguridad física y quedando las actividades enmarcadas dentro de las normativas legales. Asimismo, estos sitios cuentan con personal altamente capacitado (*know-how*) en construcción y operación de instalaciones nucleares, así como en seguridad radiológica.

2. Seguridad física nuclear: Los sitios candidatos cuentan con un historial de control institucional activo que, para el caso de las centrales nucleares se extenderá por un período no menor a los 50 años, lo que garantiza una gestión sólida y consistente en materia de seguridad radiológica.

3. Información disponible de los sitios: Se dispone de información ambiental preexistente derivada de los estudios de impacto ambiental, evaluaciones de seguridad y monitoreos continuos realizados en cada central nuclear, así como también publicaciones científicas en revistas internacionales sobre geomorfología, geología e hidrología. Estos datos proporcionan una base fundamental para el diseño y la construcción de los repositorios.

4. Marco normativo e infraestructura vial: Gran parte de las provincias se proclaman en su Constitución o mediante Leyes Provinciales, cómo zonas "no nucleares", prohibiendo el transporte y almacenamiento transitorio o permanente de RR, así como la construcción y operación de repositorios destinados a ese fin. A su vez, se suma la falta o deterioro de la infraestructura vial adecuada para realizar el transporte de grandes volúmenes de RR desde las centrales hacia otros posibles sitios de disposición final. Esto constituye otro desafío significativo en la selección de otros potenciales sitios para la implementación de los repositorios.

5. Costos: La construcción de los repositorios en las cercanías de las centrales nucleares excepcionará de los costos asociados al transporte, al desarrollo y/o mejora de la red vial, haciendo que la propuesta sea más eficiente desde el punto de vista económico. A su vez, la proximidad a las centrales nucleares optimizará no solo la gestión de los residuos, sino también la movilidad del personal y de las empresas proveedoras de bienes y servicios, reduciendo tanto los riesgos y los peligros como los costos operativos, al facilitar un control más efectivo.

Los sitios pre-seleccionados se encuentran en etapa de evaluación, por parte de la División Disposición Final (CNEA- Operador) y NASA (generador).

En etapas posteriores la CNEA, deberá desarrollar diferentes actividades, como consultas públicas, muestreos participativos, entre otras; con el objetivo de involucrar a la comunidad en el proyecto, y así obtenerla licencia social y la licencia de construcción de la instalación por parte del organismo regulador (ARN) (Figura 4).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La CNEA, cómo autoridad de aplicación de la Ley N°25018 y operador, es responsable de la adecuada gestión de los RR a través del PNGRR, creado mediante dicha ley. El proyecto ConfinAR CES contempla las actividades a ser desarrolladas durante la etapa pre-operativa, la cual abarca desde el desarrollo del plan de trabajo hasta la obtención de la licencia de operación, con el propósito de implementar dos RCES destinados a la disposición final de RR de muy bajo y bajo nivel. El mismo tiene como objetivo garantizar el aislamiento efectivo de los residuos respecto a la biósfera, cumpliendo con los niveles requeridos por las normativas vigentes para



Figura 4: Actividades para determinar la idoneidad del sitio seleccionado para la construcción de un RCES.

garantizar la seguridad radiológica y física, a fin de proteger la salud humana y el ambiente. Es por esto que para identificar posibles impactos ambientales, que sirvan a la evaluación e informe de seguridad, es fundamental contar con una línea de base ambiental del sitio, previa al emplazamiento, que permitirá el desarrollo de modelos conceptuales y numéricos del funcionamiento del sitio. Para ello, es esencial definir con precisión los límites de cada modelo, seleccionar herramientas numéricas adecuadas y conocer en detalle el medio físico donde ocurren los procesos de transferencia.

Para lograrlo será necesario conformar equipos de trabajo ad hoc integrados tanto por personal de las diferentes gerencias de área de la CNEA, Universidades Nacionales Públicas y Privadas, y Organismos de Ciencia y Técnica. Además, participarán contratistas, subcontratistas y diversos actores sociales (ej.: asociaciones de profesionales, entes gubernamentales, ONGs, entre otros actores).

REFERENCIAS

Comisión Nacional de Energía Atómica. (s.f.). Usos de la Energía Nuclear. Ministerio de Economía. Recuperado el 3 de Julio de 2025 de https://www.argentina.gob.ar/energia/energia-electrica/energia-nuclear/usos

Comisión Nacional de Energía Atómica (2025). Anteproyecto Confinar CES. Inédito.

Noelia R. Sileo, Natalia I. Grattone. (2024). La hidrogeología como disciplina clave en la selección de sitios para la construcción de repositorios de residuos radiactivos en Argentina. XVI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y XII Congreso Argentino de Hidrogeología. En Hidroquímica, calidad y contaminación; Compilación de Daniel Martínez; Eduardo Mariño. - 1a ed. compendiada. - Santa Rosa: Editorial de la Universidad Nacional de La Pampa.

International Atomic Energy Agency (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA, Vienna, Austria.

International Atomic Energy Agency (2015). Site Survey And Site Selection For Nuclear Installations. IAEA Safety Standards Series No. SSG-35, IAEA, Vienna, Austria.

CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DEL LAGO FAGNANO: IMPLICANCIAS PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Fernando Almaraz[1,2], Juan Martín Calvagno[1,3], Christian Ekmekdjan[1,2]
[1]Tango Geosciences, Buenos Aires, Argentina.
[2]Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Depto. de Ciencias Geológicas, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria (Pabellón II, Piso 1), CP 1428, Buenos Aires, Argentina.
[3]CONICET–Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGeBA), Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria (Pabellón II, Piso 1), CP 1428, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: almarazfrn@gmail.com

RESUMEN
La cuenca del Lago Fagnano, ubicada en el extremo sur de la cordillera de los Andes y compartida entre Argentina y Chile, presenta condiciones geomorfológicas, tectónicas y climáticas que favorecen la ocurrencia de procesos de remoción en masa. En este trabajo se presenta un modelo de susceptibilidad a dichos procesos, basado en el análisis multicriterio de factores morfométricos, litológicos, estructurales y climáticos, integrados mediante herramientas SIG y procesamiento geoespacial. Se utilizaron modelos digitales de elevación del terreno, mapas geológicos, zonificaciones sísmicas e información climática para elaborar un mapa categorizado en tres clases de susceptibilidad. La metodología utilizada, basada en la ponderación de factores pasivos y activos, permite la replicabilidad del estudio en cuencas de características similares. Los resultados muestran una distribución diferenciada de áreas de baja, media y alta susceptibilidad, que representan un insumo valioso para la gestión del riesgo, la planificación territorial y la evaluación de infraestructuras en zonas montañosas activas.

Palabras clave: remoción en masa, modelo de susceptibilidad, SIG, Andes Fueguinos, planificación territorial.

ABSTRACT
The Fagnano Lake basin, located at the southernmost end of the Andes belt and shared by Argentina and Chile, presents geomorphological, tectonic, and climatic conditions that favor the occurrence of landslides. This study presents a susceptibility model based on a multicriteria analysis of morphometric, lithological, structural, and climatic factors, integrated using GIS tools and geospatial processing. Digital elevation models, geological maps, seismic zonation, and climatic information were used to generate a three-class susceptibility map. The methodology, based on the weighting of passive and active factors, allows replication of this study in similar basins. Results show a differentiated distribution of low, medium, and high susceptibility zones, offering a valuable input for risk management, territorial planning, and infrastructure evaluation in tectonically active mountain regions.

Keywords: landslides, susceptibility model, GIS, Fuegian Andes, land-use planning.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Lago Fagnano, situada en la región austral de los Andes Fueguinos, constituye un entorno geológico de alta complejidad, resultado de la interacción entre procesos tectónicos, glaciarios y climáticos. Dicha cuenca es atravesada por el Sistema de Fallas Magallanes-Fagnano (SFMF) y se caracteriza por un entorno geodinámicamente activo, con fuertes pendientes, elevada cantidad de precipitaciones y una sismicidad frecuente asociada a este sistema de fallas. Estas condiciones combinadas favorecen el desarrollo de procesos de remoción en masa (Keefer, 1994; Dadson et al., 2004; Sabbione et al., 2007; Rabassa et al., 2011).

Estos procesos, además de modelar activamente el paisaje, representan amenazas latentes para comunidades, infraestructuras y ecosistemas. La expansión de actividades turísticas, urbanas y viales en la región ha incrementado la necesidad de generar herramientas que permitan evaluar y gestionar adecuadamente este tipo de riesgo geológico. Sin embargo, la información sistematizada y actualizada sobre estos fenómenos en la cuenca aún es limitada (Klepeis, 1994a, 1994b; Costa et al., 2006; Onorato et al., 2020; Fernández et al., 2021).

Este trabajo presenta una evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa mediante un abordaje espacial sis-

temático apoyado en herramientas SIG de libre acceso, con énfasis en las condiciones físicas y ambientales del terreno. El objetivo principal es generar un mapa de susceptibilidad que funcione como insumo para la planificación territorial, la gestión ambiental y la reducción del riesgo (Van Westen et al., 2008; Chae y Kim, 2013; Corominas et al., 2014; Hungr et al., 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

La susceptibilidad a los procesos de remoción en masa representa la probabilidad relativa de que un deslizamiento ocurra en un área determinada, como resultado de las condiciones del terreno y la acción de factores desencadenantes específicos (Brabb, 1984; Guzzetti et al., 2006). Se adoptó una metodología de análisis multicriterio que considera distintos condicionantes físicos del medio —incluyendo aspectos geomorfológicos, geológicos y climáticos— con el fin de delimitar áreas potencialmente inestables dentro de la cuenca del Lago Fagnano.

El análisis morfométrico permitió caracterizar la cuenca —que se extiende entre los territorios de Argentina y Chile— a partir de variables como las siguientes: pendiente, orientación de laderas, altitud y rugosidad del terreno, fundamentales para interpretar su dinámica y estado evolutivo (Senciales González, 1999; Gaspari, 2012). Se utilizó el modelo digital de elevación ALOS World 3D, con resolución de 30 m, disponible en la plataforma de observación terrestre de la Agencia Espacial Japonesa (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm).

El procesamiento se realizó en QGIS 3.40 (QGIS.org, 2025), utilizando tanto herramientas nativas como complementarias como SAGA GIS (Conrad et al., 2015) y Whitebox Tools (Lindsay, 2016). Se generaron mapas de pendiente reclasificados en intervalos de 2,5°, orientación de laderas y rugosidad como indicador de variabilidad topográfica (Grohmann et al., 2011).

Para integrar las variables geológicas, se elaboró un mapa digital a partir de estudios previos (Klepeis, 1994a, 1994b; Menichetti et al., 2008; Zanolla et al., 2011; Martinioni et al., 2013; Palotti et al., 2013; Esteban et al., 2014; Lozano et al., 2018a, 2018b, 2020), incorporando unidades litológicas y estructuras relevantes.

El modelo combina dos grupos de factores (Tabla 1): los Factores Pasivos (FP) y los Factores Activos (FA). Los primeros representan las condiciones intrínsecas del terreno que predisponen a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, incluyendo pendiente, rugosidad, litología, cercanía a estructuras tectónicas y proximidad a cursos de agua. En cambio, los segundos, son los agentes externos capaces de activar movimientos, como la precipitación media anual y la aceleración sísmica esperada.

La zonificación sísmica utilizada proviene del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, https://www.inpres.gob.ar). Cada variable fue reclasificada, ponderada y convertida a ráster con resolución uniforme. Las ponderaciones fueron asignadas según los criterios de Fernández et al. (2021), combinándose en un índice integrado de susceptibilidad expresado mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\Sigma_i^n (FP_i * P_i)}{n} * \frac{\Sigma_j^m (FA_j)}{m} \qquad (1)$$

Donde FP_i representa cada factor pasivo con su peso relativo P_i, n es el número total de factores pasivos, FA_j representa cada factor activo, y *m* es la cantidad de factores activos.

El resultado se clasificó en tres niveles de susceptibilidad —baja, media y alta— siguiendo los enfoques de Soeters y Van Westen (2005) y su adaptación por Chae y Kim (2013).

Las zonas de baja susceptibilidad corresponden a áreas estables con pendientes suaves y baja rugosidad, alejadas de estructuras activas (Van Westen et al., 2008). Sin embargo, se ha observado que procesos profundos de remoción en masa (*deep-seated landslides*) pueden desarrollarse incluso en contextos tectónicamente inactivos, debido a condiciones geomorfológicas y estructurales heredadas (Pánek et al., 2022).

Las zonas de susceptibilidad media presentan complejidad topográfica intermedia y riesgo moderado, condicionado por variables locales (Guzzetti et al., 2006; Zhao et al., 2023).

Finalmente, las zonas de alta susceptibilidad se asocian a pendientes abruptas, litologías inestables y proximidad a zonas de deformación activa, factores que aumentan significativamente el potencial de ocurrencia de procesos de remoción en masa (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa elaborado para la cuenca del Lago Fagnano permite clasificar el área de estudio en tres niveles: baja, media y alta susceptibilidad (Figura 1). Esta zonificación proporciona una representación espacial clara de los sectores con mayor propensión a la inestabilidad del terreno y constituye una herramienta fundamental para la planificación territorial y la gestión ambiental en un contexto de creciente presión antrópica.

FACTORES UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LA REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DEL LAGO FAGNANO				
FACTOR	**PARÁMETRO**	**PESO PONDERADO**	**CATEGORÍA**	**VALOR**
Pasivos	Pendiente	35%	Baja	0-10°
			Media	10-30°
			Alta	>30°
	Rugosidad (Basado en el Índice de Variabilidad Topográfica)	10%	Baja	<4
			Media	4-8
			Alta	>8
	Susceptibilidad Litológica	25%	4	Fm. Beauvoir (Más susceptible): Pizarras y lutitas con intercalaciones de areniscas finas.
			3	Fm. Bahía Thetis y Yaghan: Fangolitas, tobas y areniscas, con intercalaciones de pelitas y volcanitas tobáceas.
			2	Fm. Lemaire y Leticia: Rocas epiclásticas (turbiditas, conglomerados, chert), volcaniclásticas y areniscas líticas/tobáceas con pelitas.
			1	Cuaternario e Intrusivos (Menos susceptible): Depósitos glaciolacustres, morrenas y aluviales no consolidados, e intrusivos ígneos diversos.
	Proximidad a estructuras tectónicas	20%	3	100 m (Mayor proximidad)
			2	100-500 m
			1	>500 m (Menor proximidad)
	Proximidad a cursos fluviales	10%	4	100 m (Mayor proximidad)
			3	100-200 m
			2	200-400 m
			1	>400 m (Menor proximidad)
Activos	Zonificación Sísmica (Basado en la aceleración del suelo)	50%	Zona 0	<0,04 g
			Zona 1	0,04-0,1 g
			Zona 2	0,1-0,18 g
			Zona 3	0,18-0,25 g
			Zona 4	0,25-0,35 g
	Precipitación Anual Local	50%	Muy Débil	<300 mm
			Débil	300-600 mm
			Moderada	600-1.000 mm
			Fuerte	1.000-1.500 mm
			Muy Fuerte	1.500-2.000 mm
			Extrema	>2.000 mm

Tabla 1. Factores utilizados para la evaluación de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en la cuenca del Lago Fagnano.

La superficie total evaluada alcanza aproximadamente 2.801 km². De este total, un 3% (91 km²) corresponde a zonas de baja susceptibilidad, un 73% (2.030 km²) a zonas de susceptibilidad media, y un 24% (680 km²) a áreas con alta susceptibilidad. Esta distribución refleja el fuerte control que ejercen variables como la pendiente, la rugosidad, la litología y la cercanía a estructuras geológicas activas sobre los procesos gravitacionales en el ámbito de la cuenca.

Las zonas de baja susceptibilidad se caracterizan por presentar pendientes suaves, baja rugosidad topográfica y una menor influencia de estructuras geológicas activas. Estas áreas se concentran principalmente en el sector oriental de la cuenca, tanto al norte como al sur del lago, donde el relieve es más regular y menos abrupto.

Las zonas de susceptibilidad media, que constituyen la mayor parte del territorio analizado, corresponden a sectores de transición entre áreas planas y montañosas. En estos sectores, las condiciones geomorfológicas y litológicas pueden favorecer la ocurrencia de procesos de remoción en masa, aunque no de forma sistemática. Estas zonas se ubican principalmente en la franja central de la cuenca, en ambas márgenes del Lago Fagnano.

Por su parte, las zonas de alta susceptibilidad se concentran en sectores con pendientes marcadas, litologías con baja cohesión o alta meteorización como lutitas, pizarras, limolitas y depósitos glaciolacustres no consolidados, y cercanía a estructuras tectónicas activas. Se destacan en este sentido la ladera sur de las Sierras de Beauvoir y el sector centro-occidental del bloque montañoso

ubicado al sur del lago, donde coinciden pendientes superiores a 30° y que en algunos casos alcanzan los 45°, contrastes altitudinales abruptos de hasta 800 metros y una geología compleja.

El modelo de susceptibilidad generado fue contrastado con un inventario de procesos de remoción en masa elaborado previamente (no incluido aquí), y se observó una correspondencia espacial significativa entre las zonas clasificadas como de alta susceptibilidad y los eventos registrados en dicho inventario. Esta coincidencia refuerza la validez del enfoque metodológico adoptado y su utilidad como herramienta predictiva a escala regional.

La Figura 1 permite visualizar también la localización relativa de elementos clave del territorio, como la red vial, localidades, parajes y puntos de recreación. En cuanto a los parajes y puntos de recreación, estos se encuentran mayoritariamente ubicados en zonas de susceptibilidad baja o media, lo cual sugiere una localización históricamente asociada a sectores con menor riesgo geodinámico.

Respecto a la infraestructura vial, el sector argentino de la cuenca incluye tramos de la Ruta Nacional 3 (RN3) y la Ruta Provincial H (RPH), ambas atravesando zonas clasificadas como de media y alta susceptibilidad. En el sector chileno, la Ruta Y-85 (RY-85) recorre principalmente zonas de alta susceptibilidad, lo que plantea una posible exposición a procesos de remoción en masa, especialmente en condiciones de saturación de fluidos o sismicidad elevada.

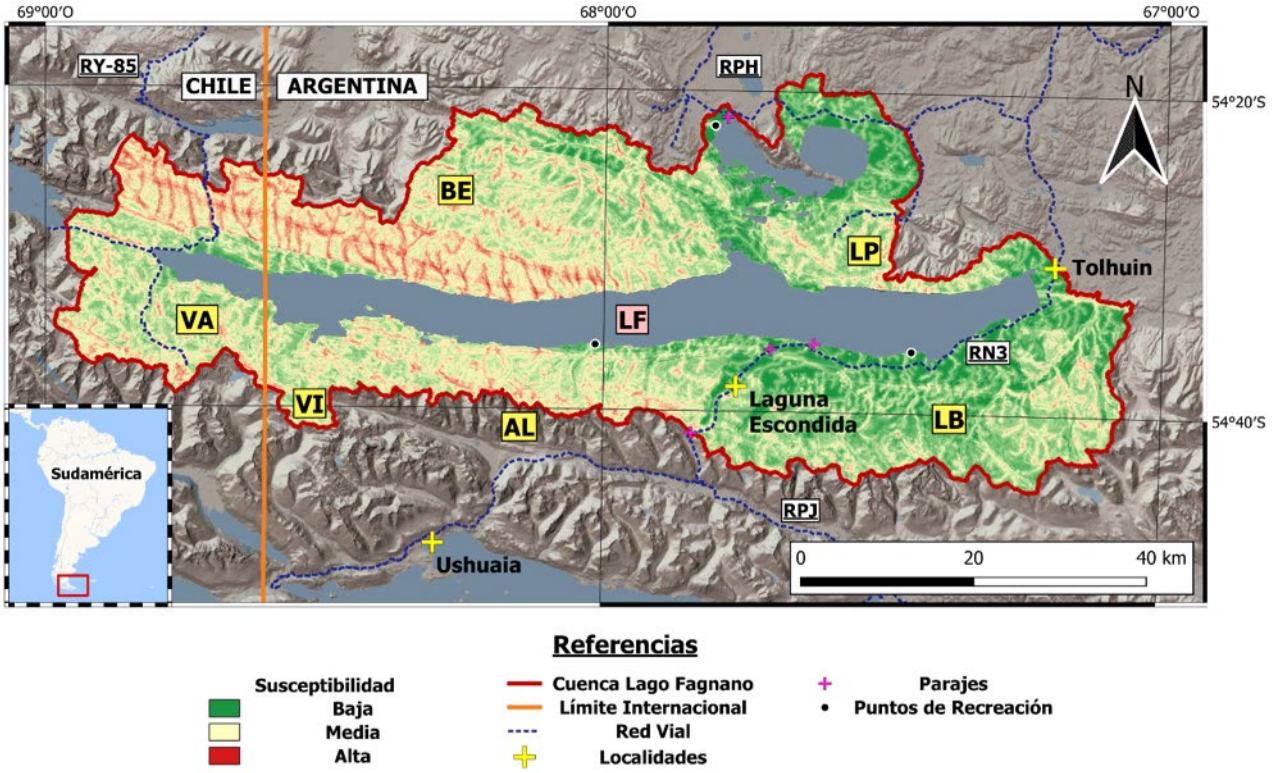


Figura 1. Mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa para la cuenca del Lago Fagnano. AL: Sierra de Alvear. BE: Sierra de Beauvoir. LB: Sierra de Lucas Bridges. LF: Lago Fagnano. LP: Sierra de Las Pinturas. RN3: Ruta Nacional 3. RPH: Ruta Provincial H. RPJ: Ruta Provincial J. RY-85: Ruta Y-85. VA: Sierra de Valdivieso. VI: Sierra de Vinciguerra. EPSG: 4326.

En cuanto a los centros poblados, Tolhuin y el núcleo urbano cercano a Laguna Escondida se localizan dentro de zonas categorizadas como de susceptibilidad media a baja, lo cual resulta favorable en términos de exposición relativa al riesgo, aunque sin excluir la necesidad de medidas preventivas en sectores específicos de su periferia.

Desde una perspectiva aplicada, el mapa generado constituye un insumo estratégico para el ordenamiento territorial y la gestión ambiental de la cuenca. Su utilidad resulta particularmente relevante en un espacio donde convergen valores ecológicos significativos, corredores de transporte, desarrollos turísticos y expansión urbana. La identificación de sectores con alto potencial de ocurrencia de procesos de remoción en masa permite orientar decisiones sobre el uso de la tierra, definir zonas de exclusión o regulación, y evaluar riesgos en relación con proyectos de infraestructura o nuevas urbanizaciones.

Este tipo de cartografía puede integrarse a instrumentos de planificación local y regional, sirviendo como base técnica para la elaboración de reglamentaciones urbanísticas, estudios de impacto ambiental y proyectos de obras públicas. En zonas críticas —como aquellas próximas a rutas, sectores con antecedentes documentados de remoción en masa que sugieren pendientes activas, o corredores naturales sensibles— se recomienda aplicar una combinación de medidas de prevención estructural (estabilización de taludes, drenaje, obras de contención) y de prevención no estructural (monitoreo geotécnico, capacitación comunitaria, sistemas de alerta temprana).

Desde el enfoque de la gestión ambiental, la zonificación obtenida resulta útil para priorizar acciones de conservación de suelos,

restauración de ecosistemas degradados y limitación del acceso humano en sectores identificados como potencialmente peligrosos. Esto cobra especial relevancia en un contexto donde la actividad antrópica, si no es adecuadamente planificada, puede agravar procesos de erosión, colapso o inestabilidad ya presentes.

En suma, el modelo de susceptibilidad propuesto no solo ofrece una lectura geotécnica del territorio, sino que también aporta insumos concretos para una gestión integrada del riesgo y del ambiente, orientada a un desarrollo territorial más seguro, equilibrado y sustentable.

CONCLUSIONES

El análisis de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la cuenca del Lago Fagnano permitió identificar patrones espaciales fuertemente condicionados por variables topográficas, litológicas y estructurales. Las zonas de susceptibilidad media constituyen la categoría predominante en la cuenca, mientras que las áreas de alta susceptibilidad se localizan principalmente en sectores con pendientes marcadas y geología compleja, como la ladera sur de las Sierras de Beauvoir y la región centro-occidental ubicada al sur del lago. Las zonas de baja susceptibilidad se restringen mayoritariamente al sector oriental, donde el relieve es más suave y menos accidentado.

El modelo desarrollado constituye una herramienta técnica robusta para la identificación de sectores críticos con propensión a procesos gravitacionales, y representa un insumo estratégico para la planificación del territorio, el diseño de infraestructura y la gestión integral del riesgo. Los resultados obtenidos permiten jerarquizar áreas prioritarias, establecer criterios diferenciales de uso del suelo y definir estrategias de mitigación acordes al nivel de susceptibilidad.

La metodología aplicada —basada en un enfoque multicriterio que integra factores condicionantes y desencadenantes— ofrece además la posibilidad de ser replicable en otras regiones con características fisiográficas y geológicas comparables, en particular en los Andes del sur de Argentina y Chile. Su potencial de aplicación regional la convierte en una herramienta valiosa para la evaluación preliminar del riesgo geodinámico en ambientes montañosos.

Desde una perspectiva transfronteriza, el análisis revela que los sectores argentino y chileno de la cuenca comparten tanto condiciones físicas similares como desafíos comunes en términos de gestión del riesgo, monitoreo geodinámico y conservación ambiental. Esto refuerza la necesidad de avanzar hacia esquemas de cooperación binacional, que contemplen una planificación integrada de cuencas compartidas sujetas a alta dinámica natural.

En síntesis, y considerando la elevada sensibilidad ecológica y geodinámica del área, resulta clave que los resultados de este estudio se integren a las políticas locales y regionales de ordenamiento territorial, conservación ambiental y gestión del riesgo. La incorporación activa de este tipo de información en la toma de decisiones contribuirá a consolidar un modelo de desarrollo más resiliente, sostenible y territorialmente equilibrado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Buenos Aires (UBA), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a los equipos docentes y técnicos que acompañan nuestras etapas de formación. En el contexto actual que atraviesan el país y el sector académico, consideramos fundamental reafirmar la importancia de garantizar el acceso a una educación pública, gratuita y de calidad, así como el sostenimiento institucional de la investigación científica, tanto básica como aplicada. Valoramos profundamente el compromiso de las instituciones que hacen posible generar conocimiento al servicio de la sociedad.

REFERENCIAS

ALOS World 3D. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Recuperado el 6 de junio de 2025 de https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm

Brabb, E. E. (1984). The definition of landslide susceptibility and its application to planning and zoning. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, 1, 4-15.

Chae, R. A. y Kim, S. W. (2013). Landslide susceptibility zonation using GIS: A case study of the Langtang Valley, Nepal. Journal of Mountain Science, 10(1), 50-61. https://doi.org/10.1007/s11629-013-2517-5

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. y Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v.2.1.4. Geoscientific Model Development, 8, 2271-2312. https://doi.org/10.5194/gmd-8-2271-2015

Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. y Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 209-263. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Costa, C., Smalley, J. R., Schwartz, D., Stenner, H., Ellis, M., Ahumada, E. y Velasco, M. (2006). Paleoseismic observations of an onshore transform boundary: The Magallanes-Fagnano Fault, Tierra del Fuego, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 61(4), 647-657.

Dadson, S., Hovius, N., Chen, H., Dade, W., Hsieh, M., Willett, S., Hu, J., Horng, M., Chen, M., Stark, C., Lague, D. y Lin, J. (2004). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan Orogen. Nature, 426, 648-651. https://doi.org/10.1038/nature02150

Esteban, F. D., Tassone, A. A., Lodolo, E., Menichetti, M., Lippai, H., Waldmann, N., Darbo, A., Baradello, L. y Vilas, J. F. (2014). Basement geometry and sediment thickness of Lago Fagnano (Tierra del Fuego). Andean Geology, 41(2), 293-313.

Fernández, D. S., Coppolecchia, M., Balbi, A. B., Barber, E. L. G., Bedmar, J. M., Boujon, P. S., Cabrera, N. R., Chávez, R. A., Elissondo, M., Jones, M. E., Kaufman, J. F., Pereyra, F. X., Rosas, M. A., Róvere, E. I., Tello, N. E., Tobío, M. I., Villegas, D. C. y Tejedo, A. G. (2021). Normativa para la cartografía de peligrosidad geológica de la República Argentina a escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino.

Gaspari, F. J. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo Congreso de Medio Ambiente AUMG (La Plata).

Grohmann, C. H., Riccomini, C. y Chamani, M. (2011). Regional scale analysis of landform configuration with base-level maps. Hydrology and Earth System Sciences, 15, 1493-1504. https://doi.org/10.5194/hess-15-1493-2011

Guzzetti, F., Chiarini, P., Corominas, J., Fornaro, F. y Pantosti, D. (2006). Landslide hazard and risk assessment. En Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F. y Wang, G. (Eds.), Landslides – Risk Analysis and Sustainable Disaster Management (pp. 1–40). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-28664-6_1

Highland, L. M. y Bobrowsky, P. T. (2008). The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides. U.S. Geological Survey Circular 1325.

Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types: An update. Landslides, 11(2), 167-194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). Zonificación sísmica nacional. Recuperado el 6 de junio de 2025 de http://contenidos.inpres.gob.ar/sismologia/historicos

Keefer, D. K. (1994). The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. Geomorphology, 10(1-4), 265-284. https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90021-3

Klepeis, K. A. (1994a). A relationship between uplift of the metamorphic core of the southernmost Andes and shortening in the Magallanes foreland fold and thrust belt, Tierra del Fuego. Tectonics, 13, 882-904.

Klepeis, K. A. (1994b). The Magallanes and Deseado fault zones: Major segments of the South American–Scotia transform plate boundary in southernmost South America, Tierra del Fuego. Journal of Geophysical Research, 99, 22001-22014.

Lindsay, J. B. (2016). Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. Computers & Geosciences, 95, 75-84. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003

Lozano, J. G., Tassone, A., Lodolo, E., Menichetti, M., Cerredo, M. E., Bran, D., Esteban, F., Ormazabal, J. P., Baradello, L. y Vilas, J. F. (2018a). Origin and evolution of Lago Yehuin (Tierra del Fuego, Argentina): Results from a geophysical survey. Andean Geology, 45(3), 318-343. https://doi.org/10.5027/andgeoV45n3-3085

Lozano, J. G., Tassone, A., Bran, D. M., Lodolo, E., Menichetti, M., Cerredo, M. E., Esteban, F. D., Ormazabal, J. P., Isola, J., Baradello, L. y Vilas, J. F. (2018b). Glacial-related morphology and sedimentary setting of a high-latitude lacustrine basin: The Lago Chepelmut (Tierra del Fuego, Argentina). Journal of South American Earth Sciences, 86, 259-270. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.06.020

Lozano, J. G., Donda, F., Bran, D. M., Lodolo, E., Baradello, L., Romeo, R., Vilas, J. F., Grossi, M. y Tassone, A. (2020). Depositional setting of the southern arms of Lago Argentino (southern Patagonia). Journal of Maps, 16(2), 324-334.

Martinioni, D. R., Olivero, E. B., Medina, F. A. y Palamarczuk, S. (2013). Cretaceous stratigraphy of Sierra de Beauvoir, Fuegian Andes, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 70(1), 70-95.

Menichetti, M., Lodolo, E. y Tassone, A. (2008). Structural geology of the Fuegian Andes and Magallanes fold and thrust belt, Tierra del Fuego Island. Geológica Acta, 6(1), 19-42.

Onorato, M. R., Perucca, L., Coronato, A., López, R. y Blanc, P. (2020). Evidencias morfotectónicas en el sistema de fallas Magallanes-Fagnano, borde transformante entre las placas Sudamericana y Scotia, isla Grande de Tierra del Fuego. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 77, 47-61.

Palotti, P. F., Menichetti, M., Cerredo, M. E. y Tassone, A. (2013). Structural characterization of the Magallanes-Fagnano transform fault, Tierra del Fuego, South America. Rendiconti Online Società Geologica Italiana, 29, 130-133.

Pánek, T., Brežný, M., Harrison, S., Schönfeldt, E. y Winocur, D. (2022). Large landslides cluster at the margin of a deglaciated mountain belt. Scientific Reports, 12, 5658. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09357-9

QGIS.org, 2025. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org

Rabassa, J., Coronato, A. y Martínez, O. (2011). Late Cenozoic glaciations in Patagonia and Tierra del Fuego: An updated review. Biological Journal of the Linnean Society, 103, 316–335.

Sabbione, N. C., Connon, G. C., Buffoni, C. y Hormaechea, J. L. (2007). Tierra del Fuego reference standard earthquake catalogue. En Geosur 2007 International Geological Congress on the Southern Hemisphere (Santiago de Chile).

Senciales González, J. M. (1999). Redes fluviales: metodología de análisis. Universidad de Málaga.

Sidle, R. C. y Ochiai, H. (2006). Landslides: Processes, prediction, and land use. American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/WM018

Soeters, L. M. y Van Westen, C. R. (2005). Landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing. Geological Society of America Bulletin, 117(5–6), 556–574. https://doi.org/10.1130/B25622.1

Van Westen, C. J., Rengers, N. y Soeters, R. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping: A review. Geomorphology, 99(3–4), 272–289.

Zanolla, C., Lodolo, E., Lippai, H., Tassone, A., Menichetti, M., Baradello, L., Grossi, M. y Hormaechea, J. L. (2011). Bathymetric map of Lago Fagnano (Tierra del Fuego Island). Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 52, 1-8.

Zhao, L., Ma, H., Dong, J., Wu, X., Xu, H. y Niu, R. (2023). A comparative study of landslide susceptibility mapping using bagging PU learning in class-prior probability shift datasets. Remote Sensing, 15, 5547. https://doi.org/10.3390/rs15235547

ANÁLISIS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE GEORRADAR Y SU CORRELACIÓN CON MUESTRAS DE DENSIDAD APARENTE

Luis M. Palleres[1,2], Matías Forno[1], Germán R. Molina[1,2]
[1]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.
[2]Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: mforno@unc.edu.ar.

RESUMEN
El trabajo evalúa la eficacia del Georradar o GPR (por sus siglas en inglés de Ground Penetrating Radar), como herramienta no invasiva para identificar zonas con compactación en suelos agrícolas. La zona de estudio se encuentra en las inmediaciones de la localidad de Rafael García, departamento Santa María, en la Provincia de Córdoba (31°37'10.85"S; 64°16'4.70"O). La metodología desarrollada combina el análisis geofísico mediante esta técnica no destructiva, con muestreos directos de suelo, mediante los cuales se determinaron densidades aparentes a diferentes profundidades. Las zonas de alta densidad aparente se caracterizaron por la identificación de patrones de onda electromagnética específicas, que se visualizaron en los radargramas obtenidos. Las anomalías observadas se correlacionan con las alteraciones en las microestructuras y espacios vacíos de los horizontes del suelo, resultando en densificaciones locales mayores a 1,75 g/cm³, cuando la densidad ideal en suelos francos debería tener valores entre 1,2 y 1,6 g/cm³, siendo valores por encima de 1,60 g/cm³ perjudiciales para el crecimiento de las raíces (USDA, 1999).
El análisis de atributos geofísicos en los radargramas permitió identificar cambios abruptos en la continuidad lateral de los horizontes, característicos de ciertos tipos de compactaciones (zonas de tránsito vehicular). Los patrones de onda electromagnética observados se han asociado a factores que pueden alterar la impedancia eléctrica del suelo, como variaciones pedológicas en cuanto a la textura, estructura, densidad o contenido de humedad. Se verificó que las densificaciones típicamente ocurren entre 15 cm a 30 cm de profundidad, aunque pueden extenderse hasta 150 cm de profundidad.

Palabras clave: Geofísica, Pedología, Geotecnia.

ABSTRACT
This work evaluates the effectiveness of Ground Penetrating Radar (GPR) as a non-invasive tool for identifying compacted zones in agricultural soils. The study area is located near the town of Rafael García, Santa María department, in the Province of Córdoba (S31°37'10.85"; W64°16'4.70"). The methodology combines geophysical analysis using this non-destructive technique with direct soil sampling to determine bulk densities at different depths. High bulk density areas were characterized by the identification of specific electromagnetic wave patterns visualized in the obtained radargrams. Observed anomalies correlate with alterations in soil microstructures and pore spaces, resulting in local densifications greater than 1.75 g/cm³. The ideal bulk density for loamy soils ranges between 1.2 and 1.6 g/cm³, with values exceeding 1.60 g/cm³ being detrimental to root growth (USDA, 1999). The analysis of geophysical attributes in the radargrams revealed abrupt changes in the lateral continuity of horizons, characteristic of certain types of compactions (e.g., from vehicular traffic). These patterns were associated with factors that can alter the electrical impedance of soil, such as pedological variations in texture, structure, density, or moisture content. It was verified that densifications typically occur at depths between 15 cm and 30 cm but can extend up to 150 cm.

Keywords: Geophysics, Pedology, Geotechnical Engineering.

INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de los suelos es fundamental para la productividad y sostenibilidad en la agricultura. Para ello, es necesario la identificación de estructuras problemáticas que pudieran afectar el rendimiento del mismo, como pueden ser zonas de erosión y otras características asociadas a procesos de degradación. Poder caracterizar estas características de forma precisa, rápida y de bajo costo sería muy conveniente.

El georradar (GPR) ha sido aplicado desde 1978 en la cartografía de suelos en EE.UU. (Doolittle, 1982), y sus usos se han diver-

sificado según el problema a investigar y las condiciones del suelo (Daniels, 2004; Jol, 2009). Numerosos estudios han analizado las propiedades dieléctricas del suelo, concluyendo que la permitividad dieléctrica depende de la composición de fases, mineralogía, forma y orientación de partículas, e interacción con el fluido intersticial (Rinaldi & Francisca, 1999; Daniels, 2004; Jol, 2009).

Zabala Medina (2023) combinó el uso de georradar con el análisis de atributos para mejorar la detección y detalle de estructuras naturales en suelos sedimentarios del Noroeste Argentino y del sur del Río de la Plata, Argentina, incluyendo sitios arqueológicos. Por otro lado, Akinsunmade (2020), demostró la utilidad del georradar para detectar alteraciones en el subsuelo causadas por tránsito vehicular, empleando atributos sísmicos en la etapa de procesamiento para optimizar la interpretación de los resultados.

En el presente trabajo se usó de forma combinada el georradar con técnicas directas de muestreo in situ, determinaciones en laboratorio y procesamiento avanzado de datos a través de atributos geofísicos. El área de estudio se encuentra en la Provincia de Córdoba, Argentina, departamento Santa María, más precisamente al Noroeste de la localidad de Alta Gracia. (Fig. 1).

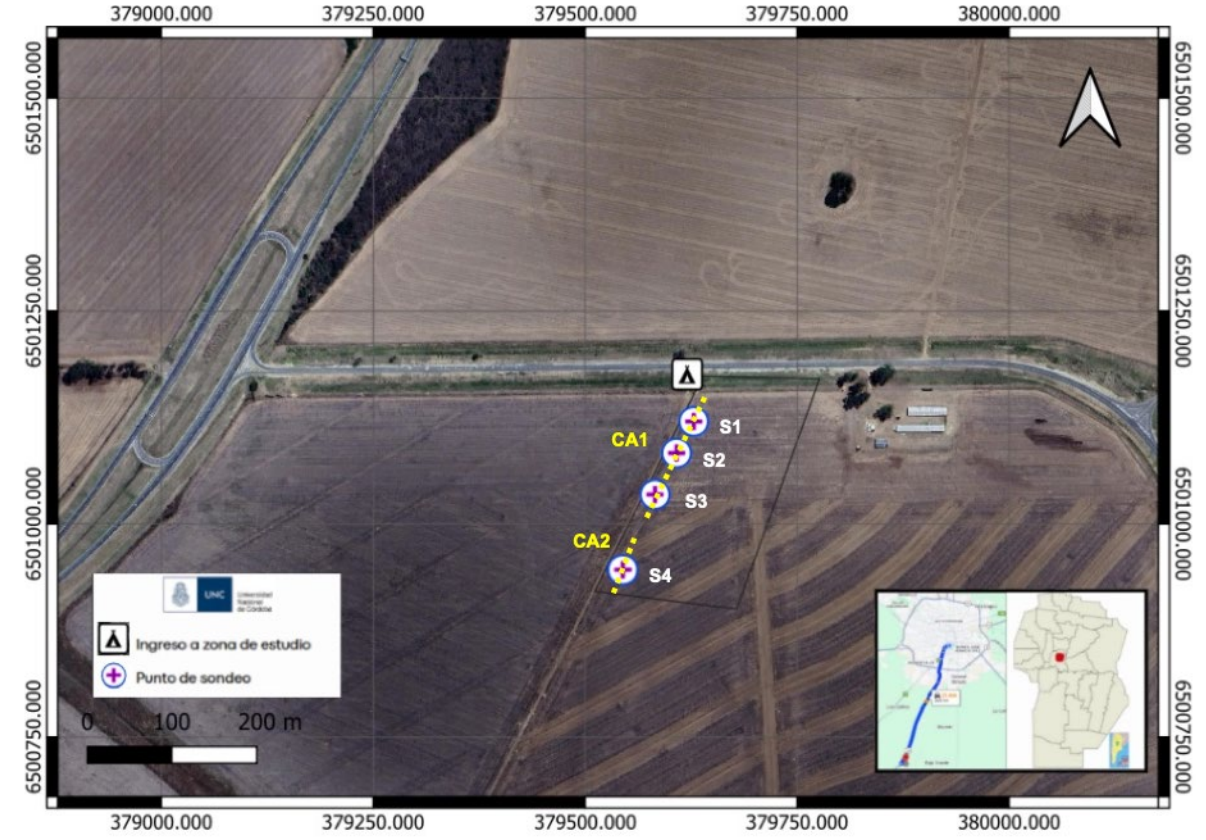


Fig. 1: Zona de estudio, ubicación de las zonas de muestreo S1 a S4 y de los perfiles con georradar CA1 y CA2.

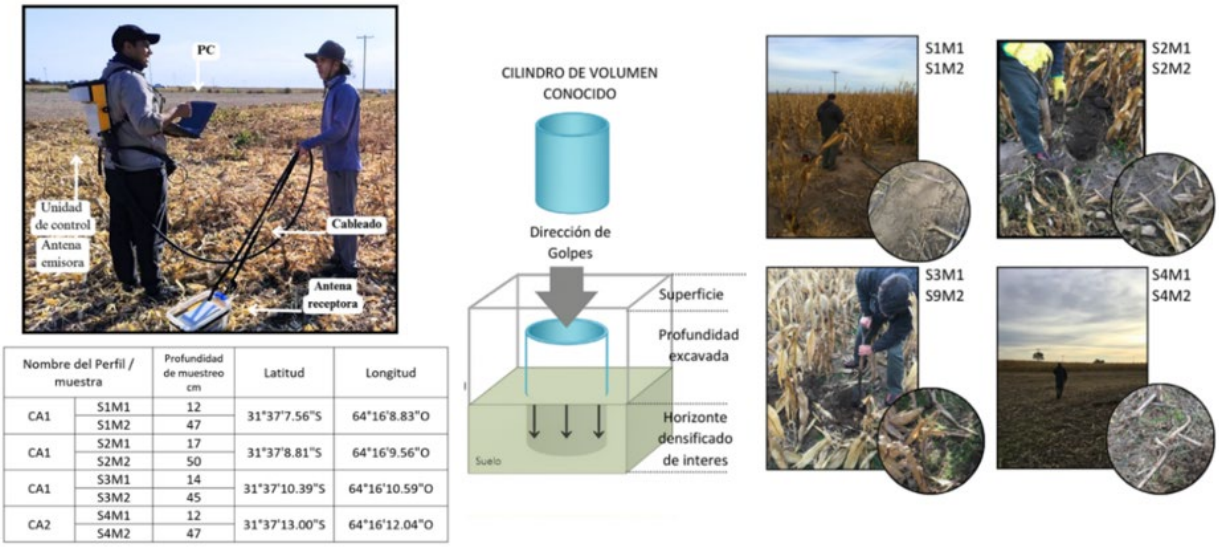
MATERIALES Y MÉTODOS

Prospecciones con Georradar

En el lote en estudio se obtuvieron dos radargramas denominados CA1 y CA2, orientados hacia el NE, de longitudes de 140 m y 36,3 m, respectivamente. Se empleó un georradar modelo RAMAC/GPR de la firma MALÅ GeoScience con una antena blindada 1GHz; tomando las coordenadas geográficas con GPS inicial y final de cada perfil realizado, tal como se muestra en la Fig 2. En cada perfil se indica la longitud y se presenta una escala de profundidad estimada, adoptando una velocidad de propagación de ondas electromagnéticas para los suelos atravesados de 0.08 m/nseg. Este valor ha sido adoptado a partir de los datos suministrados por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) - Centro Regional Córdoba y del mapa de Cartas de Suelos de la Provincia de Córdoba 2023 (IDECOR - Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba). La máxima profundidad de investigación fue de aproximadamente 3,5 m.

El análisis comienza con la identificación de zonas destacadas en los radargramas, seleccionando puntos con reflexiones intensas o patrones anómalos. Posteriormente, el análisis se focaliza en torno a las 4 zonas en donde se realizaron los muestreos de suelos, en un intervalo aproximadamente de entre 5 y 10 metros de longitud. Finalmente, se comparan estas zonas con los datos obtenidos de las muestras de suelo para detectar posibles correlaciones.

Luego de aplicar una cadena de procesamiento básica de radargramas (filtros de ganancia, filtros pasa-panda, eliminación de ruidos de fondo y filtros promedio), se aplicaron atributos geofísicos de onda compleja: Fase Instantánea, Amplitud Instantánea,



Nombre del Perfil / muestra		Profundidad de muestreo cm	Latitud	Longitud
CA1	S1M1	12	31°37'7.56"S	64°16'8.83"O
	S1M2	47		
CA1	S2M1	17	31°37'8.81"S	64°16'9.56"O
	S2M2	50		
CA1	S3M1	14	31°37'10.39"S	64°16'10.59"O
	S3M2	45		
CA2	S4M1	12	31°37'13.00"S	64°16'12.04"O
	S4M2	47		

Fig. 2. Descripción del equipo de georradar utilizado, ilustración de método de extracción, lugar de los sondeos y coordenadas de las trazas de georradar realizadas.

Frecuencia instantánea y Ancho de Banda Instantáneo (Zabala Medina, 2023). Se utilizaron paletas de colores diferentes tal que resalten características claves de interés en los perfiles procesados.

Muestreo de Suelos

La toma de muestras se realizó mediante el "método del cilindro de volumen conocido". Este es un método de bajo costo y de sencilla ejecución que proporciona testigos de suelo inalterado utilizando un cilindro contenedor normalizado (Blake & Hartge, 1986). Para ello, se excavó manualmente en el terreno hasta alcanzar la profundidad de entre 12 y 17 cm para las M1 y de entre 45 y 50 cm para las M2 en los 4 sondeos realizados, asegurándose de no alterar la estructura natural del suelo. Una vez alcanzada la profundidad objetivo, se insertó cuidadosamente en el suelo un cilindro contenedor y se extrajo con la muestra en su interior. Se muestreó un total de 8 testigos. en zonas donde se observó suelo desnudo. El lote de estudio poseía rastrojo de maíz, trabajado bajo siembra directa en rotación con soja. Los sondeos consistieron en la extracción de una muestra superficial (M1) tomada a profundidades de entre 12 cm y 17 cm y una profunda (M2) tomada por debajo de los 50 cm de profundidad. Estas muestras de suelo fueron tomadas sobre las trazas realizadas con el georradar (Fig. 1). Una vez extraídas las muestras, fueron identificadas con códigos únicos (S1M1- S1M2, S2M1-S2M2, S3M1-S3M2 y S4M1-S4M2) para asegurar su seguimiento y análisis.

Laboratorio

Las labores de laboratorio consistieron en el pesaje de las muestras de suelo húmedo y luego secar a 105°C por 24 hs hasta peso constante. Los pesajes se relacionaron con el volumen de suelo muestreado para obtener valores de densidad aparente (Blake & Hartge, 1986). La densidad ideal en suelos francos debería tener valores entre 1,2 y 1,6 g/cm³, siendo valores por encima de 1,60 g/cm³ perjudiciales para el crecimiento de las raíces (USDA, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de parámetros pedológicos en laboratorio

Con respecto a los resultados obtenidos en laboratorio (Tabla 1), se observan los valores de densidad aparente normal marcados en color verde (< a 1,6 gr/cm³), mientras que los valores de densidad marcados en color naranja son considerados como valores de densidad aparente anormalmente altos, evidenciando sectores con densificaciones locales o con cierto grado de compactación.

Análisis integral de zonas

El análisis comienza con la identificación de zonas destacadas en los radargramas, seleccionando puntos con reflexiones intensas o patrones anómalos, tal como se muestran en las Fig. 3 y Fig. 4. Del análisis de los radargramas relevados, se muestran puntualmente los atributos para la zona 3 en los resultados de la Fig. 5, en un intervalo aproximadamente de entre 5 y 10 metros de longitud. Para todos los casos relevados se analizaron la amplitud señal del radar a la altura del punto de muestreo (S1 a S4) y los cuatro atributos geofísicos mencionados.

ID MUESTRA	VOLUMEN DE SUELO (CM^3)	TUBO + SUELO (G)	BANDEJAS (G)	BANDEJA + MUESTRA (G)	SUELO NATURAL (G)	DENSIDAD APARENTE (G/CM^3)	PROFUNDIDAD (CM)
S1M1	209,230	600,25	5,32	369,83	364,51	1,586	12-19,4
S1M2	274,261	698,15	3,52	412,45	408,93	1,491	47-56,7
S2M1	214,885	627,46	3,14	387,09	383,95	1,787	17-24,6
S2M2	245,987	627,6	3,31	390,06	386,75	1,572	50-58,7
S3M1	243,159	653,9	3,49	422,58	419,09	1,724	14-22,6
S3M2	265,779	690,42	4,07	452,46	448,39	1,687	45-54,4
S4M1	223,367	646,1	5,57	412,45	406,88	1,822	12-19,9
S4M2	183,783	589,96	3,68	389,2	385,52	2,098	47-53,5

Tabla 2: Valores obtenidos para determinar densidad aparente.

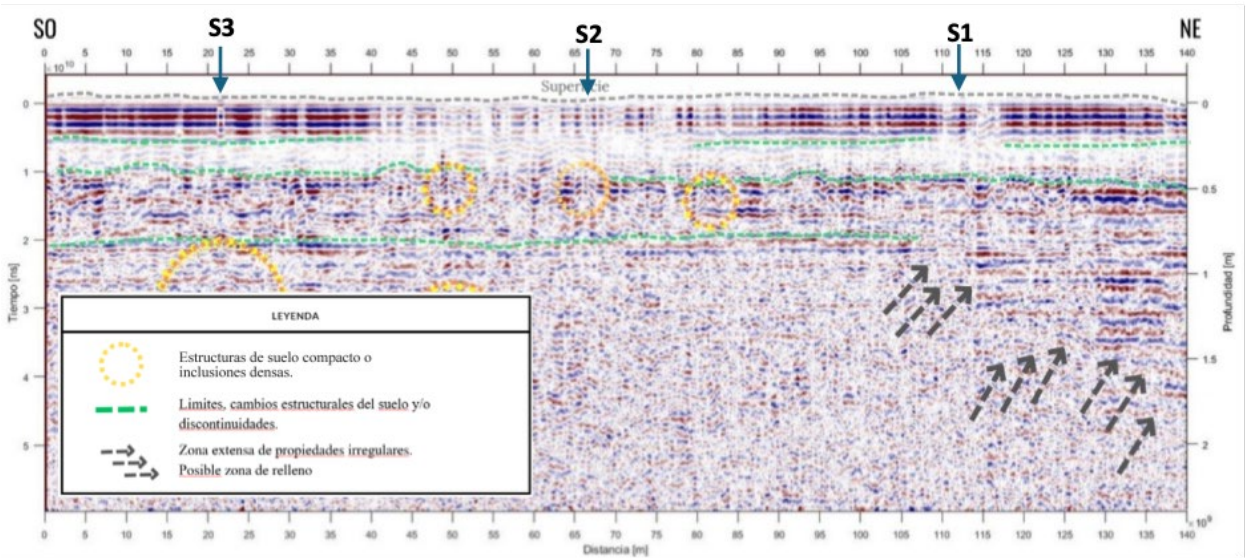


Fig. 3. Interpretación del radargrama obtenido para el perfil prospectado con georradar CA1.

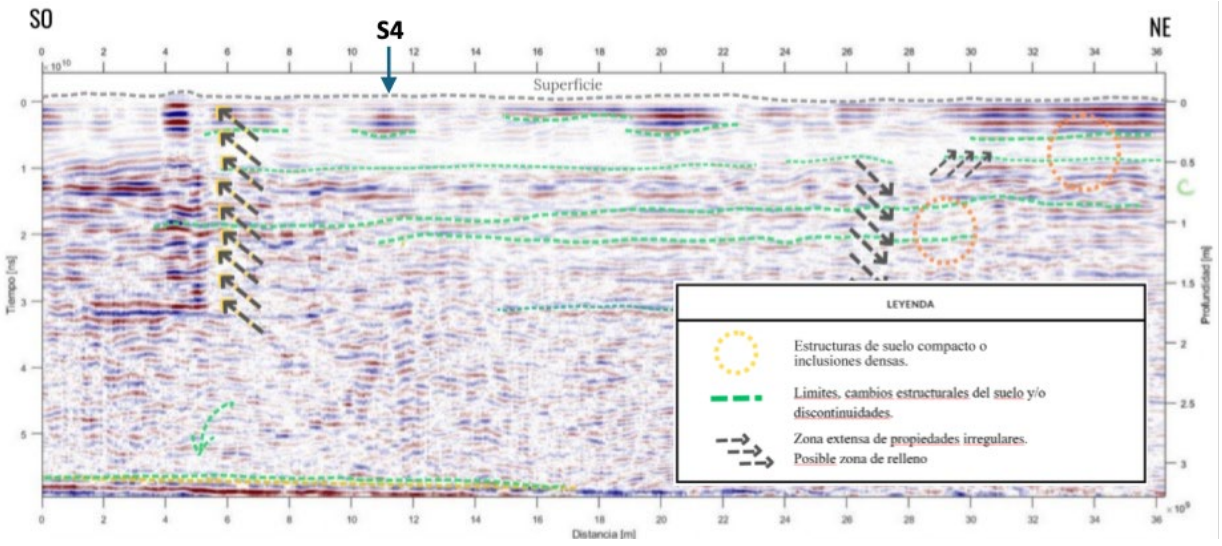


Fig. 4. Interpretación del radargrama obtenido para el perfil prospectado con georradar CA2.

Las zonas de alta densidad aparente se vinculan con una distorsión (cambio de amplitudes) en la señal de georradar y por lo tanto de las ondas electromagnéticas. Esta distorsión acontece por las alteraciones en las microestructuras y macroestructuras del

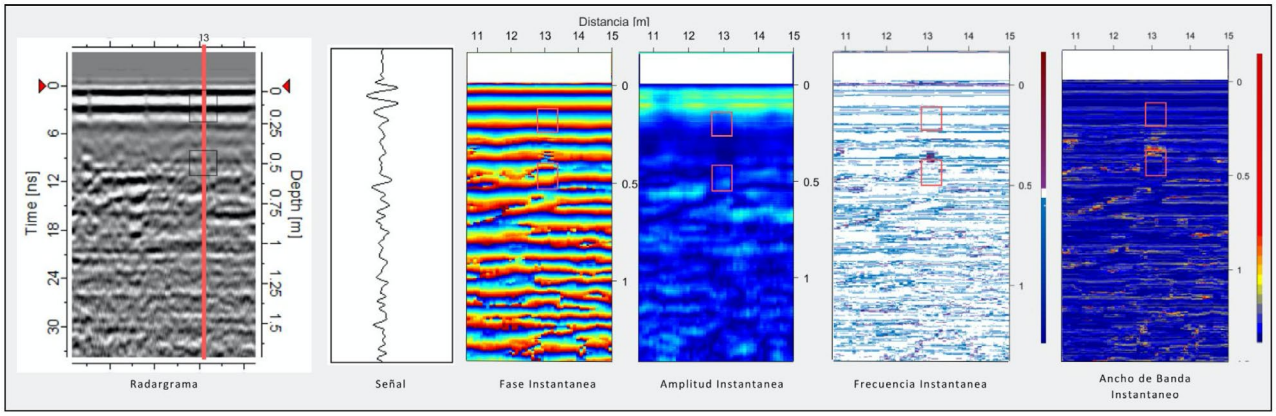


Fig 5: Resultados obtenidos mediante atributos geofísicos de los radargramas para la zona de análisis 3.

suelo, especialmente en zonas compactadas, donde disminuyen los poros y la presencia de agua en los mismos. En contraste, un suelo sin alteración de este tipo demostraría una estructura porosa que favorece la polarización y una mejor propagación de las ondas, generando señales más claras y de aspecto homogéneo.

El análisis de radargramas mediante atributos identifica límites de horizontes con continuidad lateral y horizontal distorsionada, especialmente en zonas de sospecha de compactación. Un cambio abrupto en la continuidad lateral puede indicar una alteración estructural del suelo que afecta el coeficiente de reflectividad. Los atributos que brindaron mejores resultados corresponden a los de amplitud instantánea y de fase instantánea, siendo esta última clave para interpretar la continuidad de interfaces, sectores con densificaciones locales o de mayor compactación, por su mayor sensibilidad a cambios en la señal.

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostraron los resultados más significativos, de las prospecciones realizadas con georradar con el fin de evaluar esta herramienta no invasiva para identificar zonas con compactación en suelos agrícolas. De los trabajos complementarios desarrollados, se encontró una buena correlación entre los diferentes patrones de onda obtenidos mediante el georradar y los valores de densidad aparente obtenidos mediante el muestreo directo.

En lo que respecta al uso de los atributos geofísicos para el procesamiento avanzado de los radargramas, es concluyente definir la paleta de colores con la cual se visualizaran los radargramas, ya que cada atributo responde de forma distinta. La selección errónea de paletas de color puede inducir errores en la interpretación. Se recomienda trabajar en diferentes escalas (macro y micro) y siempre complementar el análisis con imágenes satelitales, ya que características superficiales reflejan condiciones subsuperficiales.

REFERENCIAS

Akinsunmade, A., Tomecka-Suchoń, S., & Pysz, P. (2020). Complex analysis of GPR signalsfor the delineation of subsurface subtle features. Geology, Geophysics and Environment, 45(4), 257. https://doi.org/10.7494/geol.2019.45.4.257.

Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986) Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, 363-382.

Daniels, David J., 2004. Ground Penetrating Radar - 2nd. Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA]. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.* Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Instituto de Calidad de Suelos.

Doolittle, J. A. (1982). Characterizing soil map units with the ground penetrating radar. Soil Survey Horizons, 23 (4), 3-10.

Jol, H. M., 2009. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. First edition, Elsevier Science.

Rinaldi, V. A., & Francisca, F. M. (1999). Impedance analysis of soil dielectric dispersion (1 MHz to 1 GHz). Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (2), 111-121.

Zabala Medina, P. (2023). Desarrollo de aplicaciones de georradar y cálculo de atributos de los datos para la mejora de resultados. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n7409_ZabalaMedina.

INFORMACIÓN GEOLÓGICA Y PEDOLÓGICA COMO BASE PARA INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS PRELIMINARES DE PLANEAMIENTO URBANO

Sabrina Rouzaut[1], Gabriela A. Sacchi[1], Matías Forno[1], Axel J. Lassen[1]
[1]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: srouzaut@unc.edu.ar

RESUMEN
Para poder llevar a cabo cualquier proyecto ingenieril es necesario realizar tres modelos: geológico, geomecánico y finalmente geotécnico. Los datos aportados por los mapas geotécnicos permiten optimizar la planificación del uso del territorio con el fin de la ejecución de las obras civiles. No obstante, la mayor parte del territorio argentino carece de mapas con estos fines; sin embargo, cuenta con una importante cobertura de cartas de suelo que son utilizadas con fines principalmente agronómicos. Las unidades cartográficas de suelos muestran un marcado grado de uniformidad con respecto a forma del terreno, suelos asociados y clima, proporcionando información invaluable para la planificación de proyectos. Este trabajo busca aportar al conocimiento para la definición de unidades pedogeotécnicas, caracterizando los primeros 100 cm - 150 cm de suelo, mediante la construcción de una base de datos a partir de la información disponible en las cartas de suelo. El área de estudio constituye un sector del Piedemonte Oriental de la Sierra Chica, provincia de Córdoba; allí se definieron propiedades edáficas intrínsecas y relevantes para la geotecnia (ej.: textura, conductividad eléctrica, pH, drenaje, permeabilidad, espesor de suelo, presencia de nivel freático, cementación) y extrínsecas (ej.: escurrimiento, anegabilidad, pedregosidad, rocosidad). Con estos datos se delinearon áreas con características homogéneas y se construyó una base de datos con atributos relacionados a las unidades de mapeo basados en criterios bien definidos.

Palabras clave: cartas, base de datos, mapa geotécnico.

ABSTRACT
An engineering project necessarily needs three models to be developed: a geological model, a geomechanical model and finally a geotechnical model. The data provided by geotechnical maps allow the optimization of land use planning for the maintenance of civil works. However, most of the Argentine national territory lacks maps for these purposes. However, there is significant coverage of soil maps that are used for agronomic purposes. Soil mapping units show a marked degree of uniformity with respect to landforms, associated soils and climate, providing invaluable information for project planning. This work seeks to contribute to the knowledge for the definition of geotechnical units, characterizing the first 100 cm - 150 cm of soil, by constructing a database based on information available in soil charts. The study area covers a sector of the Eastern Piedemonte of the Sierra Chica, Córdoba province, where intrinsic and geotechnically relevant soil properties were defined (e.g. texture, electrical conductivity, pH, drainage, permeability, soil thickness, presence of water table, cementation) and extrinsic (e.g.. runoff, waterlogging, stoniness, rockiness). With this data, areas with homogeneous characteristics were delineated, and a database was created containing soil-related attributes.

Keywords: charts, database, geotechnical map

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano y de obras de ingeniería de cualquier índole y/o envergadura debe ir acompañado de un estudio geotécnico que permita obtener una solución armónica y sustentable, y así evitar problemas futuros. Según González de Vallejo et al (2002), para poder llevar a cabo cualquier proyecto ingenieril es necesario realizar tres modelos: geológico, geomecánico y finalmente geotécnico. Los datos aportados por los mapas geotécnicos permiten optimizar la planificación del uso del territorio para la ejecución de obras civiles (Reginatto 1970, Rocca et al., 1995, Clariá et al., 2021); sin embargo, la mayor parte del territorio argentino carece de mapas con estos fines.

Según Paige-Green y Turner (2007) las unidades cartográficas de suelos muestran un marcado grado de uniformidad con respecto a formas de terrenos, suelos asociados y clima, proporcionando información invaluable para la planificación de proyectos. Las Cartas de Suelos cubren el 89% de la provincia de Córdoba (Argentina); a pesar de las diferentes profundidades del suelo que son de preocupación en pedología y en ingeniería, también son de uso potencial para los ingenieros, aunque sólo sea para el 150 cm superior del perfil del suelo. Puede ser de valor significativo en proyectos de ingeniería relacionados con enlaces de transporte,

canales, desarrollo de municipios y ubicación de materiales de construcción naturales (Harmse y Hattingh 1985). Algunos ejemplos son los elaborados por Paranhos et al (2019), Calitz (2022, 2023), Fanourakis (2022), entre otros.

Para cada unidad geotécnica, la geología permite inferir las características del horizonte de alteración del material parental (roca y/o sedimento) y la pedología permite inferir las características de los horizontes superficiales y subsuperficiales de sus perfiles típicos (series de suelos). La topografía ayuda a definir los límites entre unidades (Dias 1995). La ocupación cada vez mayor de áreas de riesgo y la construcción de grandes obras también evidencian la necesidad de disponer de información geológica y geotécnica para respaldar la ejecución de proyectos de obras, o para minimizar riesgos surgidos de obras o de ocupación de áreas inadecuadas. Los mapas geológicos y geotécnicos presentan un registro de información del ambiente físico (suelos, roca, agua), elementos fundamentales para el uso del ambiente (Pejon y Ferreira 2015).

Por lo expuesto, este trabajo busca aportar criterios para la definición de unidades pedogeotécnicas (Polivanov et al., 2025), caracterizando los primeros 0 cm - 150 cm de suelo; profundidad en la cual, por un lado, se asientan algunas obras de infraestructura urbana y que por otro lado constituye el asentamiento de obras lineales tipo ductos, líneas eléctricas, caminos, urbanizaciones, entre otras. Este tipo de trabajos resultan ser una primera etapa de reconocimiento geotécnico, para poder llevar a cabo la planificación de los desarrollos propuestos en el territorio (ejemplo: carreteras y urbanizaciones).

El objetivo del presente trabajo es reorganizar la información de las cartas de suelo de manera que sea de utilidad geotécnica, mediante la delimitación de unidades pedogeotécnicas del paisaje, siguiendo el criterio propuesto por Partdrige et al., (1993) modificado por Calitz (2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio propuesta corresponde a un sector del Piedemonte Oriental de la Sierra Chica, entre la ciudad de Jesús María y Villa del Totoral (coordenadas SE: S31° 0'0.00"/W64° 0'0.00"; SW: S31° 0'0.00"/W64°15'0.00"; NE: S30°40'12.00"/W64° 0'0.00"O; NW: S30°40'12.00"/ W64°15'0.00") constituyendo un área importante de expansión urbana en la provincia de Córdoba (Argentina) (Fig. 1). El área seleccionada cuenta con información de base geológica - pedólogica (Carta de Suelos de la República Argentina Hoja 3163-13- Jesús María,- Hoja 3163-7-4 Avellaneda (parcial) (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA] y Dirección de Ambiente de la Agencia Córdoba DAC y T, 2003) y topográfica (Instituto Geográfico Nacional [IGN], s.f.).

Los suelos se clasificaron de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que es el empleado en geotecnia (ASTM D2487, n.d.), y normas AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), empleadas en vialidad (AASHTO M 145, 91 2012 n.d.). Las plasticidades, límite líquido y límite plástico se obtuvieron de muestras ya disponibles en laboratorio, correspondientes a ensayos previos. Las características de las propiedades edáficas intrínsecas (ej.: textura, conductividad eléctrica, pH, drenaje, permeabilidad, espesor de suelo, presencia de nivel freático, cementación) y extrínsecas (ej.: escurrimiento, anegabilidad, pedregosidad, rocosidad) se evaluaron y agruparon siguiendo los criterios propuestos principalmente por Partridge et al. (1993), y Calitz (2022, 2023). Para simplificar la lectura de las diferentes condicionantes, se tomaron las diferentes propiedades y se plasmaron en tablas; permitiendo así unificar criterios.

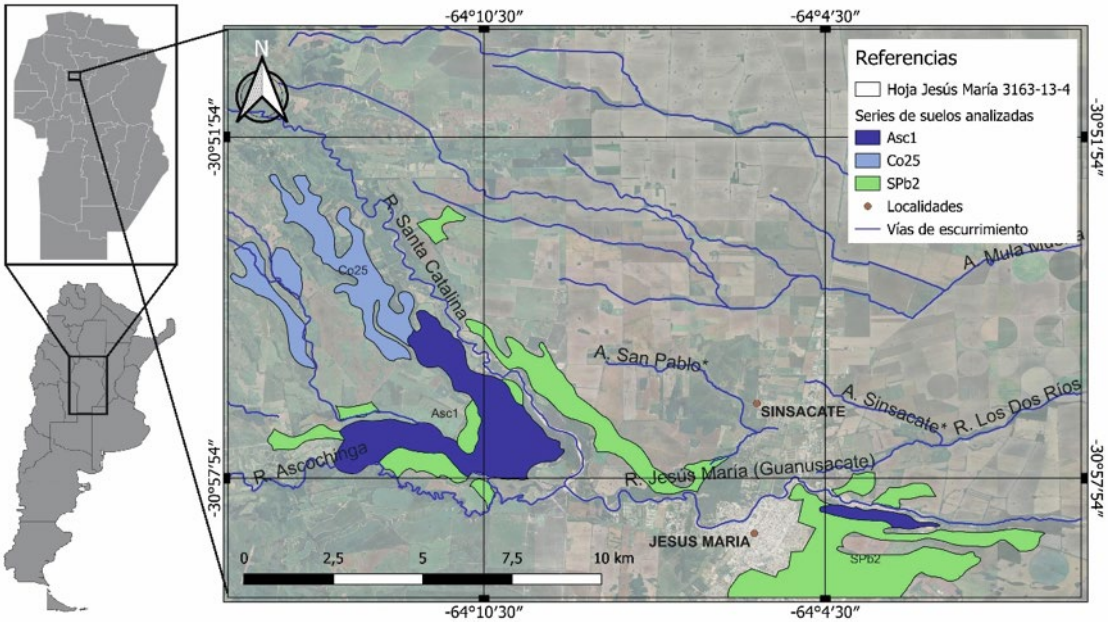


Fig. 1. Ubicación del área de estudio. Unidades cartográficas más representativas del área: Complejo de series Ascochinga 70% y Ascochinga sobre franco arenoso 30% (Asc1); Complejo indiferenciado de series San Pablo, Ascochinga, Puerta de Hierro II (SPb2), Complejo indiferenciado de series Jesús María moderadamente inclinada, Las Piedras, Ascochinga en fase acumulada y suelos menores aluviales arenosos (Co25).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros intrínsecos y extrínsecos de suelos publicados en las cartas se encuentran organizados de acuerdo con los criterios y normas de clasificación de Etchevehere (1976). Éstos se evaluaron independientemente y algunos se agruparon para arribar a solo 10 condicionantes geotécnicas y así facilitar la lectura de la información (Tabla 1).

CONDICIONANTE	PROPIEDADES DE LAS CARTAS
Colapsabilidad	textura (%limo), edómetro
Compresibilidad	Coeficiente de compresibilidad y consolidación
Erodabilidad	%MO, %arena fina+ Limo; %arena; estructura; Permeabilidad;
Permeabilidad	Permeabilidad
Pedregosidad/Rocosidad/Horizontes Endurecidos	Pedregosidad/Rocosidad/ horizontes cementados
Pendientes pronunciadas	Posición geomorfológica
Pendientes inestables	Material parental
Anegamiento	Peligro de anegamiento
Suelo activo (CIC)	CIC
Salinidad	Salinidad

Tabla 1. Propiedades de suelo en cartas reagrupadas y reorganizadas según condicionantes geotécnicas.

	CONDICIONANTE	MUY FAVORABLE	INTERMEDIO	POCO FAVORABLE
A	Colapsabilidad	Horizontes dentro de los primeros 750 mm	Horizontes superando los primeros 750 mm	Horizontes >1500 mm
B	Compresibilidad	Bajo	Moderado	Alto
C	Erodabilidad	Bajo	Moderado	Alto
D	Permeabilidad	Nivel freático >1.5 m	Nivel Freático <1,5 m	en superficie
E	Pedregosidad/Rocosidad/Horizontes Endurecidos	< 10% del perfil de suelo. Ocasionales	10-40% del perfil de suelo. Frecuentes	>40% Rocas, fragmentos y horizontes endurecidos
F	Pendientes pronunciadas	2°-6°	6°-18°	<18°
G	Pendientes inestables	Bajo	Intermedio	Alto
H	Drenaje	>4	=3	<3
I	Suelo activo (CIC)	<17-25 cmol/kg	>17-25 cmol/kg	>17-25 cmol/kg

Tabla 2. Parámetros que determinan los límites de las condicionantes geotécnicas de suelo en el área de estudio. Adaptado de Partridge et al., (1993)

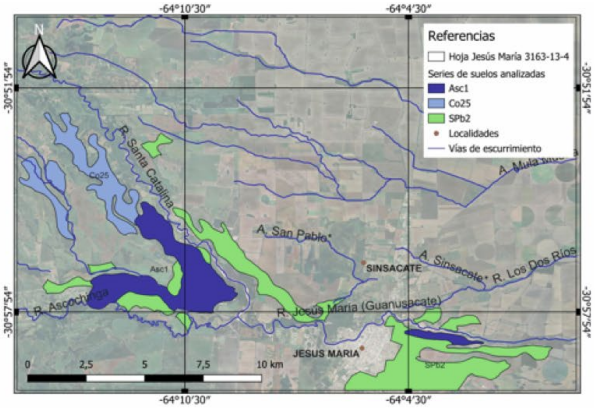
Partridge et al., (1993) propuso una clasificación, la cual fue adaptada a las características locales del área estudiada, sintetizada en la Tabla 2 donde se encuentran planteadas las condicionantes geotécnicas y las propiedades evaluadas en las cartas de acuerdo a su dificultad para los fines geotécnicos.

En la Fig. 2 se muestra el mapa del área de estudio con la distribución de las unidades cartográficas resaltadas. Se seleccionó la Serie de suelo Ascochinga para simplificar el análisis del presente trabajo que se encuentra representada en todas las unidades cartográficas (Asc1, SPb2 y Co25) y presenta un patrón repetitivo a lo largo de los derrames suavemente ondulados periserranos. Sin embargo, esta clasificación se realizará en cada serie de suelo y luego se unificará para cada unidad cartográfica. En cada horizonte de suelo de la Serie Ascochinga, se le determinaron los valores de límites líquido, plástico e índice de plasticidad y se renombraron siguiendo los criterios SUCS o AASTHO según sea el fin del estudio geotécnico. Luego se evaluaron las condicionantes de acuerdo con la información publicada y se armó el cuadro tal como se observa en la figura.

Se optó por un cuadro y no por una clasificación alfanumérica ya que es más sencillo de leer e interpretar, mientras que un ordenamiento jerarquizado y sistemático requeriría determinar un código o criterio para poder llevarlo a cabo. Por otro lado, este formato se puede anexar fácilmente a las cartas de suelo ya publicadas.

De esta manera se procederá con todas las unidades representadas en el sector bajo estudio, facilitando su posterior análisis y mapeo.

Unidad Pedogeotécnica Ascochinga



USDA	%LL	%LP	%IP	SUCS	AASTHO
Ap	24,3	20,3	4	SM	A6(5)
A	25,7	22,5	3,2	SM	A6(7)
Bt	25,1	21,4	3,7	SM	A6(6)
Bt2	25,6	22,3	3,3	SM	A6(6)
2BC	26	21,7	4,3	SM	A6(6)
2Ck	27	23,6	3,4	SM	A6(6)

	Condicionante	Muy favorable	Intermedio	Poco favorable
A	*Colapasabilidad*	Faltan realizar edómetros		
B	*Compresibilidad*			
C	*Erodabilidad*		X	
D	*Permeabilidad*	X		
E	*Pedregosidad/Rocosidad/Horizontes Endurecidos*	X		
F	*Pendientes pronunciadas*	X		
G	*Pendientes inestables*	X		
H	*Anegamiento*	X		
I	*Suelo activo (CIC)*	X		
J	*Salinidad*	X		

Fig.2 Unidad pedogeotécnica Ascochinga.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la información presentada, este formato propuesto de readecuación de la información pedológica disponible en información de utilidad geotécnica permite y facilita la lectura para personal especializado y no especializado. Resulta una aproximación práctica para el conocimiento geotécnico del sector sin reemplazar los ensayos in situ que se deben realizar para cada obra y sitio en particular.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba que brindó apoyo económico a través del subsidio al proyecto FORMAR (33820230100085CB). Por otro lado, se agradece a los evaluadores cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad del trabajo.

REFERENCIAS

AASHTO M 145-91. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes" (2012). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Calitz, F. (2022). *Proposed system to facilitate use of pedological information in preliminary stage geotechnical investigations* (Doctoral dissertation, North-West University (South Africa)). orcid.org/0000-0001-7286-7381

Calitz, F. (2023). Using pedological information in preliminary stage geotechnical investigations for strategic urban planning in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 65*(1), 19-34. http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2023/v65n1a3

Clariá, J., Rouzaut, S., Ares, M., & Eveling, P. (2021). Mapa estratigráfico con fines geotécnicos de la ciudad de Córdoba. ASAGAI, (46), 43-55.

Dias, R. (1995). Proposta de Metodologia de Definição de Carta Geotécnica Básica em Regiões Tropicais e Subtropicais. Revista do Instituto Geológico, volume especial, 51–55.

Etchevehere, P. H. (1976). *Normas de reconocimiento de suelos*. Suelos. Publicacion-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Argentina), (152).

Fanourakis, G. (2022). Utilizing Land Type data for geotechnical investigations. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 64*(1), 12-24. http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2022/v64n1a2h

González de Vallejo, L. I., & Ferrer, L. (2002). *Ingeniería Geológica.*

Harmse, H., Von, M., & Hattingh, J. (1985). The pedological profile classes. In A. B. A. Brink (Ed.), *Engineering Geology of Southern Africa* (Vol. 4, pp. 272–273).

Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). *Carta topográfica Jesus María*. https://mapa.ign.gob.ar

Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2003). *Carta de Suelos Hoja 3163-13 Jesús María*.

Norma ASTM D2487, "Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos con Fines de Ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)"

Paige-Green, P., & Turner, D. (2007). The use of soil and land type information maps in road engineering in South Africa. In 14th ARC SMGE (pp. 311–317). Yaounde, Cameroon, Africa.

Paranhos, H., Farias, R., Silva, J., Pereira, P., De Sousa Júnior, R., & Hausser, A. (2019). Use of the Pedological Map in the Geotechnical Characterization of Aris Mestre D'Armas in Planaltina-DF.

Partridge, T., Wood, C., & Brink, A. (1993). Priorities for urban expansion within the pwv metropolitan region: The primacy of geotechnical constraints. *South African Geographical Journal, 75*(1), 9-13. https://doi.org/10.1080/03736245.1993.9713556

Pejon, O., & Ferreira, M. (2015). Mapas geotécnicos e geoambientales. In L. Zuquette (Ed.), *Geotecnia ambiental* (pp. 48-80). Elsevier.

Polivanov, H., Barroso, E. V., da Silva Ramos, R., Augusto, V., Alves, H. S., Ottoni, F. P., & Porto, R. L. Geotechnical Cartography Applied to Territorial Planning: A Pedo-Geotechnical Approach (2025) Anuario do Instituto de Geociências. Universidade Federale do Río de Janiero vol 48: 1-27 pp.

Reginatto, A. (1970). Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba. *In 2da Reunión argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de fundaciones*. Córdoba, Argentina.

Rocca, R., Quintana Crespo, E., Abril, E., & Goio, M. (1995). Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba. *Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Publicación especial*, (3), 322-340.

GEOLOGÍA AMBIENTAL

ANÁLISIS ESPACIAL DEL PELIGRO AMBIENTAL EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS

Fernando Almaraz[1,4], Juan Martín Calvagno[1,3], Valentín Bernhardt[1,4], Lautaro Caro[1,4], Bautista Ascúa Blanc[1,2]
[1]Tango Geosciences, Buenos Aires, Argentina.
[2]Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
[3]CONICET–Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGeBA), Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria (Pabellón II, Piso 1), CP 1428, Buenos Aires, Argentina.
[4]Universidad Argentina de la Empresa (UADE), Instituto de Tecnología (INTEC), Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: almarazfrn@gmail.com

RESUMEN
Este trabajo presenta una metodología de análisis espacial multicriterio para identificar zonas de mayor peligro ambiental en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), a partir de la proximidad a fuentes puntuales de contaminación, como industrias, estaciones de servicio y transformadores eléctricos, entre otras. Se utilizaron datos públicos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para modelar un índice integrado de peligro ambiental mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El modelo generó mapas temáticos de alta resolución, clasificando el territorio en cinco niveles de peligro. Los resultados evidencian una concentración de zonas críticas en barrios del sur y sudoeste de la ciudad. Este enfoque constituye una herramienta complementaria para la gestión ambiental urbana, favoreciendo la toma de decisiones y la planificación preventiva en áreas densamente urbanizadas.

Palabras clave: análisis espacial multicriterio, contaminación urbana, gestión ambiental, SIG, planificación territorial.

ABSTRACT
This study proposes a spatial multi-criteria analysis methodology to identify areas with higher environmental hazard levels in the Autonomous City of Buenos Aires (CABA), based on proximity to point sources of pollution, such as industries, gas stations, and electrical transformers, among other sources. Public datasets and Geographic Information System (GIS) tools were used to develop an integrated hazard index through the Analytic Hierarchy Process (AHP). The resulting high-resolution thematic maps classified the city into five hazard levels. Findings indicate a concentration of critical areas in the southern and southwestern neighborhoods of the city. This approach provides a complementary tool for urban environmental management, supporting decision-making and promoting a territorial and preventive perspective on environmental risks in densely populated urban areas.

Keywords: multicriteria spatial analysis, urban pollution, environmental management, GIS, territorial planning.

INTRODUCCIÓN

La protección de los suelos y aguas subterráneas en entornos urbanos densamente poblados representa un desafío creciente para la gestión ambiental (Auge et al., 2004; Calderón et al., 2020). En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), aunque la red pública de agua y el sistema cloacal tienen alta cobertura (Esparza, 2020; Merlinsky y Tobias, 2021), el sistema hidrogeológico sigue siendo estratégico y requiere gestión preventiva ante posibles fuentes de contaminación (Ratto et al., 2004; Auge, 2007; Basílico et al., 2015; Melignani, 2017; Barreto, 2024).

Con 203 km² de superficie y ubicada sobre el margen del Río de la Plata, la ciudad está atravesada por varias cuencas urbanas que drenan hacia el este y está asentada sobre una llanura que alberga dos acuíferos principales: el Pampeano (freático y somero) y el Puelche (más profundo y confinado en varios sectores). Este sistema hidrogeológico, influido por factores naturales y antrópicos, es clave en la dinámica urbana y vulnerable a distintas formas de contaminación (Santa Cruz y Silva Busso, 1999; Auge, 2004, 2006; Gatti et al., 2005; Silva Busso y Masú, 2012; Viglianchino et al., 2023).

A partir de antecedentes técnicos desarrollados en el ámbito local, este estudio propone un enfoque complementario que combina información pública y criterios espaciales de proximidad. La metodología se presenta como una herramienta preliminar de evaluación (*screening*) —replicable y de bajo costo— orientada a facilitar la planificación ambiental, la priorización de monitoreos y el diseño de intervenciones focalizadas, con el objetivo de fortalecer las políticas públicas vinculadas a la gestión preventiva del ambiente hidrogeológico urbano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El peligro ambiental se define como la probabilidad de que ocurra un evento o proceso que genere un impacto negativo sobre el ambiente, afectando sus componentes físicos (suelo, agua, aire), biológicos (flora, fauna, ecosistemas) o sociales (salud humana, calidad de vida). En este contexto, lo que se cuantifica es la presencia, distribución e intensidad de factores o actividades antrópicas que representan el potencial de contaminación o degradación ambiental (Janikowski et al., 2000; Bagdanavičiūtė et al., 2013; Hammam et al., 2022). La cuantificación del peligro no implica necesariamente la existencia de un daño actual, sino que permite identificar zonas con mayor o menor probabilidad de que este ocurra, en ausencia de medidas adecuadas de prevención, control o gestión (Ratto et al., 2004; Fernandes et al., 2021).

En este estudio se aplicó un Análisis de Decisión Multicriterio (ADMC) para evaluar el peligro de contaminación de suelos y aguas a partir de focos potenciales de contaminación puntual en CABA. La metodología se desarrolló en las siguientes etapas: (i) recopilación y preprocesamiento de datos espaciales, (ii) definición y clasificación de variables según criterios técnicos y bibliográficos, (iii) asignación de ponderaciones mediante evaluación técnica y revisión de literatura, y (iv) análisis espacial con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la generación de mapas temáticos.

Se utilizó información pública disponible en la plataforma Buenos Aires Data (https://data.buenosaires.gob.ar), de donde se descargaron las capas georreferenciadas correspondientes a las variables analizadas. Estas fueron procesadas mediante algoritmos integrados en el software QGIS 3.40 (QGIS.org, 2025), incluyendo herramientas nativas y módulos externos como SAGA GIS (Conrad et al., 2015) y Whitebox Tools (Lindsay, 2016). El uso de QGIS permitió gestionar bases de datos espaciales, realizar operaciones de superposición y generar mapas temáticos con simbología estandarizada para su interpretación y aplicación práctica.

El ADMC permite la integración y ponderación de múltiples variables ambientales, generando mapas que favorecen una gestión territorial informada y eficaz (Malczewski, 2006; Hammam et al., 2022). Cada variable fue clasificada y ponderada en función de su influencia relativa sobre el potencial contaminante, en base a bibliografía especializada y datos locales. Se definieron nueve capas vectoriales como variables, correspondientes a distintas infraestructuras y actividades potencialmente contaminantes: A) Estaciones de Servicio, B) Transformadores con PCB, C) Garages, D) Pequeñas Industrias y Talleres, E) Grandes Industrias, F) Estaciones transformadoras eléctricas, G) Puntos de Transferencia de Residuos, H) Centros de Reciclaje y I) Puntos Verdes de Recolección (Tabla 1).

FACTORES ANALIZADOS	CATEGORÍA DE PELIGRO	VALOR	RANGO DE BUFFER (M)	CRITERIO UTILIZADO
1. Centros de Reciclaje	Alta	3	0–100	Máxima influencia de actividades asociadas a residuos, productos y elementos potencialmente contaminantes.
2. Estaciones de Servicio				
3. Garajes				
4. Puntos Verdes				
5. Transformadores con PCB	Media	2	100–300	Influencia media de fuentes de peligro.
6. Puntos de Transferencia de Residuos				
7. Industrias y Talleres	Baja	1	300–500	Zonas donde el efecto de los potenciales contaminantes es atenuado por la distancia, con impacto indirecto o puntual.
8. Grandes Fábricas				
9. Estaciones Eléctricas				

Tabla 1. Factores analizados para la caracterización del peligro y criterios espaciales de zonificación del mismo.

Para cada variable se definieron zonas de influencia (*buffers*) con tres categorías: Alto Peligro hasta 100 m desde la fuente, Peligro Medio entre 100 y 300 m, y Bajo Peligro entre 300 y 500 m. A partir de los 500 m se considera que las fuentes no ejercen influencia significativa. La superposición espacial de estas variables ponderadas permitió generar un mapa integrado de peligro, que identifica las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de contaminación en función de las actividades presentes. Durante la etapa de preparación, se realizaron las ediciones temáticas y geométricas necesarias sobre los datos originales. Posteriormente, todas las capas vectoriales fueron convertidas a formato ráster con una resolución espacial de 1 metro, y procesadas íntegramente en QGIS.

Para la evaluación del peligro ambiental se aplicó una metodología basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980). Este método permite estructurar problemas complejos en una jerarquía de criterios, compararlos en forma relativa y obtener un valor compuesto que refleja el peso específico de cada elemento. El objetivo general fue identificar zonas de mayor peligro ambiental en CABA, en función de la presencia e intensidad de distintas fuentes potenciales de contaminación. Esta metodología constituye un insumo clave para la priorización de áreas a gestionar, la planificación urbana y el diseño de estrategias de mitigación.

La ponderación de los criterios se realizó mediante comparación por pares usando la escala fundamental de Saaty (1980). Las ponderaciones fueron inicialmente estimadas en base a criterios propios y bibliografía, considerando la peligrosidad relativa de cada tipo de fuente. Se elaboró una matriz de comparación 9x9, a partir de la cual se derivó el vector de prioridades normalizadas,

obteniendo los pesos relativos de cada variable en porcentaje (Tabla 2).

Los pesos obtenidos se aplicaron a las capas ráster mediante operaciones algebraicas en QGIS, utilizando una fórmula lineal ponderada que integró todas las capas reescaladas en un índice único de peligro ambiental, que se expresa con la siguiente ecuación:

$$IPA = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i \qquad (1)$$

Donde:

IPA: Índice de Peligro Ambiental

w_i: Peso asignado al criterio *i* (según AHP)

x_i: Valor espacial normalizado del criterio *i*

n: Número total de criterios considerados

FACTORES CONSIDERADOS	IMPORTANCIA RELATIVA	PESO (%)
Transformadores con PCB (Bifenilos Policlorados) en la vía pública.	Muy alta	15,8
Estaciones de Servicio, con tanques enterrados.	Muy alta	15,8
Industrias de Gran Escala.	Alta	11,9
Centros de Transferencia de Residuos, con carga y descarga de camiones recolectores.	Alta	11,9
Garajes.	Alta	11,9
Pequeñas Industrias y Talleres.	Moderada	8,9
Estaciones Transformadoras Eléctricas, con equipos de distribución energética.	Moderada	8,9
Centros de Reciclaje, con disposición y tratamiento.	Moderada	8,9
Puntos Verdes, con estaciones de reciclaje vecinal.	Baja	5,0

Tabla 2. Factores analizados para la caracterización del peligro, su importancia relativa según los objetivos del presente trabajo y peso relativo porcentual obtenido a partir del Método de Saaty (1980).

Este índice permitió generar un modelo espacial del peligro ambiental para todo el territorio de CABA, sirviendo como insumo para la identificación de zonas críticas. La cartografía generada clasifica el territorio en cinco categorías de peligro: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto, en función de la densidad e intensidad de fuentes potenciales de contaminación. Esta zonificación permite ajustar las estrategias de gestión ambiental según las comunas y barrios afectados, y el grado de exposición al peligro.

Finalmente, se realizó un análisis más detallado sobre las zonas clasificadas como de peligro Muy Alto, agrupándolas según su extensión areal mediante el criterio de rupturas naturales. Esto permitió identificar y caracterizar los sectores con mayor concentración de focos de potencial peligro ambiental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores descritos en la Tabla 2 muestran que los transformadores con PCB y las estaciones de servicio constituyen las fuentes de mayor peligrosidad, con un peso conjunto del 31.6%. Les siguen las grandes industrias, los puntos de transferencia de residuos y los garages (11.9% cada uno). Luego se ubican las pequeñas industrias y talleres, estaciones transformadoras eléctricas y centros de reciclaje (8,9% cada uno), y finalmente los puntos verdes (5%). La consistencia del modelo fue validada mediante el cálculo del Índice de Consistencia (IC) y del Índice de Razón de Consistencia (CR), cuyos valores obtenidos indican que las ponderaciones aplicadas presentan una coherencia aceptable dentro del marco del AHP (Saaty, 1980).

La superficie total estudiada es de 203 km^2. De este total, se observa que la categoría de peligro Medio constituye la más representativa en términos de superficie, abarcando aproximadamente el 52% del total del territorio (Figuras 1, 2 y 3).

En contraste, las zonas ubicadas en el este, noreste y sur de la ciudad presentan una predominancia de categorías de peligro Bajo y Muy Bajo las cuales, en conjunto, comprenden cerca del 36% de la superficie de CABA (Figura 1). Incluye principalmente a la Comuna 1, 2, 8 y 14 (Figura 2).

Por otro lado, las categorías de peligro Alto y Muy Alto representan alrededor del 12% del área total (Figura 1) y se distribuyen de forma más puntual, aunque concentrada en sectores específicos del territorio, principalmente en los barrios de Constitución, Parque Patricios, Barracas, Caballito, Flores y Villa Lugano (Figura 3). En forma complementaria al análisis, se identificaron 14 zonas críticas o "*hotspots*", entendidas como áreas con las mayores concentraciones de peligro, que fueron clasificadas según su extensión geográfica en tres grupos: menor área, área media y mayor área (Figura 4).

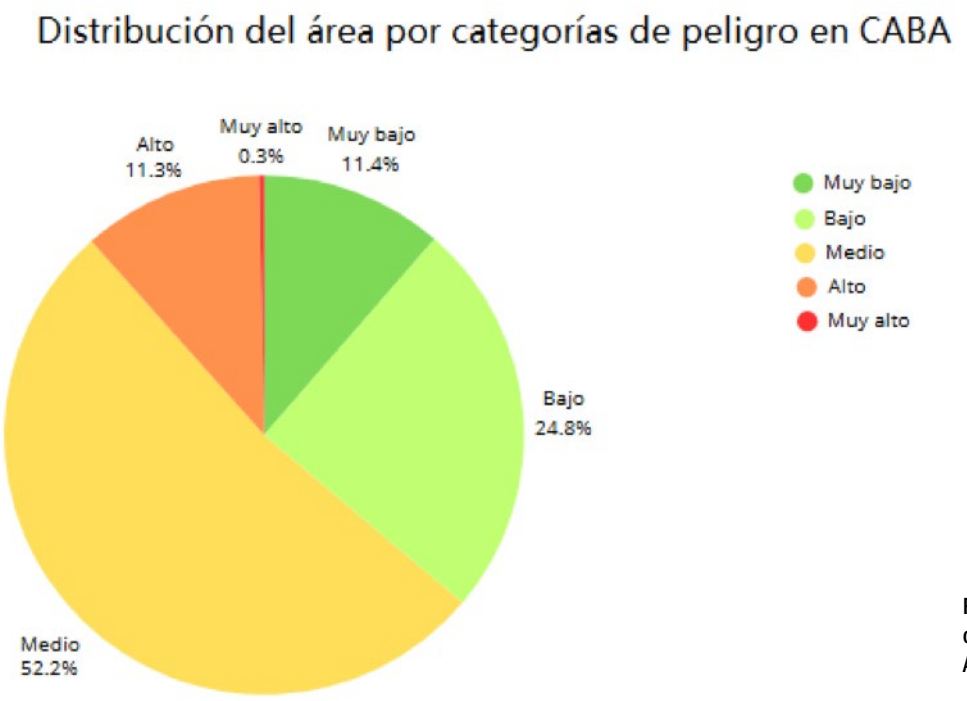


Figura 1. Distribución del área por categorías de peligro en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).

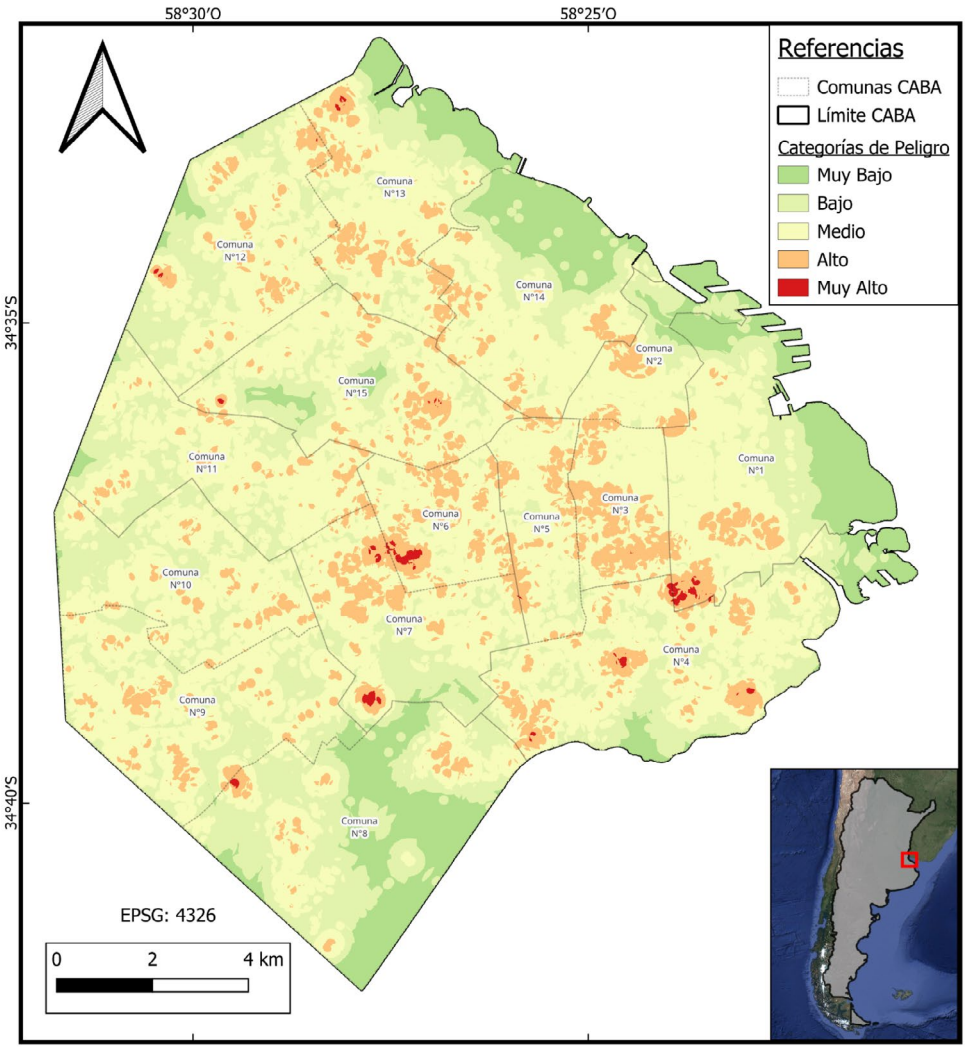


Figura 2. Mapa de peligro a la contaminación de suelos y aguas en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) con la división territorial por comunas.

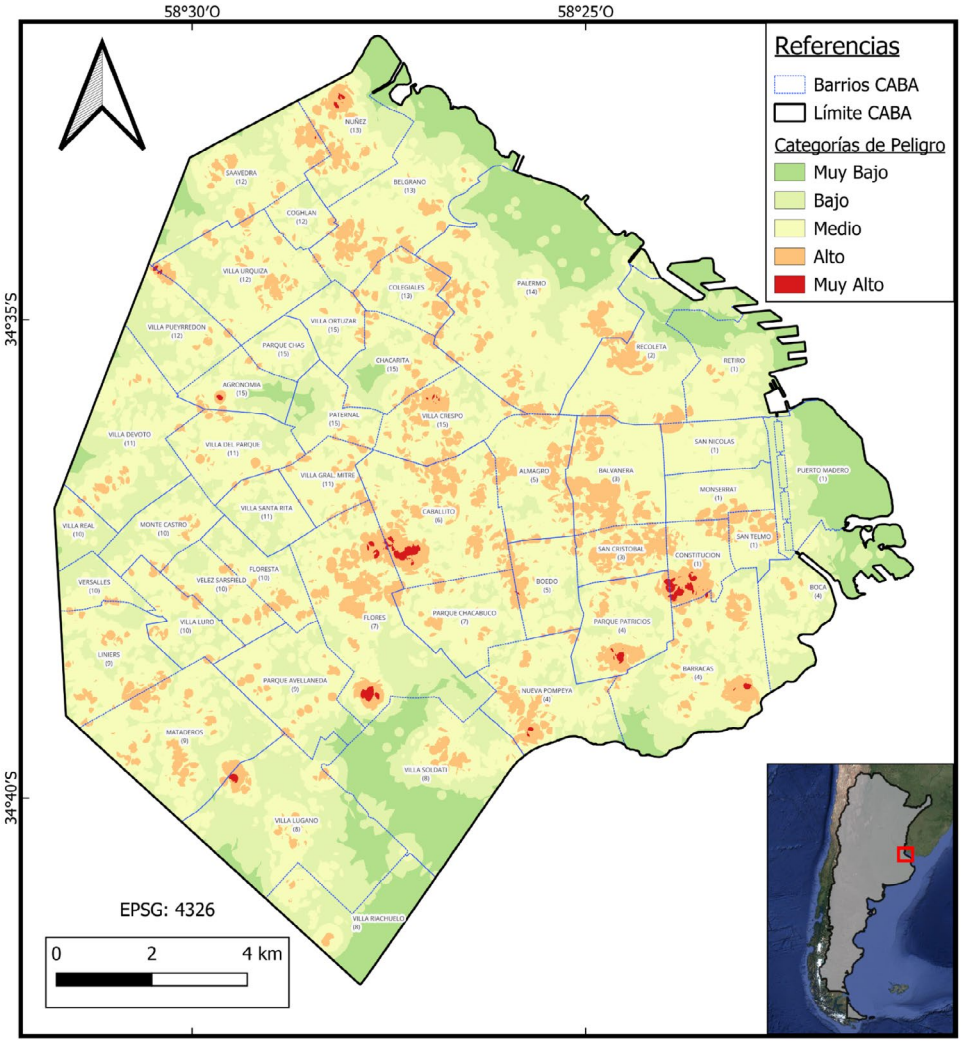


Figura 3. Mapa de peligro a la contaminación de suelos y aguas en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) con la división territorial por barrios (entre paréntesis se detallan las comunas a las que pertenecen).

Del total de estos *hotspots*, nueve se localizan en el sur de la ciudad, mientras que los cinco restantes se sitúan en el sector norte. Entre ellos, se destacan los hotspots A y B, los cuales presentan la mayor superficie dentro de esta categoría. El *hotspot* A se encuentra ubicado en las Comunas 6 y 7, correspondientes a los barrios de Caballito y Flores. En tanto, el *hotspot* B se localiza en las Comunas 1 y 4, abarcando sectores de los barrios de Constitución, Barracas y Parque Patricios (Figura 4 y Tabla 3). Se deberían considerar con prioridad alta durante la planificación ambiental y gestión activa (Tabla 4).

En cuanto a los *hotspots* de área media, se identificaron seis zonas distribuidas tanto en el norte como en el sur de la ciudad. Estas se localizan dentro de las Comunas 4, 7, 12, 13 y 15, abarcando sectores de los barrios de Flores, Barracas, Parque Patricios, Núñez, Villa Pueyrredón, Villa Urquiza, Saavedra y Villa Crespo (Figura 4 y Tabla 3). Estas áreas presentan una superficie intermedia y constituyen puntos relevantes en términos de concentración de peligro, si bien no alcanzan la extensión territorial de las áreas A y B previamente mencionadas.

Finalmente, se identificaron también seis *hotspots* de menor superficie, que, al igual que los de área media, se encuentran distribuidos tanto en sectores del norte como del sur de la ciudad. Estas zonas están ubicadas en las Comunas 3, 4, 5, 7, 9, 12, 13 y 15, correspondiendo a los barrios de Villa Soldati, Mataderos, Nueva Pompeya, Agronomía, Boedo, Parque Chacabuco, San Cristóbal, Saavedra y Núñez. A pesar de su menor extensión, estos puntos no deben subestimarse, dado que pueden representar situaciones localizadas de alto riesgo que requieren atención específica (Figura 3 y Tabla 4).

Del total de *hotspots* identificados, se observa una mayor concentración en el sector sur de la ciudad, particularmente en la Comuna 4, que presenta la mayor cantidad de áreas críticas (4 en total). Esta comuna incluye barrios como Barracas, La Boca y Parque Patricios, históricamente atravesados por dinámicas urbanas complejas y con una presencia significativa de infraestructuras industriales y de servicios.

Le sigue en cantidad la Comuna 7, que abarca los barrios de Flores y Parque Chacabuco, con 3 hotspots, mientras que las Comunas 12 y 13, correspondientes a sectores del norte de la ciudad como Saavedra, Villa Urquiza y Núñez, presentan 2 hotspots cada una. Esta distribución evidencia la presencia de zonas críticas también en el norte, aunque en menor cantidad y extensión.

En contraposición, se destaca la ausencia de hotspots en las Comunas 2, 10, 11 y 14, que comprenden barrios como Recoleta, Villa del Parque, Villa Devoto y Palermo, donde no se han registrado áreas clasificadas como de peligro alto o muy alto (Figura 4).

Este patrón espacial refuerza la tendencia previamente observada: una distribución desigual del peligro a nivel urbano, con una

COMUNA Nº	BARRIOS QUE LA INTEGRAN	CANTIDAD DE HOTSPOTS DE PELIGRO MUY ALTO
1	Constitución, Puerto Madero, San Telmo, Monserrat, San Nicolás, Retiro	1
2	Recoleta	0
3	San Cristóbal, Balvanera	1
4	La Boca, Barracas, Parque Patricios, Nueva Pompeya	4
5	Almagro, Boedo	1
6	Caballito	1
7	Flores, Parque Chacabuco	3
8	Villa Soldati, Villa Riachuelo, Villa Lugano	1
9	Parque Avellaneda, Liniers, Mataderos	1
10	Floresta, Vélez Sarsfield, Villa Luro, Monte Castro, Villa Real, Versalles	0
11	Villa Devoto, Villa del Parque, Villa Santa Rita, Villa General Mitre	0
12	Villa Pueyrredón, Villa Urquiza, Saavedra, Coghlan	2
13	Núñez, Belgrano, Colegiales	2
14	Palermo	0
15	Villa Crespo, Chacarita, Paternal, Agronomía, Parque Chas, Villa Ortúzar	1

Tabla 3. Cantidad de zonas críticas (hotspots) por comuna dentro del territorio de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Su identificación facilitará la toma de decisiones para la gestión ambiental y el ordenamiento territorial.
Nota: Si bien el total por comuna suma 18, el número real de hotspots identificados es 14. La diferencia se debe a que algunas zonas críticas atraviesan más de una comuna y fueron contabilizadas en cada una de ellas.

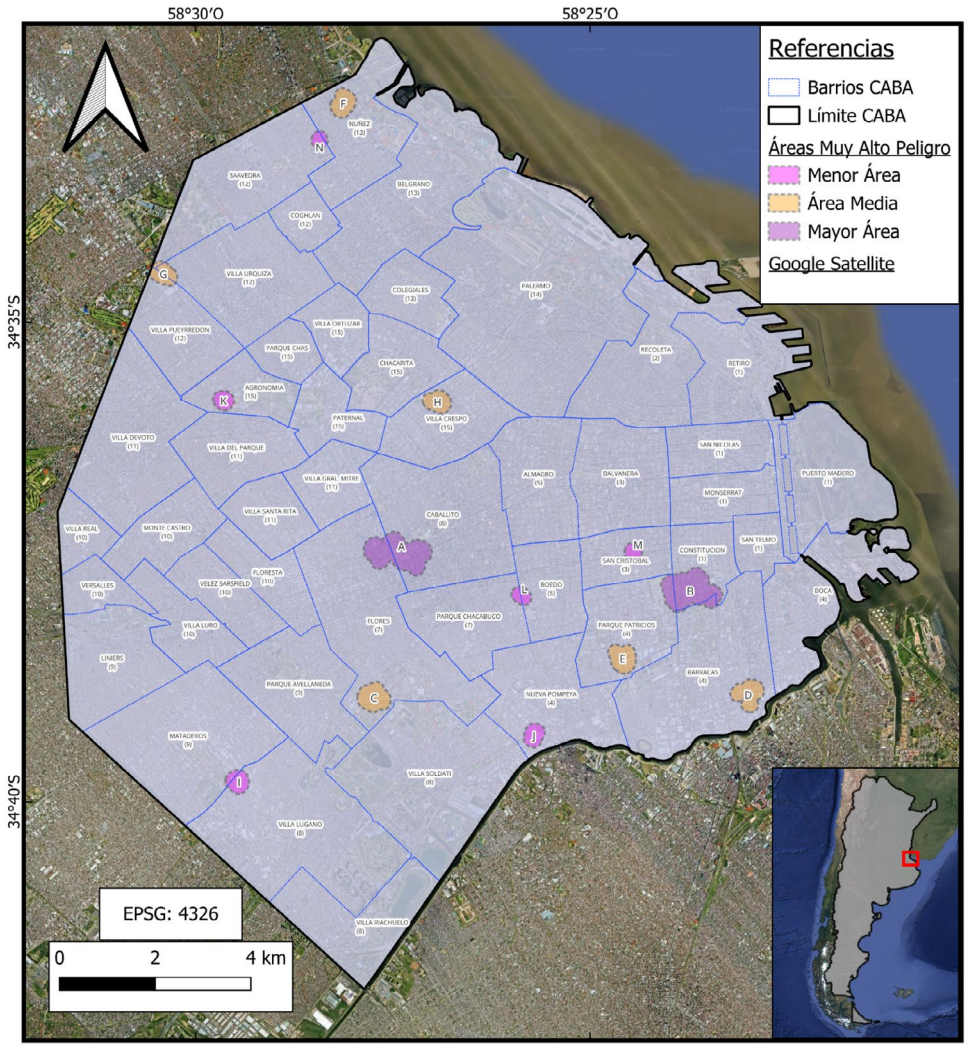


Figura 4. Mapa de las áreas categorizadas como de Peligro Muy Alto a la contaminación de suelos y aguas en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). Se incluye la división del territorio por barrios (entre paréntesis se detallan las comunas a las que pertenecen).

mayor concentración de zonas críticas en el sur de la ciudad, posiblemente asociada a factores estructurales y geográficos relacionados con el uso del suelo, la localización de ciertas actividades urbanas y la configuración histórica del territorio. En este sentido, un factor que merece especial atención es la presencia de la Cuenca Matanza-Riachuelo en el sector sur, cuya complejidad ambiental, histórica y socioeconómica podría estar íntimamente vinculada con los resultados obtenidos (Berros, 2012; Schmidt, 2017; Pereira, 2021). La Tabla 4 resume los resultados obtenidos en el presente trabajo y las recomendaciones de gestión a aplicar para cada caso, considerando extensión areal de cada categoría.

CATEGORÍA DE PELIGRO	DESCRIPCIÓN	RECOMENDACIONES DE GESTIÓN	ÁREA (KM²)	ÁREA RELATIVA (%)
Muy Bajo	Escasa o nula presencia de fuentes potencialmente contaminantes.	Baja prioridad; no se requieren intervenciones inmediatas.	23,15	11,36%
Bajo	Presencia limitada de fuentes potenciales de contaminación.	Seguimiento moderado y gestión preventiva.	50,54	24,80%
Medio	Presencia relevante de actividades o instalaciones con potencial impacto por contaminantes.	Monitoreo periódico y acciones puntuales de gestión.	106,59	52,28%
Alto	Alta concentración de fuentes potencialmente contaminantes.	Estrategias específicas de control, prevención o remediación.	23,03	11,30%
Muy Alto	Máxima densidad de elementos de peligro ambiental.	Prioridad alta en planificación ambiental y gestión activa.	0,53	0,26%

Tabla 4. Caracterización de las categorías del peligro, áreas y recomendaciones de gestión sugeridas.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología replicable y de bajo costo para la evaluación preliminar del peligro ambiental en contextos urbanos complejos, basada en el uso de análisis espacial multicriterio con información pública. Los resultados obtenidos para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires evidencian la utilidad del enfoque propuesto para identificar zonas críticas con mayor exposición a fuentes puntuales de contaminación del suelo y del agua subterránea.

Entre los principales resultados se destacan:

- La concentración de áreas de peligro Alto y Muy Alto en sectores del sur y sudoeste de la ciudad, en barrios que combinan usos industriales, logísticos y residenciales de alta densidad.
- La identificación de 14 zonas de peligro Muy Alto, clasificadas por tamaño e intensidad, que constituyen nodos prioritarios para la gestión ambiental urbana y posibles focos de intervención territorial.
- La validación de la metodología como herramienta útil, replicable y accesible para fortalecer políticas públicas de prevención, planificación territorial y monitoreo ambiental, promoviendo así un uso más eficiente y equitativo de los recursos.

El modelo desarrollado combina criterios técnicos y herramientas de SIG, generando productos cartográficos de alta resolución espacial y siendo una herramienta clave para avanzar hacia una gestión ambiental urbana más proactiva, territorializada y basada en evidencia. Futuros desarrollos metodológicos deberían considerar la integración de indicadores sociales, hidrogeológicos y sanitarios, así como evaluaciones específicas de vulnerabilidad y exposición de la población. Asimismo, la metodología puede ser adaptada y escalada a otras ciudades con características urbanas y ambientales comparables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Buenos Aires (UBA), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a los equipos docentes y técnicos que acompañan nuestras etapas de formación. En el contexto actual que atraviesa el país, consideramos fundamental reafirmar la importancia de garantizar el acceso a una educación pública, gratuita y de calidad, así como el sostenimiento institucional de la investigación científica, tanto básica como aplicada. Valoramos profundamente el compromiso de las instituciones que hacen posible generar conocimiento al servicio de la sociedad.

REFERENCIAS

Auge, M. (2004). *Hidrogeología Ambiental* (Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Ordenamiento Territorial N°5). Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Dirección de Geología Ambiental y Aplicada.

Auge, M. (2006). *Hidrogeología de la ciudad de Buenos Aires* (Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Ordenamiento Territorial N°6). Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Dirección de Geología Regional y Aplicada.

Auge, M. (2007). *Vulnerabilidad de Acuíferos* (Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Ordenamiento Territorial N°7). Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Dirección de Geología Regional y Aplicada.

Bagdanavičiūtė, I. y Valiūnas, J. (2013). GIS-based land suitability analysis integrating multi-criteria evaluation for the allocation of potential pollution sources. Environ Earth Sci, 68, 1797–1812. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1869-7

Barreto, L. (2024). De infraestructuras para "purificar la ciudad", injusticias espaciales y activismos: Sostener la vida urbana cerca de un relleno sanitario en Buenos Aires. *Iluminuras*, 24(67), 1-36.

Basílico, G. O., De Cabo, L. y Faggi, A. (2015). Adaptación de índices de calidad de agua y de riberas para la evaluación ambiental en dos arroyos de la llanura pampeana. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 17(2), 119-134.

Berros, M. V. (2012). Relatos sobre el río, el derecho de la Cuenca Matanza - Riachuelo. Revista de Derecho Ambiental Universidad de Palermo, 1, 111-163.

Calderon, G., Zulaica, M. L., Massone, H. E. y Dalla Torre, J. (2020). Vinculación entre el Ordenamiento Territorial y la gestión del agua en Argentina y en la provincia de Buenos Aires. Análisis de aspectos normativos e institucionales (2003-2019). *Revista de geografía Norte Grande*, (77), 173-189. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000300173

Esparza, J. (2021). Clasificación y afectación por residuos sólidos urbanos en la ciudad de La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 37.

Fernandes, A., Terêncio, D., Pacheco, F. y Fernandes, L. (2021). A combined GIS-MCDA approach to prioritize stream water quality interventions, based on the contamination risk and intervention complexity. *Science of The Total Environment*, 798, 149322. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149322

Gatti, D., Silva Busso, A. y Seoane, N. (2005). Vulnerabilidad del Acuífero Pampeano en el Área del Conurbano Bonaerense y Ciudad de Buenos Aires. *XX° Congreso Nacional del Agua. Libro Resúmenes*, 30.

Hammam, A. A., Mohamed, W. S., Sayed, S. E.-E., Kucher, D. E. y Mohamed, E. S. (2022). Assessment of Soil Contamination Using GIS and Multi-Variate Analysis: A Case Study in El-Minia Governorate, Egypt. *Agronomy*, 12(5), 1197. https://doi.org/10.3390/agronomy12051197

Janikowski, R., Kucharski, R. y Sas-Nowosielska, A. (2000). Multi-Criteria and Multi-Perspective Analysis of Contaminated Land Management Methods. *Environ Monit Assess*, 60, 89–102. https://doi.org/10.1023/A:1006152212344

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Melignani, E. (2017). *Pautas para la remediación y recuperación de áreas sujetas a contaminación mixta de cuencas urbanas y periurbanas de llanura* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6192_Melignani

Merlinsky, M. G. y Tobias, M. (2021). Conflictos por el agua en las cuencas de los ríos Matanza-Riachuelo y Reconquista: Claves para pensar la justicia hídrica a escala metropolitana. Punto Sur, 5, 24-40.

Pereira, P. D. (2021). Áreas protegidas urbanas: tensiones y desafíos de la conservación en la Cuenca Matanza-Riachuelo (Argentina). Medio Ambiente y Urbanización, 94(1), 165-206.

Ratto, S., Marceca, E., Moscatelli, G., Abbruzese, D., Bardi, H., Bossi, M., Bres, P., Cordón, G., Di Nano, M. P., Murruni, L., Potarsky, K. y Williams, F. (2004). Evaluación de la contaminación orgánica e inorgánica en un suelo aluvial de la costa del Riachuelo, Buenos Aires, Argentina. Ecología austral, 14(2), 179-190. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2004000200009&lng=es&tlng=es

Saaty, T. (1980). Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process. McGraw Hill.

Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. (1999). *Escenario hidrogeológico general de los principales acuíferos de la llanura pampeana y mesopotamia meridional Argentina*. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, PNDSAS.

Schmidt, M. (2017). Territorio, ambiente y patrimonio en la Cuenca Matanza Riachuelo. Avá, (30), 183-204.

Viglianchino, L. E., Grondona, S., Bedmar, F., Angelini, H. P. y Massone, H. E. (2023). El mapa de vulnerabilidad del acuífero como instrumento de prevención de la contaminación del agua en áreas agrícolas. La cuenca del Arroyo de los Padres (Partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 50, 1-9. https://doi.org/10.59069/24225703ee011

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DEL PROYECTO CONFINAR GEO: ETAPA INICIAL, AVANCES Y DESAFÍOS

María Victoria Altinier[1], Fabiana Robledo[1], Juan Pablo Alvarez[1]
[1]Gerencia Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos, Gerencia de Área Seguridad Nuclear y Ambiente, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Av. del Libertador 8250, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: valtinier@cnea.gob.ar; mvaltinier@gmail.com

RESUMEN

El proyecto ConfinAR Geo tiene como meta la implementación de un repositorio geológico profundo para la disposición final de residuos radiactivos de nivel alto y combustibles nucleares gastados generados en Argentina. Esta tecnología es actualmente la única solución técnica que cuenta con el consenso científico internacional para garantizar una gestión segura, definitiva y responsable de estos materiales.

El proyecto es desarrollado y gestionado por el Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos, que depende de la Comisión Nacional de Energía Atómica y tiene a su cargo la responsabilidad de su ejecución. Se encuentra en la etapa inicial de planificación, la cual incluye la elaboración de una hoja de ruta a largo plazo en la que se definen los objetivos estratégicos, actividades principales, entregables y cronogramas tentativos del proyecto. Durante esta etapa se elaborará un estudio de seguridad genérico para evaluar la viabilidad técnica y demostrar la seguridad del diseño conceptual, acompañado por un plan de I+D que respalde la caracterización de sitios y la validación tecnológica. En paralelo, se establecerán estrategias para promover la participación en el proyecto de los generadores de residuos radiactivos, la comunidad y demás partes interesadas.

El enfoque del proyecto es interdisciplinario y transversal, integrando geociencias, ingeniería, ciencias humanas y sociales, gestión ambiental, aseguramiento de la calidad y gestión del conocimiento, en articulación con universidades, centros de investigación nacionales e internacionales y diversos actores sociales. Este abordaje integral respalda una solución técnica robusta, social y ambientalmente responsable, en consideración a las generaciones presentes y futuras.

Palabras clave: Repositorio Geológico Profundo, Planificación Estratégica, Gestión de Residuos Radiactivos.

ABSTRACT

The ConfinAR Geo project aims to implement a Deep Geological Repository (DGR) for the disposal of high-level radioactive waste and spent nuclear fuel generated in Argentina. This technology is currently the only internationally recognized solution with broad scientific consensus to ensure the safe, permanent, and responsible management of these materials.

The project is led and managed by the National Radioactive Waste Management Program, which is dependent on the National Atomic Energy Commission and holds responsibility for its execution. It is currently in the early planning phase, focused on developing a long-term roadmap that out-lines strategic objectives, main activities, key deliverables, and a tentative schedule.

As part of this phase, a generic safety assessment will be conducted to evaluate technical feasi-bility and demonstrate the safety of the conceptual design. This will be supported by a R&D plan aimed at site characterization and technology validation. In parallel, strategies will be imple-mented to encourage participation from waste generators, the public, and other relevant stake-holders.

The project adopts an interdisciplinary and cross-sectoral approach, integrating geosciences, engi-neering, environmental management, quality assurance, human and social sciences, and knowledge management. It collaborates with universities, research institutions—both national and international—and a broad range of social actors. This approach supports a technically robust, socially and environmentally responsible solution that considers both present and future genera-tions.

Keywords: Strategic Planning, Radioactive Waste Management, Deep Geological Disposal.

INTRODUCCIÓN

Las actividades nucleares en Argentina comenzaron en 1950, y desde entonces se han generado distintos tipos de residuos radiactivos y combustibles gastados, cuya gestión segura y eficiente es fundamental para la protección de las personas y el ambiente ante los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. La responsabilidad legal de esta gestión, según el marco jurídico nacional vigente, recae en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) a través del Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (PNGRR), y está establecida en la Ley N° 25.018 (1998).

Al día de hoy, un desafío pendiente es la disposición final de los residuos radiactivos de nivel alto y los combustibles nucleares gastados. Para dar respuesta a esta necesidad, se ha propuesto el Proyecto ConfinAR Geo, cuya meta es implementar un reposi-

torio geológico profundo (RGP), instalación subterránea que consiste en un sistema de confinamiento basado en el concepto de barreras múltiples. Estos sistemas se ubican en galerías subterráneas situadas entre 450 y 1000 metros de profundidad, dentro de formaciones geológicas que presentan propiedades físicas, químicas y mecánicas estables frente a la circulación y actividad de los radionucleidos. La interposición de dos o más barreras geológicas e ingenieriles busca retardar lo máximo posible el tiempo de contacto entre los materiales radiactivos y el agua subterránea, principal agente de transporte y dispersión de contaminantes en el subsuelo (IAEA, 2020). De esta manera, se asegura que, en caso de lixiviación y liberación de radionucleidos, el tiempo de tránsito hacia la biósfera se prolongue hasta que su actividad haya decaído a niveles seguros para las personas y el ambiente, de acuerdo con las normas básicas de protección radiológica (IAEA, 2012; ARN, 2019).

En este trabajo se aborda la planificación estratégica del Proyecto ConfinAR Geo, la cual se sustenta en la revisión de antecedentes nacionales e internacionales, los objetivos estratégicos del proyecto y los principales componentes de la planificación, tales como estructura, etapas de desarrollo y sistema de gestión. En este contexto, se han considerado experiencias relevantes como la del repositorio de Onkalo en Finlandia (Pintado Llurba, 2018) y el Plan Estratégico de Disposición Geológica Profunda de España (ENRESA, 2023), así como recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2014). En la Tabla 1 se presentan las distintas etapas del proyecto, su duración estimada y objetivos principales. Actualmente, el proyecto se encuentra en su etapa inicial.

ETAPA	DURACIÓN ESTIMADA	OBJETIVOS PRINCIPALES
Inicial	3 a 6 años	Definir el plan global del proyecto
		Establecer la estructura y sistema de gestión del proyecto
		Identificar los sitios favorables para el emplazamiento de un repositorio geológico profundo
Preselección de sitios	2 a 5 años	Identificar sitios geológicamente aptos para el aislamiento de los residuos radiactivos y la construcción de la instalación subterránea
Selección de sitio	5 a 10 años	Seleccionar un sitio para la construcción del repositorio geológico
Caracterización de sitio	15 a 25 años	Conocer el funcionamiento del sistema natural
		Confirmar la idoneidad del sitio seleccionado para albergar un repositorio geológico
Construcción del repositorio	10 a 20 años	Caracterizar el sitio específico de la excavación
		Construir el repositorio geológico profundo y las instalaciones de superficie asociadas
		Monitorear los parámetros geomecánicos, hidrogeológicos, geoquímicos y térmicos durante el progreso de la obra

Tabla 1. Etapas y objetivos principales del Proyecto ConfinAR Geo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se basó en un enfoque metodológico que integró la recopilación, sistematización y análisis de información técnica, normativa y científica, junto con la aplicación de herramientas de gestión de proyectos, tales como estructuras de desglose de trabajo, cronogramas y asignación de responsabilidades, entre otras.

Definición de la hoja de ruta del proyecto

Se definió una hoja de ruta representativa a partir del análisis comparativo de diversos enfoques metodológicos para la planificación de proyectos de esta envergadura. En ella se describen las actividades generales correspondientes a cada fase.

Con el objetivo de facilitar la organización y garantizar la trazabilidad, el proyecto fue estructurado en elementos principales y subelementos, conforme a las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2024). A modo ilustrativo, en la Tabla 2 se presenta un extracto de dicha hoja de ruta (actualmente en proceso de publicación interna en CNEA), que muestra un conjunto representativo de actividades relacionadas con estudios geológicos durante la etapa inicial del proyecto.

Entregables

Los entregables son los productos generados para cumplir con los objetivos del proyecto. Es-tos pueden incluir servicios, documentos técnicos, informes, modelos, bases de datos y otros re-sultados relevantes.

Para cada actividad general identificada en la hoja de ruta se definieron los entregables principales. A modo de ejemplo, la Tabla 3 presenta un extracto de los entregables asociados a las actividades generales mostradas en la Tabla 2, junto con una breve descripción de su propósi-to. Disponer de entregables claramente establecidos permite orientar y estructurar el trabajo, además de facilitar el seguimiento del avance del proyecto.

ELEMENTO	SUBELEMENTO	ACTIVIDAD GENERAL	OBJETIVO
Gestión del Proyecto	Planificación Estratégica	Desarrollo del Plan de I+D	Presentar las actividades futuras de investigación y desarrollo necesarias tras la selección del sitio
Desarrollo del sistema de disposición	Investigación de sitio y caracterización	Recopilación de información geológica a nivel nacional	Reunir la información geológica disponible para identificar áreas con potencial geológico favorable
		Desarrollo de modelos conceptuales preliminares de sitios	Elaborar modelos del sistema geológico, caracterizar la roca hospedante y su entorno
		Revisión de métodos y herramientas para la investigación y caracterización de sitios	Evaluar técnicas y tecnologías disponibles para optimizar la futura caracterización del sitio seleccionado
	Modelado y simulación	Desarrollar un modelo conceptual genérico de la evolución a largo plazo del sistema de disposición	Representar los principales procesos que afectarán la estabilidad y seguridad del sistema de disposición a escala de tiempo geológico

Tabla 2. Extracto de la hoja de ruta que resume algunas de las actividades relacionadas a estudios geológicos, previstas durante la etapa inicial del proyecto.

ACTIVIDAD GENERAL	ENTREGABLE	DESCRIPCIÓN
Desarrollo del Plan de I+D	Plan de I+D	Documento que define las líneas prioritarias de I+D e identifica los objetivos, metodologías y productos esperados, en articulación con el Plan Maestro del Proyecto
Recopilación de información geológica a nivel nacional	Estudio de la información geológica disponible	Informes técnicos en los que se recopilan, organizan y analizan los datos geológicos existentes, relevantes para la identificación de áreas potenciales para el emplazamiento de un repositorio geológico profundo
Desarrollo de modelos conceptuales preliminares de sitios	Informe técnico sobre modelos conceptuales de sitios	Modelos conceptuales preliminares de sitios potencialmente aptos para albergar un repositorio geológico
Revisión de métodos y herramientas para la investigación y caracterización de sitios	Informe técnico	Documento técnico que analiza métodos y herramientas para la caracterización y evaluación de la idoneidad de sitios
Desarrollo de un modelo conceptual genérico de la evolución a largo plazo del sistema de disposición	Informe técnico	Modelo genérico del repositorio geológico a largo plazo, que integra geosfera, barreras de ingeniería y biosfera, como base para la evaluación de seguridad

Tabla 3. Entregables asociados a las actividades generales descriptas en la Tabla 2.

Estructura de desglose de trabajo

Se elaboró una estructura de desglose de trabajo (EDT), en la que se segmentan las actividades generales en paquetes de trabajo integrables, coherentes y gestionables. Esta descomposición permite planificar, coordinar y controlar el desarrollo de cada entregable de manera eficiente. La Figura 1 presenta un ejemplo representativo de dicha estructura.

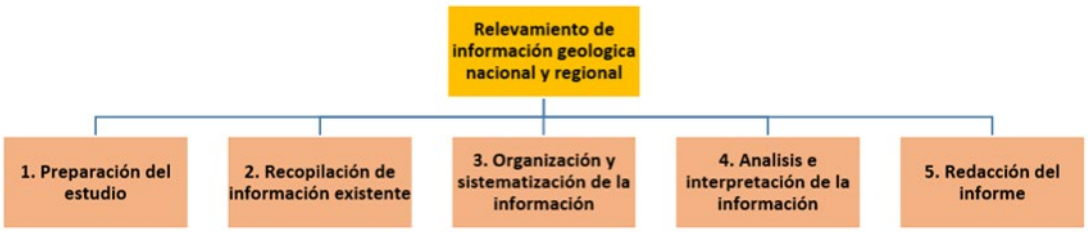


Fig. 1. Ejemplo de EDT correspondiente a la actividad general de relevamiento de información geológica.

Diagrama de Gantt

La definición de los paquetes de trabajo y sus entregables asociados facilita la construcción de un cronograma detallado que distribuye temporalmente las actividades del proyecto. Esta programación contempla tanto la secuencia lógica de ejecución como la posible superposición de tareas, considerando sus duraciones estimadas en función de los recursos disponibles. La Figura 2 presenta un extracto del diagrama de Gantt correspondiente al trienio 2025-2027.

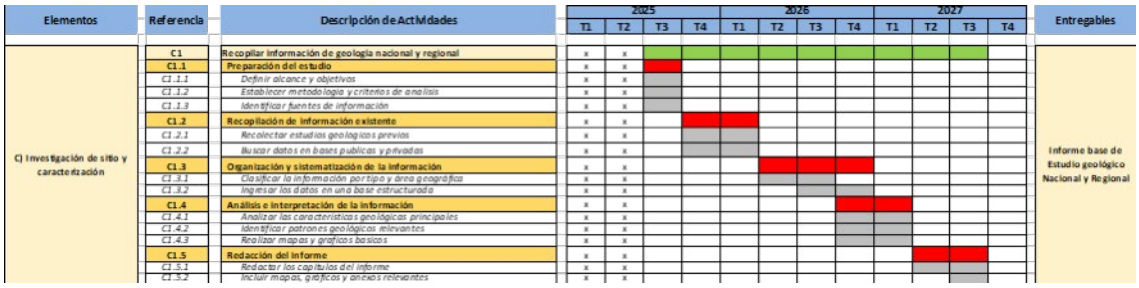


Fig. 2. Extracto del diagrama de Gantt que muestra la planificación temporal de las actividades del proyecto para el trienio 2025-2027.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis realizado se elaboró la hoja de ruta estratégica del proyecto ConfinAR Geo, en la que se definen las etapas, los procesos, los plazos estimados, los entregables y los objetivos a cumplir para la transición de una fase a otra e implementar un repositorio geológico profundo (RGP) para la disposición final de residuos radiactivos y combustibles nucleares gastados. Asimismo, se desarrollaron la estructura de desglose de trabajo (EDT) y el diagrama de Gantt a fin de organizar y estructurar el proyecto de manera eficiente.

Estas herramientas de gestión de proyectos se incorporan con el propósito de optimizar los recursos disponibles, así como para facilitar el seguimiento y control de la ejecución en cada fase del proyecto, desde su concepción hasta la construcción de la instalación subterránea. Además, permiten establecer hitos claros de avance, facilitar la toma de decisiones ante escenarios complejos y propiciar la continuidad técnica e institucional del proyecto a largo plazo.

CONCLUSIONES

Dado que la construcción y puesta en operación de un repositorio geológico profundo es un proceso complejo y de muy largo plazo —que puede extenderse por varias décadas—, se ha adoptado un enfoque basado en la toma de decisiones escalonadas, etapas adaptativas y un diálogo permanente con las partes interesadas. Este enfoque contribuye a una gestión más eficiente de los recursos, permite mitigar las incertidumbres inherentes al proyecto y fortalece la confianza institucional y social, aspectos cruciales en iniciativas de esta envergadura.

En este contexto, la planificación estratégica constituye un insumo esencial para anticipar riesgos, optimizar recursos y asegurar la viabilidad del Proyecto ConfinAR Geo. Su implementación facilita, además, la coordinación interdisciplinaria y el cumplimiento de los hitos a lo largo de las distintas etapas del desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al equipo multidisciplinario del PNGRR por su compromiso y participación en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2019). Norma AR 10.1.1. *Norma básica de seguridad radiológica*. Rev. 4, ARN, Buenos Aires, Argentina.

Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S. A. (ENRESA) (2023). *7º Plan General de Residuos Radiactivos.* Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012). *Disposición final de desechos radiactivos. Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente*. Requisitos de seguridad específicos, N.º SSR-5, IAEA, Viena, Austria.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014). *Planning and design considerations for geolog-ical repository programmes of radioactive waste*. IAEA-TECDOC-1755, IAEA, Viena, Austria.

International Atomic Energy Agency. 2020. *Design principles and approaches for radioactive waste repositories*. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.27, IAEA, Viena, Austria.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2024). *Roadmap for Implementing a Geological Dis-posal Programme.* IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.43, IAEA, Viena, Austria.

Ley 25.018 (1998). *Régimen de Gestión de Residuos Radiactivos.*

Pintado Llurba, X. (2018). *Construir para la eternidad. Finlandia, bajo su superficie*. Fundación ESTEYCO, Madrid, España.

APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS DE PROSPECCIÓN PARA EVALUAR LA GÉNESIS DE GEOFORMAS GRANÍTICAS

Eduardo García Araoz[1], Matías Forno[2], Bernabé R. Franchino[3], German R. Molina[3]

[1]Instituto de Tecnología Minera, Centro Regional Córdoba, Servicio Geológico Minero Argentina, Celso Barrios 1712 – Barrio Jardín Espinoza, Córdoba, Argentina.

[2]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

[3]Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

Mail de contacto: rmolina@unc.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del subsuelo en sectores puntuales del macizo de Achala, mediante métodos de prospección geofísica, con el fin de comprobar la existencia de geoformas que aún no afloran en superficie. Esta investigación permitió obtener información relevante para comprender el origen de estas formas y la evolución geomorfológica del macizo. Se aplicaron tres métodos geofísicos: georradar, sísmica de refracción–tomografía sísmica y sondeo eléctrico vertical. La elección de estas técnicas se debe a su carácter no invasivo, versatilidad y alta calidad de datos en terrenos graníticos. La traza estudiada se definió a partir de observaciones de campo, donde se identificaron geoformas típicas de paisajes graníticos. El uso combinado de los métodos permitió delimitar capas litológicas, estimar la distribución de humedad y fracturamiento y profundizar en el análisis del frente de meteorización del macizo. Aunque no se identificaron geoformas puntuales bajo la superficie, los perfiles geofísicos obtenidos facilitaron la elaboración de un modelo del desarrollo del perfil de meteorización. Este modelo indica que dicho proceso avanza especialmente sobre zonas estructuralmente más débiles del macizo, señalando el desarrollo incipiente de morfologías típicas en rocas graníticas, como la "abochonada". Los resultados representan un aporte significativo para interpretar la dinámica geomorfológica del macizo de Achala y potencian futuras investigaciones en zonas similares.

Palabras clave: Geofísica, Geomorfología Granítica, Meteorización.

ABSTRACT

This study presents a subsurface investigation conducted in specific areas of the Macizo de Achala using geophysical prospecting methods, aimed at identifying geoforms that have not yet emerged at the surface. The research provided valuable insights into the origin of these forms and the geomorphological evolution of the massif. Three geophysical methods were applied: ground-penetrating radar (GPR), seismic refraction–seismic tomography, and vertical electrical sounding. These techniques were selected due to their non-invasive nature, versatility, and high data quality in granitic terrains. The survey line was chosen based on field observations, where typical geoforms of granitic landscapes were identified on the surface. The combined use of the methods allowed for the delineation of lithological layers, estimation of moisture distribution and fracturing patterns, and a deeper understanding of the weathering front within the massif. Although no specific subsurface geoforms were identified, the geophysical profiles enabled the development of a model for the evolution of the weathering profile. This model suggests that the process progresses more rapidly through structurally weaker zones of the massif, indicating the early development of characteristic granitic morphologies, such as the boulder-like "abochonada" forms. The results provide significant contributions to understanding the geomorphological dynamics of the Achala Massif and offer a foundation for future studies in similar environments.

Keywords: Geophysics, Granitic geomorphology, Weathering.

INTRODUCCIÓN

El Batolito de Achala, es un territorio aproximado de 2.500 km2 de superficie, emplazado en las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba, Argentina. De acuerdo con Gaido et al. (2005), en el sector, se han desarrollado diversos trabajos de carácter regional que han contribuido al conocimiento de las Sierras Pampeanas de Córdoba y que han servido de base para describir e interpretar las diferentes unidades geológicas. La litología presente en el área de estudio es granítica de facie granítica porfírica de grano grueso según Gaido y Murra (2006).

Tradicionalmente, los estudios geomorfológicos de los ambientes graníticos se han enfocado en el análisis de las formas del relieve que se encuentran aflorando en la superficie (García Aráoz et al. 2018). Sin embargo, en un estudio de Roqué et al. (2013)

han demostrado que es posible detectar gnammas y taffoni en subsuelo, en la zona que comprende el regolito, arrojando así evidencias trascendentes para comprender su génesis y la historia evolutiva del macizo rocoso. Este tipo de geoformas y tipo de ambiente son ampliamente reconocidas en los afloramientos graníticos del Batolito de Achala en la provincia de Córdoba (García Aráoz et al. 2018), es por ello que en este trabajo se muestran los resultados del estudio realizado del subsuelo con técnicas geofísicas con el fin de analizar las condiciones que subyacen el terreno, particularmente de la zona que comprende el regolito, en un sitio puntual del Batolito de Achala.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo tuvo como objetivo el estudio del subsuelo en un sitio puntual del macizo de Achala, a través de métodos geofísicos de prospección para comprobar la existencia de geoformas que aún no se encuentran aflorando en la superficie.

Para los efectos del estudio, se utilizaron tres métodos geofísicos de prospección: el método de georradar, el método de sísmica de refracción-tomografía sísmica y el sondeo eléctrico vertical. La razón de utilizar estos métodos fue porque constituyen excelentes instrumentos para los estudios del subsuelo en terrenos graníticos dada su versatilidad en cuanto a su uso, y por la calidad de los datos que arrojan (Kearey et al., 2002; Daniels, 2004). Se realizó un reconocimiento del área de estudio y selección del lugar aptos para levantamiento de perfiles con los métodos utilizados (ver Fig.1 y Tabla.1).

Para lo prospección con sísmica de refracción-tomografía sísmica se utilizó un sismógrafo GEODE de 24 canales de Geometrics Inc., una batería como fuente de energía eléctrica del sismógrafo, un cable sísmico con separación de 5 m para 24 geófonos, 24 geófonos de 4,5 Hz, una masa de 15 kg junto a su cable de disparo o trigger y una PC portátil para el control y almacenamiento de los datos sísmicos provistos por el sismógrafo. El levantamiento de los datos sísmicos se realizó a partir de 5 golpes o tiros de trigger por perfil sísmico. El primer golpe (T1) se efectúo a -10 m de distancia del geófono 1, el segundo golpe se efectuó entre los geófonos 6 y 7 (T2), el tercer golpe se efectuó entre los geófonos 12 y 13 (T3), el cuarto golpe se efectuó entre los geófonos 18 y 19 (T4), finalizando con el quinto golpe a 10 m de distancia del geófono 24 (T5). Los registros sísmicos obtenidos en cada operación servirán más tarde para el procesamiento de los datos y la obtención del modelo de tomografía sísmica de refracción (Kearey et al., 2002).

La prospección con georradar se realizo con el RAMAC/GPR de la firma MALÅ GeoScience con una antena no blindada de 25 MHz. Obteniendo el perfil denominado P1 de 150 m de longitud. La velocidad de propagación de ondas electromagnéticas utilizada para este tipo de medios atravesados fue de 0.12 m/nseg, obteniendo una profundidad de investigación de 50 m aproximadamente. Esta velocidad se eligió en función de las características del medio en cuanto a sus valores dieléctricos.

Para el sondeo eléctrico vertical o SEV, se utilizó un resistivimetro GEOMETER MPX-400, con configuración electrodica Schlumberger y una separación máxima de los electrodos inyectores de corriente o AB de 200 m, logrando así una profundidad de investigación de aproximadamente 50 m.

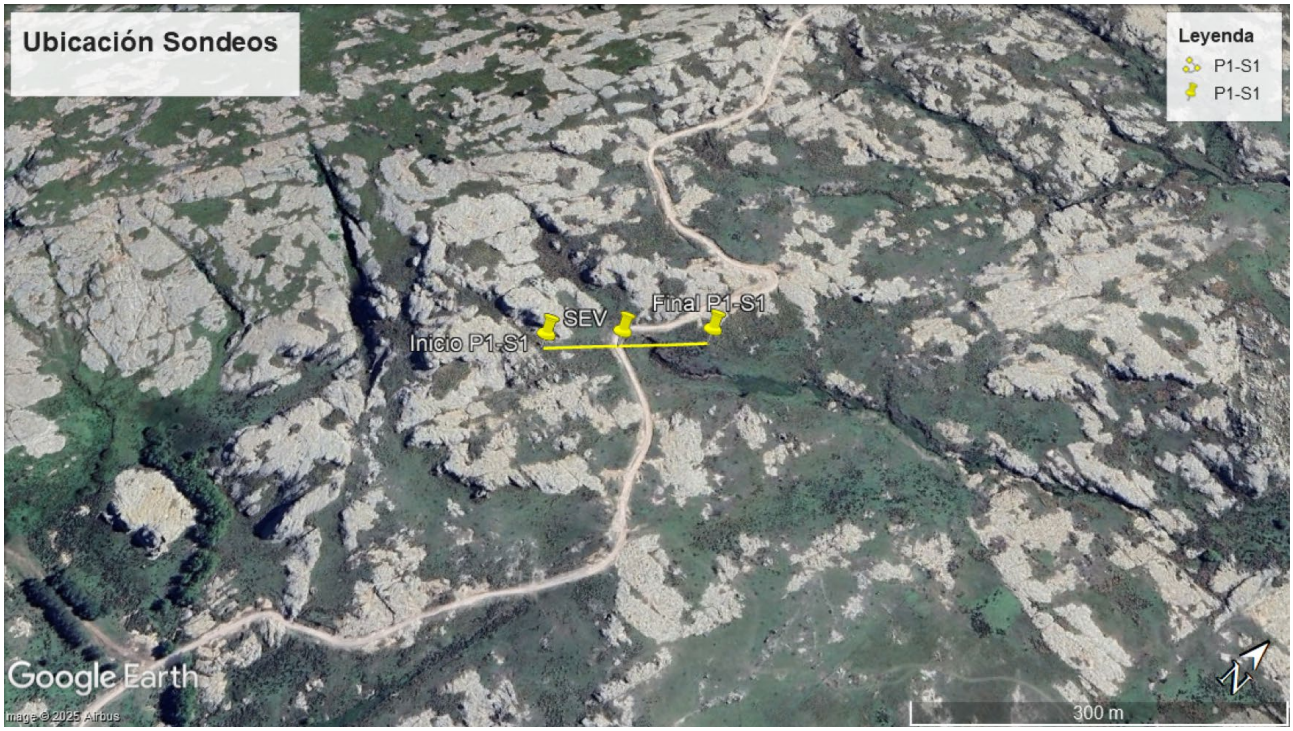


Fig. 1. Imagen de la zona de estudio y sus perfiles prospectados.

NOMBRE DEL PERFIL		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		LONGITUD DEL PERFIL [M]
		Latitud	Longitud	
S1	Inicio	31°38'49.16"S	64°49'30.17"O	115
	Final	31°38'46.31"S	64°49'27.37"O	
P1	Inicio	31°38'49.16"S	64°49'30.17"O	150
	Final	31°38'45.25"S	64°49'26.34"O	
Ubicación del SEV en las coordenadas: 31°38'47.39"S - 64°49'28.46"O, con una profundidad estimada de investigación de 50 m.				

Tabla 1. Ubicación del perfil sísmico, georradar y sondeo eléctrico vertical ejecutado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para las tomografías sísmicas (S1) se realizó una discretización de los estratos en base al criterio de determinar capas de materiales sedimentarios (< 700 m/s), no estructurados o regolito (< 2.000 m/s), alterados o muy fracturados (< 4.500 m/s) y poco fracturados (> 4.500 m/s).

De acuerdo con la Fig. 2, para el tendido S1 es posible observar un perfil compuesto por cuatro capas, con velocidades crecientes en profundidad. La capa más superficial posee espesores menores a 3,5 m y velocidades de onda P, que no superan los 700 m/s.

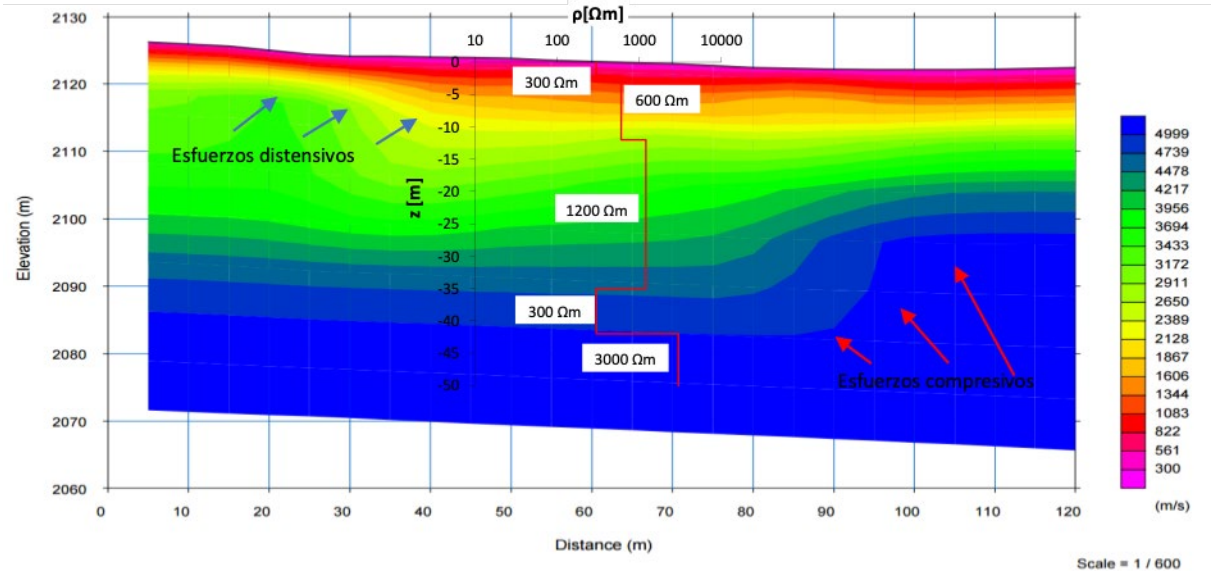


Fig. 2. Modelo de Tomografía Sísmica de refracción, superpuesto con el perfil de resistividad eléctrica aparente obtenido del SEV.

Se dispone de forma subhorizontal, siguiendo el relieve topográfico. La zona de menor espesor en esta capa coincide con la máxima elevación topográfica, lo cual puede indicar un proceso de erosión de la misma, que actúa con más intensidad sobre esa zona. Por debajo se observan materiales con velocidades que van desde los 700 m/s a los 2.000 m/s. En general, los límites superior e inferior, de esta capa copian también la topografía del terreno. Se observa aquí un espesor que varía entre 7 a 10 m, aunque a partir de los 80 metros del tendido se observa un adelgazamiento progresivo de la capa terminando en un espesor de 3m. Subyacente a este material, se puede identificar una capa de mayor espesor compuesta por materiales con velocidades crecientes de 2.000 m/s y hasta 4.500 m/s. Los espesores registrados van desde los 12 m en la progresiva 0, ensanchándose hasta 28 m en el final de la progresiva. La capa más profunda identificada se encuentra a una profundidad que varía de 20 m a 32m de profundidad y está conformada por materiales que superan los 4.500 m/s de velocidad. La distribución de las subcapas que la componen es aquí más homogénea, a medida que aumenta la profundidad.

En el radargrama denominado "P1" (ver Fig. 3), se puede identificar una zona superficial de no más de 5 m de profundidad, la cual corresponde a una cubierta sedimentaria constituida por depósitos loéssicos y, subordinadamente, depósitos fluviales. Le sigue una zona con tonalidades azules y violáceas de alta intensidad, caracterizada por presentar un alto grado de alteración de la roca, este material es llamado saprolito o alterita, está formado por fragmentos de roca y/o granos minerales disgregados, por lo tanto, aquí, no se observan planos de discontinuidades bien definidos. En este sector el agua penetra con gran facilidad ya que este material es de una estructura muy abierta lo que lo hace muy permeable.

Una tercera zona en profundidad, con tonalidades claras, estaría conformada por el macizo con un alto grado de fracturamiento. El patrón principal de las fracturas es vertical a sub vertical pero también puede observarse tanto en el margen izquierdo del perfil P1

con buzamientos que no superarían los 45°, se observan aquí reflexiones muy fuertes y esto es debido a la presencia de humedad que se encuentra distribuida en todo el sistema de discontinuidades con un buen grado de conexión entre sí.

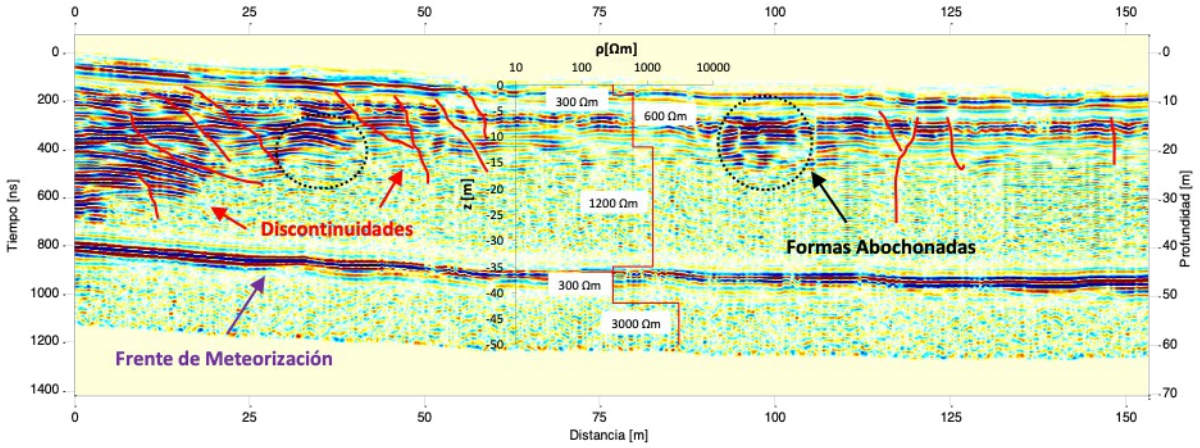


Fig. 3. Radargrama P1 obtenido de la prospección con georradar, superpuesto con el perfil de resistividad eléctrica aparente obtenido del SEV.

Finalmente se puede observar cómo estos contrastes se homogenizan, infiriendo una disminución considerable de las discontinuidades, esto quiere decir que nos encontramos en el dominio de la roca masiva, con poca alteración y escasa presencia de discontinuidades. Cabe destacar en esta zona la presencia de un sector continuo a lo largo de P1 que se encuentra aproximadamente a los 45 metros de profundidad el cual contiene una reflexión de contraste muy fuerte con respecto a la roca adyacente, esto podría estar indicando un límite para el desarrollo del sistema de discontinuidades y que estaría concentrando gran parte del agua que aporta este sistema, identificado en el radargrama como frente de meteorización.

Tanto en la Fig. 2 como en la Fig. 3, se superpuso el perfil escalado de resistividad eléctrica aparente obtenido del modelo de inversión del SEV. En el cual se observa cinco capas de diferentes valores de resistividad eléctrica, en correspondencia con las capas identificadas en la tomografía sísmica y radargrama. La mejor correlación observada, y como es de esperar, es entre los bajos valores de resistividad eléctrica y los contrastes de alta tonalidad observados en los radargramas, atribuidos a las zonas con presencia de agua.

CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos utilizados en este trabajo, demostraron ser herramientas valiosas para la caracterización del subsuelo en el macizo de Achala. Si bien no se identificaron geoformas específicas no aflorantes de manera directa, los resultados permitieron delinear las distintas capas litológicas, comprender la distribución de la humedad y reconocer los principales patrones de fracturamiento e inferir la profundidad del frente de meteorización en el macizo, el cual exhibe un avance preferencial sobre las zonas de debilidad del macizo. Esto indica un desarrollo incipiente de la morfología abochonada característica de los ambientes graníticos.

El origen por meteorización puede ser interpretado en términos del modelo de acuífero estratificado que propone Dewandel et al. (2006) (ver Fig. 4), en los que se describe una capa fisurada estratiforme (para granitos isótropos) ubicada debajo de la capa

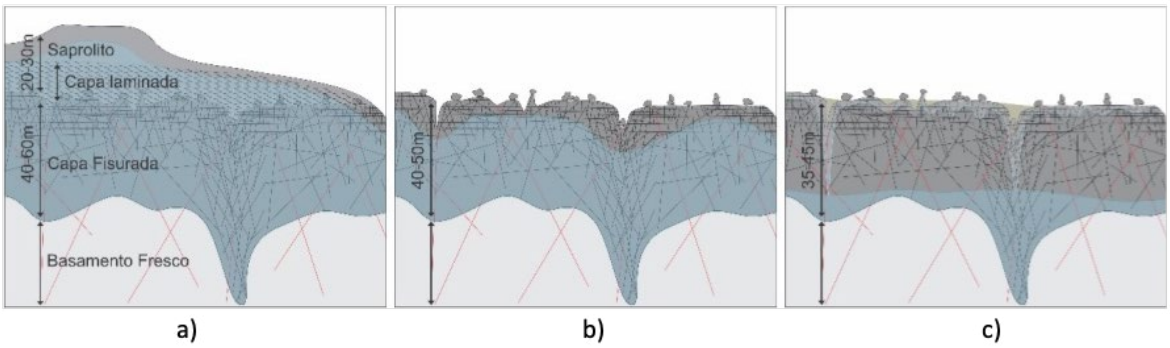


Fig. 4. Esquema de modelo evolutivo correlacionado para el área de estudio, donde se distingue: a) Periodo de estabilidad con formación de etchplain donde se desarrollarían profundos perfiles de meteorización. b) Erosión y desarrollo de pedimentos y escarpes asociados a un cambio del nivel de base por procesos distensivos. c) Nuevo ciclo de meteorización que afectaría principalmente a las zonas del macizo con mayor grado de fisuración, dando como resultado el acuífero profundo y el nivel de humedad superior observado en los resultados. Modificado de Dewandel et al. 2006.

regolítica y que está formada por procesos de meteorización profunda debido a la alteración temprana de ciertos minerales como la biotita. Este modelo se encuentra bien descripto por Lachasagne et al. (2014).

REFERENCIAS

Daniels, David J., (2004). Ground Penetrating Radar - 2nd. Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J. C., Krishnamurthy N.S. (2006) A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of Hydrology 330(1–2), 260–284.

Gaido, M., Murra J., (2006). Hoja Geológica 3166-36, Valle de Calamuchita. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 361. Buenos Aires.52-57.

Gaido, M., Zarco, J., Miró, R., Sapp, M., Gamba, M. y López, H. (2005). Hoja geológica 3166-30, Los Gigantes. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 299. Buenos Aires. http://repositorio.segemar.gob.ar/handle/308849217/215.

García-Araóz, E., Maledón, Nicolas. & Cioccale, Marcela. (2018). Cavernas del Valle de los Lisos: Una hipótesis sobre su origen en el contexto geomorfológico de las Sierras de Córdoba, Argentina. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 35(1), 18-27. http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.1.534

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002) An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd., Oxford.

Lachasagne P., Dewandel, B., Wyns, R. (2014). The Conceptual Model of weathered hard rock aquifers and its practicals applications.

Roque, C., Zarroca, M, y Linares, R, (2013). Subsurface initiation of tafoni in granite terrains. Geophysical evidence from NE Spain: Geomorphological implications. Geomorphology. Vol. 196, 94-105. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X12002991

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE ESCORIAS DE FUNDICIÓN Y SUELOS PIRITOSOS DEL PASIVO MINERO SANTA FLORENTINA, CHILECITO

Sergio Orlando Bahamonde Alvarado[1]
[1]Departamento académico de ciencias y tecnologías aplicadas a la producción al ambiente y al urbanismo Universidad Nacional de La Rioja. Avenida Luis M. de la Fuente, La Rioja, Argentina.
Mail de contacto: sbahamonde@unlar.edu.ar

RESUMEN

La antigua explotación minera de Famatina, (Provincia de La Rioja), estuvo activa desde finales del siglo XIX hasta principios del siglo XX, dejando infraestructura, acopios, escombreras y residuos de fundición (escorias) que son calificadas como pasivo ambiental minero (PAM), los cuales están asociados a la fundición Santa Florentina, Chilecito. Aquí se dan a conocer la caracterización de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas minerales predominantes, tanto en las escorias como los suelos en este sitio. Las escorias presentan, diferentes grados de vitrificación con un comportamiento diferencial frente a la oxidación y están dominadas por familia de piroxenos, magnetitas y trazas de metales preciosos. Los perfiles de suelo que se generan por debajo de las escorias denotan una zona de oxidación con costras eflorescentes con sulfatos de cobre, con un nivel de enriquecimiento supergénicos en su nivel más profundo, que posee una concentración de metales pesados. Los suelos laterales a las escorias denotan una óxido-reducción con pH ácidos; con presencia de jarosita, hidrojarosita, cuarzo y yeso. Los tenores relevados de metales Ag, As, Cu, Pb, Sb, B, Ni y Zn en el PAM de Santa Florentina, son superiores a los límites permisibles establecidos por Argentina, en el caso del arsénico, es más de 1000 % superior, respecto a lo señalado en la normativa.

Palabras clave: geoquímica de suelos y escorias; Santa Florentina, Chilecito; metales pesados.

ABSTRACT

The old mining explotation of Famatina from the late 19th and early 20th centuries has left a series of associated infrastructure, as well as stockpiles, waste dumps and foundry waste (slag) that can be classified as PAM; the last ones mentioned, the minority and majority elements, as well as the predominant minerals (DXF), have been characterized using ICP-Optical, both in the slag and the soils adjacent to the Santa Florentina smelter, Chilecito. Slags present different vitrification facies with differential behavior against oxidation and are dominated by a family of pyroxenes, magnetites and traces of precious metals. The soil profiles that are generated underneath denote an oxidation zone with efflorescent crusts with abundant supergenic copper. The soils generated in this profile, as well as lateral soils, denote an oxidation-reduction with acidic pH; with the presence of jarosites, hydrojarosite, quartz and gypsum. In the case of the profile, a supergene enrichment at its lowest level, with a concentration of heavy metals. The levels of metals Ag, As, Cu, Pb, Sb, Ba, Ni and Zn found in the PAM of Santa Florentina are higher than the established permissible limits, which in the case of Arsenic, is more than 1000% higher, with respect to Argentine regulations.

Keywords: soil and slag geochemistry; Santa Florentina, Chilecito; heavy metals.

INTRODUCCIÓN

La minería y las actividades industriales en general producen cambios e impactan al medio. Muchos de estos productos finales de laboreos o desechos que quedan al terminar ese proceso industrial generan un pasivo ambiental, (PAM), Alegre (2009) e Infante (2011); los cuales podrían afectar al medio.

Durante 1905 y 1925, se explotan diferentes minas en la Sierra de Famatina. También se creó un sector de fundición en Santa Florentina, donde el material era tratado para su concentración. Actualmente las escorias están dispersas en los laterales del horno de fundición, con un volumen de 60.000 m^3.

Una de las características dominantes de estas escorias, es que muestran signos de lixiviación por aguas meteóricas, generando lateralmente y por debajo de ella, oxidación de sus minerales. Lateralmente a los PAM, dominan suelos lixiviados con pirita como escombreras.

El objetivo de este trabajo de investigación pretendió identificar y caracterizar desde un punto de vista mineralógico y geoquímico los depósitos de escorias de fundición y suelos piritosos laterales, haciendo especial énfasis en los minerales secundarios asociados a procesos de oxidación y lixiviación.

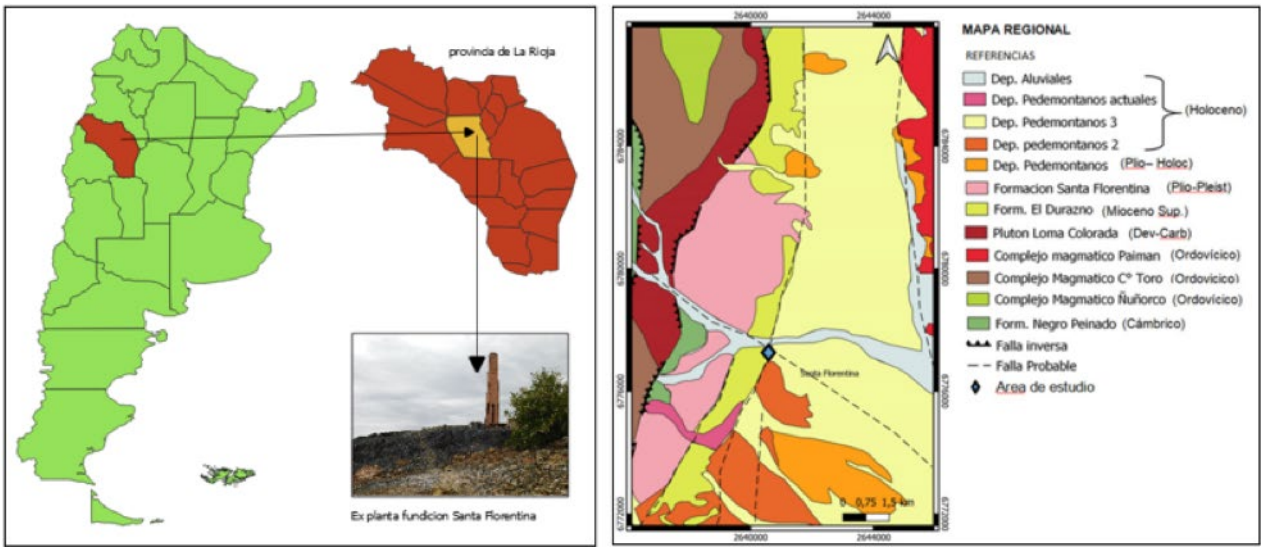


Fig. 1. Ubicación y geología regional del area de investigación (mod. Candiani et.al. 2017).

El área de estudio se localiza a 74 km al noroeste de la ciudad capital de La Rioja, en el Dpto. Chilecito. La ex planta de fundición se ubica a 7 km al noroeste de la ciudad de Chilecito, en el sector sur de la localidad de Sta. Florentina. El proyecto se enfoca en un sector anexo de la estación 2 del cable carril ubicado a 800 m al norte de este, donde funcionaba el área de fundición de mineral y ubicado a 100 m de la localidad de Sta. Florentina, Chilecito (ver fig.1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un muestreo aleatorio simple para el caso del material de foco (escoria en su sector superior y suelo lateral en área de escombrera) y otro aleatorio estratificado en profundidad, de los cuales se obtuvieron cuatro muestras de escorias, cinco muestras para perfil, dos muestras de escombreras y dos muestras de suelo laterales. Las muestras obtenidas fueron preparadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de La Rioja; para control y referencias se utilizó laboratorio LabGeo (CICTERRA-UNC)., además se utilizó el laboratorio del Centro de Excelencia de Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile. Posteriormente, a fin de reconocer la composición mineralógica de las muestras, se procedió a su estudio realizando preparados de roca total mediante la técnica de Difracción de rayos-X (DRX). Para el preparado de roca total, las muestras de estudio pasada por un tamiz de malla 200 de la que se obtuvo 5 gr de muestra tamaño polvo para ser montada en el portamuestra del equipo de difracción; donde se utilizó un equipo Bruker D2 PHASER equipado con un tubo de CoKa (1.78897Å), trabajando a 30kV/10mA entre los ángulos 5° y 80° 2q (tamaño de paso: 0,006; tiempo de paso: 0,95s), como condiciones analíticas. Para la identificación de los minerales presentes en los difractograma generados se utilizó el software Diffrac.EVA V5.2 y para la cuantificación de las fases minerales se utilizó la metodología de Refinamiento de Rietvelt utilizando el software TOPAS-6, con las bases de datos Crystollography Open Database.

RESULTADOS Y DISCUSION

Escorias

Macroscópicamente en las escorias se observó cuatro diferencias texturales: Tipo 1 (T1), con presencias vitrificación marcada; Tipo 2 (T2), vitrificación parcial, Tipo 3 (T3), con cristalización, Tipo 4 (T4), con porosidad y donde se evidencia una mezcla de materiales de rocas, arcillas y yeso. Las muestras de escorias M1, M2 y M3, geoquímicamente están dominadas por un comportamiento similar, con la presencia de mayoritarios de Al, Ca y Fe y en menor medida Mg, con una constante de hierro en todas las muestras, M4 muestra un aumento significativo de azufre (como sulfuro). Todas las muestras poseen como elementos mayoritarios Cu y Zn, a nivel de trazas aparecen Au y Ag, Pb, Sb y As en muestra M4.

En el DXF las muestras están dominadas por piroxenos, magnetitas (M1y M4), cuarzo, cristobalita (M3), piroxenos y dolomías (M2), y además de brocantita en la muestra M4.

El comportamiento geoquímico de las escorias y su falta de homogenización se puede deber a diferencias en punto de fusión del horno y/o por el método utilizado, donde además debe considerarse que se realizaron cargas no uniformes y su disposición en el horno, la falta de oxidación en el proceso de calcinación genera reacciones incompletas para formar magnetita, cuya formación, además está limitada, al igual que la augita, por la cantidad relativa de Fe (Rendtorff, 2019 y Stábile et al, 2019). La presencia de

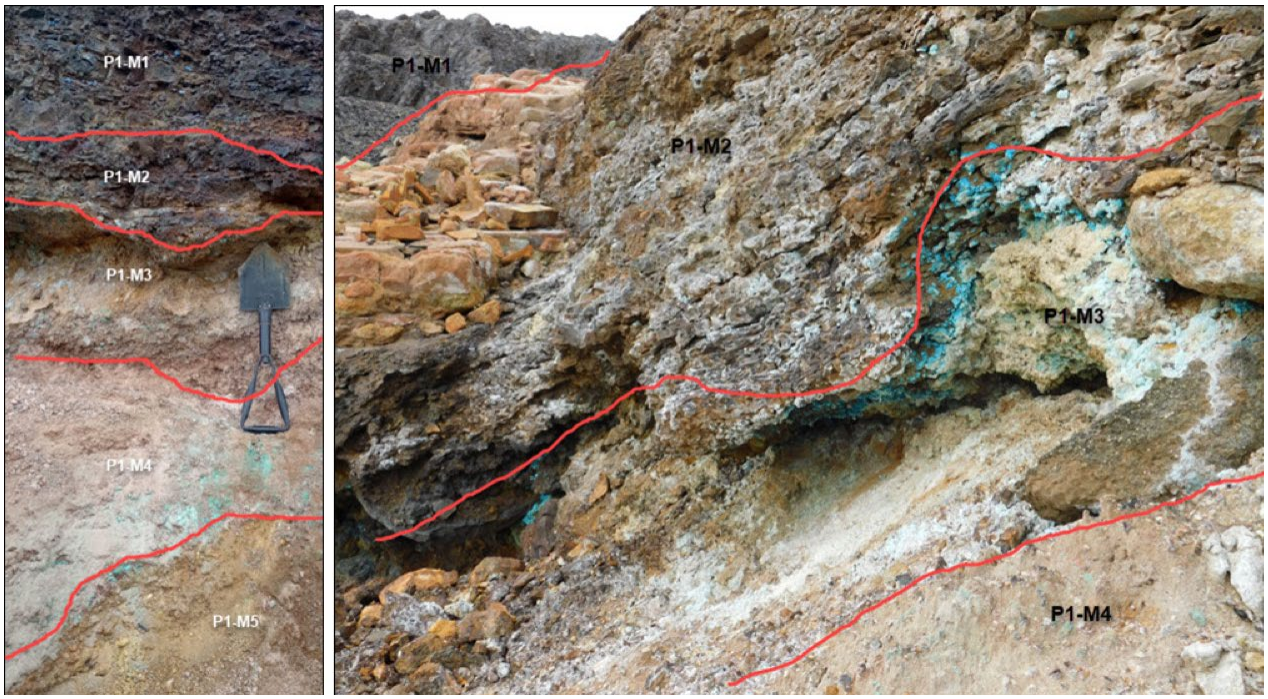


Fig. 2. Izq. Perfil "P1" y sus diferentes facies. Der. Detalle de perfil y oxidación del nivel P1-M2 y P1-M3.

magnetita en las muestras M4, demuestra la poca homogenización de las escorias.

Otra cuestión que surge de esta "no homogenización" de las escorias, es el comportamiento diferencial de alteración meteórica, generando un patrón de parches erráticos con características de oxidación producto de sus diferencias texturales.

Perfil estratigráfico

Se realizó muestreo sobre perfil "P1" donde se tomaron cinco muestras en forma vertical dentro de las escorias, denominando P1-M1 a la muestra más superficial y P1-M5 a la más profunda, sobre la base del perfil (fig.2). El sector superior del perfil (P1-M1), donde la escoria está expuesta, denota una baja alteración. Por debajo de ésta se observa la presencia de un área de oxidación (P1-M2), que se produce por infiltración de agua meteórica en época estival, que atraviesa la escoria superior modificando este nivel, con presencia de FeOx, y carbonatos de cobre en parches. Infrayace el nivel P1-M3 donde existe un área de neta oxidación, que atraviesa el perfil en buzando en sentido oeste-este, con una potencia de 30 a 40 cm y un largo de plano de lixiviación de por lo menos 10 m antes de cubrirse por debajo de las escorias, observándose al este su continuidad, pero, recubierta por detritos. Es el área más alterada, comportándose como un nivel guía debido a la presencia de sulfatos de cobre y costras eflorescentes. Éste se corresponde principalmente con anomalías de Cu y Zn, Fe y S que son elementos mayoritarios, generando sulfatos de Cu, principalmente. El nivel P1-M3 posee un fuerte nivel de acidez (pH 2,9), lo que favorece la importante oxidación y lixiviación a los niveles inferiores.

P1-M4 corresponde a nivel de suelo formado por la lixiviación donde se observa sulfatos de cobre asociados en una matriz de arenas finas a medias. En este nivel se produce una retención de elementos mayoritarios Al, Ca, K, Mg y otros se lixivian al nivel más bajo (P1-M5). El nivel P1-M5 se caracteriza por tener granulometría más fina, limoarcillosa, con mayoritarios tales como por Fe y S. Los elementos mayoritarios de la muestra P1-M4 tienen tendencia geoquímica con minoritarios y trazas tales como: Li, Zr, Sc, V, Y, La, Be y Mn; y los mayoritarios de la muestra P1-M5 tienen afinidad con los metales preciosos y pesados: Pb, As, Sb, Sn, Ni, Cr, W, Mo, Au y Ag, donde posiblemente el cambio de pH en el medio, la reducción a nivel más profundo y el cambio de granulometría, permitió fijar la mayoría de los minoritarios, comportándose como una zona de enriquecimiento secundario.

Los análisis de DRX, indican para P1-M3: Cuarzo, Albita, Fayalita; para P1-M4: Cuarzo, Albita, Oligoclasas, Fengita, Yeso y Antlerita y en la muestra P1-M5: Cuarzo, fosfatos, sulfatos como Jarosita e Hidrojarosita, Magnetita, Titanomagnetita, Goethita, Cuprita y Grafito. Dold (2025) y Galán Huerto (2008) indican que la presencia de jarosita e hidrojarosita provengan de la oxidación de pirita.

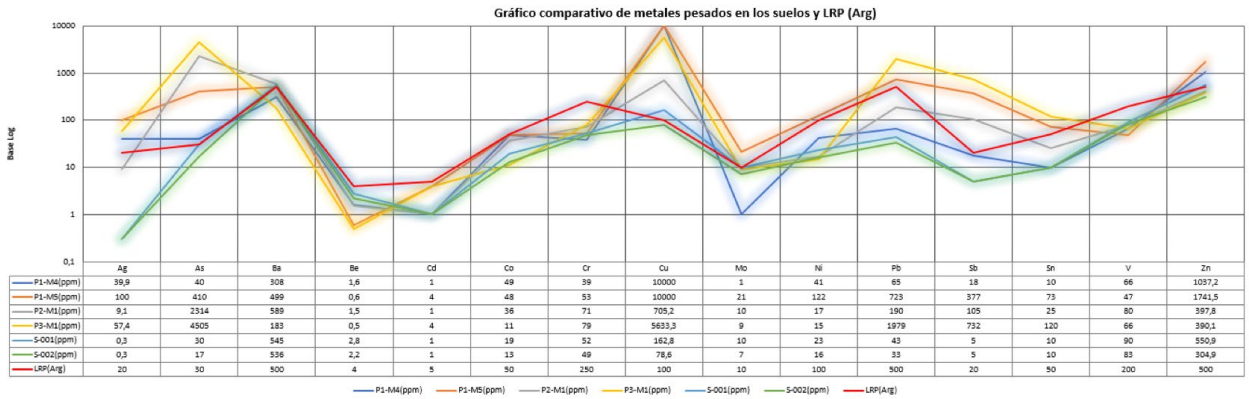
Suelos de escombreras

En el sector oeste del área estudiada, se observan suelos de aspecto piritosos y/o limonítico, sin tratamiento químico, aunque no se descarta el tratamiento físico ya que se encuentran seleccionadas y no calcinadas, la cuales forman un suelo con alteraciones ferrosas con presencia de piritas aisladas. Las muestras tomadas están identificadas como P3-M1 y P2-M1. La muestra P3-M1 tiene tenores de ley de minoritarios y trazas metalíferas mayores que la muestra P2-M1. Se destacan anomalías de arsénico con valores de 2.314 ppm en la muestra P2-M1 y tenores de 4.505 ppm para la muestra P3-M1, otro elemento a destacar es la presencia de cobre, con valores de 705,2 ppm (P2-M1) y 5.633 ppm (P3-M1). Los valores obtenidos de la muestra P3-M1 corresponden a suelos meteorizados, lixiviados y con procesos de lixiviación y acumulación en profundidad con un pH=2.

La muestra P2-M1 corresponde con un suelo menos expuesto a la intemperie que los representados por la muestra P3- M1, dado que la incidencia de la meteorización es menor y el proceso de oxidación de los minerales hipogénicos es parcial (se observan piritas y calcopiritas), con un pH=3; la presencia de Plomo con 1979 ppm es de destacar de esta muestra. La alteración de metales y acidez del medio ha permitido la formación de jarosita, hidrojarosita y cuarzo. El caolín predomina en el material arcilloso presente y silicatos hidratados (Phengita). Tanto las muestras P2-M1 y P3-M1, están dominadas por la presencia de minoritarios y trazas con metales pesados, donde se destacan anomalías de Au, Ag, As, Cu, Pb, Sb y Zn. Se observa que los suelos presentan acidez, y de acuerdo a su mineralogía presentan elementos que podrían estar geodisponibles en función de su cambio de estado de oxidación, (Alloway et.al, 1997); con presencia de óxidos y sulfatos.

Suelos laterales

Se tomaron dos muestras (S001 y S002) testigos ubicadas a 600 m. del área de escorias. Las dos muestras de suelo a nivel de mayoritarios (Al, Fe, Mg, K y Ca), tienen similares comportamientos, los valores de la muestra S001 parecen dominar en sus tenores sobre la muestra S002, con valores de Mn de 1.786 ppm; Zn con tenores de 550 ppm, Cu de 168 ppm y Ti de 300 ppm. La diferenciación entre muestra a nivel de minoritarios y trazas, se puede interpretar como respuesta a la diferentes granulometría de los suelos muestreados, donde el suelo S001, presenta un horizonte limo-arcilloso, con un efecto de retención frente a la muestra S002, de características fluviales arenosas a gravosas. Sparks, (2003); Alloway et. al (1997) señalan que la granulometría gruesa favorecería la migración lateral y percolación de estos elementos, en las épocas estivales. En el análisis de minoritarios y trazas de solos suelo (P1-M4, P1-M5, P2-M1, P3-M1, S001 y S002), (Bahamonde Alvarado, 2024), existen tenores de metales están por encima de la normativa de la ley Nacional N°24.051 de residuos peligrosos (LRP), y su Decreto reglamentario N°831/93, en particular su Tabla N°5, donde se establece los valores máximos permitidos de metales en suelo (ver fig. 3).



	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn	V	Zn
P1-M4(ppm)	39,9	40	308	1,6	1	49	39	10000	1	41	65	18	10	66	1037,2
P1-M5(ppm)	100	410	499	0,6	4	48	53	10000	21	122	723	377	73	47	1741,5
P2-M1(ppm)	9,1	2314	589	1,5	1	36	71	705,2	10	17	190	105	25	80	397,8
P3-M1(ppm)	57,4	4505	183	0,5	4	11	79	5633,3	9	15	1979	732	120	66	390,1
S-001(ppm)	0,3	30	545	2,8	1	19	52	162,8	10	23	43	5	10	90	550,9
S-002(ppm)	0,3	17	536	2,2	1	13	49	78,6	7	16	33	5	10	83	304,9
LRP(Arg)	20	30	500	4	5	50	250	100	10	100	500	20	50	200	500

Fig. 3. Gráfico comparativo de metales en suelo y Ley de residuos peligrosos Argentina (LRP), en línea roja.

CONCLUSIONES

Las escorias manifiestan una “no homogenización” durante su tratamiento en fundición, luego la presencia de metales preciosos, Au, Ag y Cu en las escorias indica una pobre concentración y falta de eficiencia en la recuperación de estos elementos, posiblemente por el método utilizado. Minerales tales como jarositas, hidrojarosita, goethitas, hematitas y yeso son especies presentes en los niveles de suelo P1-M4 y su formación está vinculada al drenaje ácido. Los suelos muestran una mineralización y remineralización secundaria en un medio acido (pH=2 a 3,5), con concentraciones de elementos minoritarios como Pb, As, Sb, Sn, Ni, Cr, W, Mo, Au y Ag y mayoritarios ricos en Fe y S. Las condiciones redox predominantes por la presencia de aguas circundantes generan un área de oxidación, luego lixiviación y “enriquecimiento supergénico” que favorece la migración de elementos geodisponibles a niveles más bajos con su consecuente dispersión o migración lateral. El tratamiento de escorias y suelo es necesario en este marco, existiendo numerosas técnicas posibles.

En el caso de la escoria es la movilización del sitio (ex-situ) para su posterior tratamiento de inmovilización, pudiendo ser mediante vitrificación o encapsulamiento. Para el caso de remediación de suelos se propone un tratamiento ex-situ, con una extracción ácida y posterior lavado del material, para lo que sería importante la adición de enmiendas inorgánicas como zeolitas y orgánicas como biochar. Posteriormente sería adecuado la implantación de flora sobre este suelo (fitorremediación) para mantener equilibradas las condiciones futuras del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Santiago Maza y Dra. Cecilia Baldo por su disposición y acompañamiento; en igual forma a la Dra. Ana Combina por comentarios y sugerencias para corrección de este manuscrito.

REFERENCIAS

Alegre A. (2009). Los pasivos mineros ambientales en la legislación Peruana. Sistema de información ambiental regional (SIAR), Ministerio de ambiente, Peru. http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/pasivos-ambientales-mineros-legislacionperuana.

Alloway, B. J., & Ayres, D. C. (1997). Chemical principles of environmental pollution (2nd ed.). London: Blackie Academic and Professional.

Bahamonde Alvarado, S.O.; (2024), Caracterización geoquímica de escorias de fundición y suelos piritosos del pasivo minero Santa Florentina, Chilecito. Tesis de Maestría, Ingeniería ambiental, Universidad Tecnológica Nacional (UTN-La Rioja), 219 pág. Inédito.

Candiani, J.C.; Astini, R.A.; Dávila, F.; Collo, G.; Ezpeleta, M.; Alasino, P.; Dahlquist J.; Carrizo R., (2011), Hojas geológicas 2969-18 Famatina y 2969-24 Sañogasta, 1:100.000. Boletín 379. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires.

Galan Huertos E., Romero Baena A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071.

Infante, C, 2011, Pasivos ambientales mineros, Barriendo bajo la alfombra, Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. https://www.ocmal.org/wpcontent/uploads/2017/03/pasivos_22.pdf.

Rendtorff, N.M, MorosiM M.E y Tavani, E.L., (2019), Estudio arqueométrico del proceso pirometalúrgico usado entre 1903 y 1913 para la extracción de cobre en la fundición Santa Florentina, Chilecito, La Rioja, Argentina, DOI: 10.34096/arqueologia.t26.n1.5599 ISSN 0327-5159 (impresa) / ISSN 1853-8126 (en línea) Arqueología 26(1) enero-abril: 39-56 (2020).

Stábile, F.M., Morosi, M.E., Rendtorff N.M., Tavani, E.L, (2019), Caracterización fisicoquímica de escorias producidas en Santa Florentina (Chilecito, La Rioja,) durante la extracción de cobre, oro y plata a partir de minerales de la Mejicana. 5º Jornadas ITE - 2019 - Facultad de Ingeniería – UNLP.

Sparks, D.L. (2003) Environmental Soil Chemistry. 2nd Edition, Academic Press, Oxford.

EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN GENERAL DANIEL CERRI, PARTIDO DE BAHÍA BLANCA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

Lucía B. Carrica[1,2], Juan M. Giorgi[1,2], Nerea V. Bastianelli[2, 3], René Albouy[1,2]
[1]CGAMA, CIC- UNS, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina
[2]Departamento de Geología, UNS, Av. Alem 1253, cuerpo B' 2° piso, Bahía Blanca, Argentina.
[3]Autoridad del Agua, Sede Bahía Blanca, Av. Alem 1615, Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: lucia.carrica@uns.edu.ar

RESUMEN
La localidad de General Daniel Cerri, situada al sudoeste de la provincia de Buenos Aires y aproximadamente a 15 km al oeste de la ciudad de Bahía Blanca, experimenta un crecimiento demográfico sostenido hacia sectores rurales, lo cual incrementa la demanda de agua potable en áreas no cubiertas por la red de distribución de Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA). En un contexto regional marcado por la escasez hídrica, se realizaron estudios de prospección geofísica mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), acompañados de análisis químicos y mediciones de niveles piezométricos, tomados durante un censo hidrológico. Estas investigaciones tuvieron como objetivo evaluar la factibilidad del aprovechamiento del acuífero freático como fuente alternativa de abastecimiento de agua subterránea para la población local y su periferia. Particularmente, se buscó estimar el espesor de los estratos saturados del subsuelo, a fin de identificar sectores con mayor potencial hidrogeológico para la ejecución de perforaciones. Actualmente, el suministro de agua potable de ABSA en la zona se complementa con agua del Sistema Hidrotermal Profundo (SHP), el cual, si bien es apta para el consumo humano, presenta como limitante su elevada temperatura natural. La falta de infraestructura de enfriamiento restringe su uso eficiente para el abastecimiento cotidiano de la comunidad.

Palabras clave: Hidrogeología, Geofísica, General Daniel Cerri.

ABSTRACT
The town of General Daniel Cerri, located southwest of the province of Buenos Aires and approximately 15 km west of the city of Bahía Blanca, is experiencing a sustained demographic growth towards rural areas, which increases the demand for drinking water in areas not covered by the distribution network of Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA). In a regional context marked by water scarcity, geophysical prospecting studies were carried out by means of Vertical Electrical Soundings (SEV), accompanied by chemical analysis and piezometric level measurements, taken during a hydrological census. The objective of these investigations was to evaluate the feasibility of using the phreatic aquifer as an alternative source of groundwater supply for the local population and its periphery. In particular, the aim was to estimate the thickness of the saturated subsurface strata in order to identify sectors with greater hydrogeological potential for well drilling. Currently, the potable water supply provided by ABSA's in the area is supplemented by water from the Deep Hydrothermal System (SHP), which, although suitable for human consumption, presents a limiting factor due to its naturally high temperature. The lack of cooling infrastructure restricts its efficient use for the community's daily water supply.

Keywords: Hidrogeology, Geophysics, General Daniel Cerri.

INTRODUCCIÓN

La localidad de General Daniel Cerri, se encuentra al SO de la provincia de Buenos Aires, a unos 15 km al oeste de la ciudad de Bahía Blanca, dentro del partido de la ciudad homónima. Albouy et al. (2009) clasifican el clima de la región, según Thornthwaite, en subhúmedo húmedo-mesotermal. La temperatura media anual para la zona de Bahía Blanca, para un periodo de 49 años (1956-2005) es de 15,3°C, mientras que el promedio anual de precipitaciones es de 656,44 mm para el mismo intervalo de años.

Entre los antecedentes, en la zona de estudio, se pueden destacar los realizados por DYMAS (1974), donde se describen y fijan las diferentes Secciones Hidrogeológicas; Fidalgo et al. (1975), Fidalgo (1983), quienes caracterizan las unidades estratigráficas más someras; Bonorino y Sala (1983), Carrica, (1998), Carrica et al. (2003), y Albouy et al. (2012), que aportan al conocimiento hidrogeológicos del acuífero freático en el área; y González, G. (1984), quienes describen algunos aspectos morfométricos relevantes.

El área de estudio corresponde a una llanura costera de suave pendiente (2–3 %), geomorfológicamente definida como una plataforma de abrasión marina (Fidalgo et al., 1975) o planicies de marea, desarrollada sobre sedimentos plio-pleistocénicos,

modelada por las ingresiones del Holoceno. El estuario de Bahía Blanca, con influencia mareal, constituye su rasgo morfológico dominante. Geológicamente, se inserta en la porción noroccidental de la Cuenca del Colorado cuyo límite norte lo constituye la provincia geológica de Ventania. Esta cuenca, definida como "tafro", se caracteriza por un basamento profundo, fallado en bloques, inactivo desde el Terciario y capas suavemente inclinadas hacia el sur (Bonorino, 1988). En el perfil estratigráfico predominan los "sedimentos pampeanos" del Plioceno medio-superior (Fidalgo et al., 1975), formados por limos loessoides, arenosos, pardo-rojizos, cementados con carbonato de calcio, de hasta 200 m de espesor. Sobre ellos, en discordancia erosiva, se disponen depósitos de la Formación Maldonado (Fidalgo, 1983), que incluyen arenas, limos y arcillas de origen marino, con facies granodecrecientes y abundantes restos de conchillas.

La evolución estructural refleja una transición entre dominios continentales y marinos, con sucesiones sedimentarias que, sobre el basamento paleozoico, inician en el Mioceno con depósitos continentales (Mioceno Rojo) y marinos (Mioceno Verde), seguidos por materiales mesozoicos y cenozoicos. Hidrológicamente, el área es interfluvio entre los arroyos Sauce Chico y Saladillo de García, con red efluente que drena hacia la ría de Bahía Blanca. En el subsuelo, la sección hidrogeológica pampeana presenta sedimentos limo-arenosos cementados por carbonatos con permeabilidad media, mientras que la postpampeana está integrada por depósitos de la Formación Maldonado y materiales aluviales, con arenas finas a medias en su base, que constituyen los principales horizontes acuíferos.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad del aprovechamiento del acuífero freático como fuente alternativa de abastecimiento de agua subterránea para la población local y su periferia. Particularmente, se buscó estimar el espesor de los estratos saturados del subsuelo, a fin de identificar sectores con mayor potencial hidrogeológico para la ejecución de perforaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la salida al campo se realizaron dos SEV, con un resistivímetro marca ARES (GF Instruments), mediante un dispositivo tetraelectródico (AMNB), de configuración Schlumberger, el cual proporciona un dato puntual (1D) en el centro del arreglo. Los SEV efectuados tuvieron un ala máxima (AB/2) de 100 a 125 m, alcanzando de esta manera una profundidad de exploración de 43 metros, aproximadamente.

Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo y medidos en ohm.m (Ω.m) se tabularon en el software "SEVs" (Nigro y Perdomo, 2017) para ser representados en un gráfico de coordenadas logarítmicas en función de AB/2, expresados en metros. El mismo programa permite obtener una distribución vertical de resistividades mediante el método Zohdy (1974), y así obtener el espesor y la profundidad de cada electrocapa.

Además, se tomaron niveles piezométricos, con una sonda piezométrica lumínico-sonora OTT de 50 metros de longitud total, en zonas cercanas a donde se realizaron los estudios geoeléctricos y se tomaron muestras de agua para realizar análisis químicos.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los dos SEV realizados durante la campaña de campo (Figura 1, Tabla 1), con configuración Schlumberger (AMNB), alcanzaron profundidades de 43 m aproximadamente. Los resultados obtenidos fueron interpretados y parametrizados teniendo en cuenta estudios de geología y geomorfología en el área de White, Cerri y alrededores de Bahía Blanca, realizados por Fidalgo (1983).

Los datos de resistividad aparente (Ω·m) procesados con software específico permitieron estimar espesores y profundidades (Figura 2). En ambos perfiles se observa una disminución progresiva de la resistividad con la profundidad. En los primeros 12 metros, los valores oscilan entre 10 y 36 Ω·m, lo que sugiere la presencia de arenas medias, gravas o materiales poco consolidados.



Fig. 1. Ubicación de los Sondeos eléctricos Verticales y puntos censados dentro de la Localidad de General Daniel Cerri.

NÚMERO DE SEV	COORDENADAS	ALA MÁXIMA (M)
1	S 38° 42' 04.8"	125
	O 62° 23' 48.7"	
2	S 38° 42' 19.2"	100
	O 62° 24' 07,0"	

Tabla 1. Sondeos Eléctricos Verticales

En los niveles más profundos, las resistividades descienden por debajo de los 5 Ω·m, lo que indicaría una granulometría más fina, posiblemente vinculada a materiales arcillosos. En ambos SEV se observa una disminución significativa de la resistividad a partir de los 18 metros de profundidad. Este descenso sugiere un cambio textural hacia materiales más finos, posiblemente arcillosos.

No fue posible identificar con precisión el nivel freático a partir de los SEV, posiblemente debido a la influencia de una zona de ascenso capilar. Sin embargo, mediciones piezométricas en pozos cercanos indican profundidades en torno a los 3 metros. En la Quinta Torcoletti (Figura 1), el nivel piezométrico se registró a 3,30 metros, con una conductividad eléctrica in situ entre 1700 y 1900 µS/cm. En la Quinta Donayevich, el nivel estático fue de 3,4 metros y la conductividad alcanzó los 1108 µS/cm. Los pozos censados presentan profundidades informadas de 12 metros y emplean bombas de 1,5 HP.

Con respecto a los resultados de los análisis químicos, el agua clasifica como apta para consumo humano según el Código Alimentario Argentino Art. 2 (Tabla 2).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los SEV, con una profundidad de exploración de 43 metros, permitieron identificar los rasgos del subsuelo en las cercanías de la localidad de General Daniel Cerri. En los primeros 12 metros se registraron resistividades elevadas (10-36 Ω·m), asociadas a arenas, gravas o suelos poco consolidados. A partir de los 12 metros, la resistividad disminuye progresivamente, con un descenso marcado a los 18 metros, indicando materiales más arcillosos. Según los SEV y las mediciones piezométricas en pozos cercanos, el nivel freático se encuentra en torno a los 3 metros. Entre los 3 y los 18 metros se reconoció una capa arenosa saturada con potencial hidrogeológico. Por debajo de los 18 metros predomina una granulometría fina, probablemente arcillosa, lo que podría limitar la captación. Se estima que la profundidad óptima para obtener agua subterránea de buena calidad no debe superar los 18 metros. Los análisis químicos confirman que el agua cumple con el Código Alimentario Argentino, considerándose apta para consumo humano.

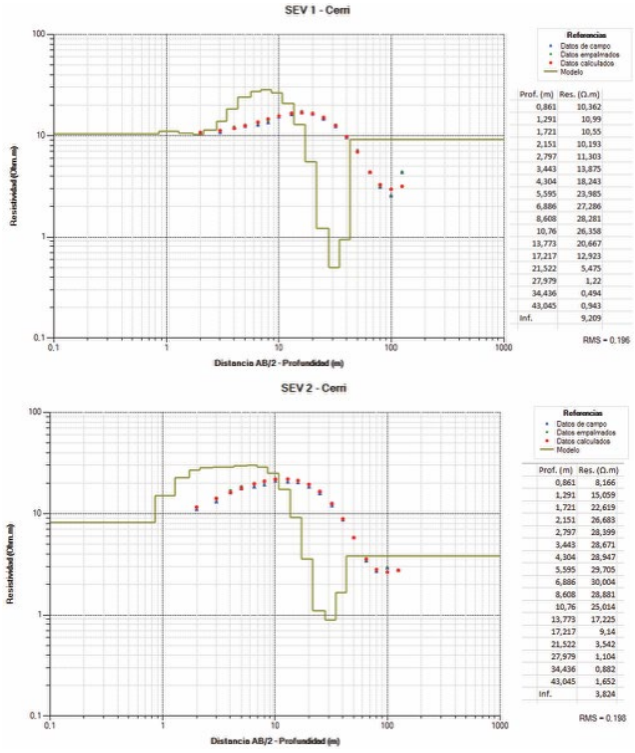


Fig. 2. Curvas de resistividad eléctrica.

Alcalinidad	460 mg/l CaCO3
Dureza Total	262 mg/l CaCO3
Cloruros	80 mg/l
Sulfatos	73 mg/l
Nitratos	0,15 mg/l
Nitritos	0,02 mg/l
Hierro	0,06 mg/l
Fosfato	0,459 mg/l
Fósforo total	1,404 mg/l
Arsénico	0,02 mg/l

Tabla 2. Tabla de análisis químicos.

REFERENCIAS

Albouy, R., Carrica, J. y Lafont, D. (2009). El acuífero libre del área industrial de Bahía Blanca: modelo de flujo de agua subterránea. *Aportes de la Hidrogeología al Conocimiento de los recursos Hídricos*. Editorial. Ameridia Tomo II: 477-486. Santa Rosa, La Pampa, República Argentina. ISBN 978-987-1082-36-0.

Albouy, R., Carrica, J., Lexow, C., Lafont, D. y Bonorino, G., (2012). La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina. ISBN 1851-7838. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. ASAGAI, No28:15-24.

Carrica, J., 1998. Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Biblioteca Central. 215 pp y anexos. Inédito. Bahía Blanca.

Carrica, J., Albouy, R., Bonorino, A., (2003). Modificaciones hidrodinámicas en el acuífero costero del área de Ing. White. *III Congreso Argentino de Hidrogeología. Rosario. Argentina*. 23-26/09/2003. Tomo I: 113-122 ISBN: 950- 673-395-3

DYMAS., 1974e. Contribución al mapa hidrogeológico de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Zonas de Bahía Blanca y Nordpatagónica. La Plata: CFI-PBA.

Fidalgo, F, F.O De Francesco y R. Pascual, 1975 Geología Superficial de la llanura bonaerense. *VI Congreso Geológico Argentino.* Relatorio: 103-138. Bahía Blanca.

Fidalgo, F. 1983. Geología y geomorfología del área White-Cerri y los alrededores de Bahía Blanca. Comisión Estudio Suelos White-Cerri. MOP de la provincia de Bs.As. Informe final (Inédito). La Plata.

Bonorino, A. y. Sala. J.M., 1983. Capitulo: Geohidrología. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP De la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.

González Uriarte, M. (1984). Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires. Actas del 9no. Congreso Argentino de Geología. Bariloche. Argentina.

Nigro, J., y Perdomo, S., 2017. Desarrollo de software de inversión de datos 1D para sondeos eléctricos verticales Schlumberger. En: *XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG 2017) y Tercer Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica* (IPSES\'17). La Plata, del 17 al 21 de abril de 2017.

Zohdy, A. A., Eaton, G. P., & Mabey, D. R. (1974). Application of surface geophysics to ground-water investigations.

Thorntwaite, C. y Matter, J., (1955). An approach to wards a rational classification of climate. Geographic Review 38 (1): 221-229. Amsterdam.

UNA HERRAMIENTA PARA ANÁLISIS DE SITIOS SUSTENTABLES EN LA LOCALIZACIÓN DE VERTEDEROS SANITARIOS

Esteban M. Fernández[1], Julio C. Gagliano[1], Camilo Vallejo García[1], Estefanía Villalobos[1], Gonzalo Aiassa[1]
[1]Departamento de Ingeniería Civil, CIGEF (Centro de Investigación en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: estefania1villalobos@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se expone un análisis de criterios para la evaluación de sitios de instalación de vertederos sanitarios. El estudio se enfoca en regiones con suelos limosos, centrado en un principio de sustentabilidad integral. El objetivo principal consiste en desarrollar una herramienta que proporcione insumos para la evaluación del impacto territorial por la instalación del vertedero. La metodología adoptada consiste en el desarrollo de una hoja de cálculo que integra dimensiones ponderadas de condiciones ambientales, sociales, técnicos, normativos-legales y económicos. Dentro del enfoque ambiental se incluye la evaluación de la flora y la fauna autóctona; en lo geotécnico e hidrológico, el tipo de suelo, la profundidad de agua freática, la profundidad de acuíferos y el riesgo de inundación; siguiendo con lo topográfico se analizó la morfología del terreno; en lo territorial, los vientos predominantes y la zona sísmica; en lo social, la cercanía a centros poblados y patrimonios culturales y la aceptación pública; respecto a la normativa legal, se incluye la zonificación territorial y la ocupación del suelo; y por último, dentro de lo económico se tuvieron en cuenta los costos asociados al terreno, entre otros factores. A cada una de estas variables se le asignaron valores de forma cualitativa y cuantitativa. A cada valor le corresponde un puntaje de manera individual. Luego se considera la ponderación de cada variable teniendo en cuenta su puntaje individual y el aspecto al cual pertenece, que también posee un peso relativo al resto. Este proceso se realizó con una justificación de base teórica y normativa nacional e internacional.

Palabras clave: vertederos sanitarios, herramienta, normativa

ABSTRACT

This paper presents an analysis of criteria for evaluating sanitary landfill installation sites. The study focuses on regions with silty soils, centered on a principle of comprehensive sustainability. The main objective is to develop a tool that provides input for assessing the territorial impact of landfill installation. The methodology adopted consists of developing a spreadsheet that inte-grates weighted dimensions of environmental, social, technical regulatory-legal, and economic conditions. The environmental approach includes the evaluation of native flora and fauna; from the geotechnical and hydrological perspectives, the type of soil, groundwater depth, aquifer depth, and flood risk; continuing with the topographical perspective, the morphology of the terrain was analyzed; from the territorial perspective, the prevailing winds and seismic zone; from the social perspective, the proximity to population centers and cultural heritage sites, and public acceptance; regarding legal regulations, territorial zoning and land use are included. And finally, within the economic aspect, the costs associated with the land were taken into account, among other fac-tors. Each of these variables is assigned qualitative and quantitative values. Each value is assigned an individual score. Each variable is then weighted based on its individual score and the aspect to which it belongs, which also has a relative weight. This process was carried out with a theoretical, national, and international justification.

Keywords: sanitary landfills, tool, regulations.

INTRODUCCIÓN

La disposición final de residuos sólidos urbanos constituye un desafío en la gestión ambiental y de ordenamiento territorial en contextos donde el crecimiento poblacional requiere un importante desarrollo de la infraestructura urbana. Así, los vertederos sanitarios constituyen una solución sustentable, controlada y sistemática que minimiza los impactos ambientales y sanitarios involucrados en esta etapa.

Este trabajo surge de la motivación por aplicar criterios técnicos y metodológicos a un problema concreto y complejo: la evaluación de la factibilidad de la localización de un vertedero sanitario en un sitio dado. La zona de estudio comprende la región pampeana de Argentina, donde predominan los suelos limosos. Se optó una metodología basada en una evaluación multicriterio con

ponderación de factores relevantes aplicada a emplazamientos en suelos limosos, representativos de una gran porción del territorio nacional. Esto diferencia la propuesta de antecedentes previos, en los que, si bien se presentan estudios sobre criterios de preselección, no existe uno que los correlacione y aplique en específico a un sitio de emplazamiento local determinado.

El objetivo principal del trabajo es evaluar la factibilidad de ubicación de un vertedero sanitario mediante una metodología de análisis espacial, integrando los criterios ambientales, sociales, técnicos, normativos-legales y económicos que inciden en la selección del sitio según Sharma, Hari D. y Reddy Krishna R. (2004), Landfill regulations, siting, and configurations, *Geoenvironmental Engineering: Site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies (pp 635-658)*, John Wiley & Sons.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis espacial y de factibilidad de la localización de un nuevo vertedero sanitario se utilizaron los siguientes métodos:

Evaluación Multicriterio.

Es una herramienta usada en la toma de decisiones ambientales y territoriales que evalúa múltiples factores cuantitativos y cualitativos de distinta naturaleza y permite comparar alternativas.

Método de Ponderación de Criterios

Se definen los principales factores determinantes en una localización, para asignarles valores ponderados de peso relativo, de acuerdo con la importancia que se les atribuye. El peso relativo sobre la base de una suma igual a uno, depende fuertemente del criterio y experiencia del evaluador. Ponderar los factores es una manera de asignar valores cuantitativos a todos los factores relacionados con cada alternativa de decisión y de derivar una calificación compuesta que puede ser usada con fines de comparación conjugando ambos factores, cuantitativos y cualitativos. El objetivo del estudio no es buscar una localización óptima sino una o varias localizaciones aceptables que puedan ser posteriormente comparadas en función de los aspectos favorables y desfavorables de cada una de ellas.

Análisis Cualitativo-Cuantitativo con Matriz de Decisión

Es una herramienta utilizada para evaluar y comparar de manera sistemática un conjunto de alternativas (localizaciones posibles) en base a un conjunto de criterios prefijados. Esto posibilita la evaluación, comparación y jerarquización de opciones de forma transparente y objetiva.

Método de Clasificación por Colores o Rango Visual

Es una técnica visual que funciona como una herramienta de comunicación de resultados en evaluaciones multicriterio y facilita la interpretación de los niveles de factibilidad de los criterios evaluados para cada alternativa.

Se utilizaron como instrumentos para el desarrollo del proyecto planilla de cálculo como plataforma para la matriz de evaluación confeccionada en base a datos y parámetros extraídos de manuales y normativa Internacional y Nacional especificada en la sección siguiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Profundidad del agua freática

Según EPA, (Title 40 of the Code of Federal Regulations (CFR), Part 258 – Criteria for Municipal Solid Waste Landfills (MSWLFs) (1991), aunque no se especifica una distancia mínima fija en pies o metros, existen lineamientos que recomiendan una distancia mínima de 1,52 metros (5 pies) entre el fondo del vertedero y el nivel freático estacional más alto. Esta separación permite mantener una zona de seguridad para evitar que los lixiviados contaminen directamente las aguas subterráneas. Rangos propuestos: 1,52m - 3m (mínima) y >3m (óptima)

Pozos de agua

Según la Resolución 1143/2002 – Provincia de Buenos Aires, Argentina (2002), se establece que la distancia mínima entre el perímetro de un relleno sanitario y los pozos para extracción de agua potable, uso doméstico, industrial, riego y ganadero debe ser de 500 metros. Sin embargo, la Norma Técnica para el Control Ambiental de los Rellenos Sanitarios – Nicaragua, establece que el sitio propuesto debe estar a una distancia mínima de 1.000 metros. Rangos propuestos: entre 500m y 1.000m (mínimo) y > 1.000m (óptima)

Cercanía a cuerpos de agua superficial

De acuerdo a según la ubicación de rellenos sanitarios en zonas propensas a inundación. Además, se prohíbe la ubicación en humedales. Aunque no se menciona una distancia específica, el proceso de evaluación ambiental según EPA obliga a considerar un

área de protección alrededor de cuerpos de agua, que suele estar entre 30 y 100 metros en la práctica (dependiendo del tipo de cuerpo de agua y legislación estatal o local). Rangos propuestos: 100 m – 1.000 m (mínima) y >1.000 m (óptima)

Riesgo de inundación

De acuerdo a estudios hidrológicos y geomorfológicos, la probabilidad de inundación, análisis de la cuenca y presencia de llanuras aluviales se evalúa el riesgo de inundación. Rangos propuestos: riesgo leve, moderado, alto o presencia de llanura aluvial

Dirección predominante de vientos

Se evalúa el impacto del viento sobre los centros urbanos, considerando la ubicación del vertedero y la dirección predominante del viento sobre los centros poblados cercanos. El usuario analizará mediante los datos brindados por el Servicio Meteorológico Nacional. Rangos propuestos: Influencia alta, influencia moderada, influencia mínima.

Flora y fauna

La existencia de flora y fauna se evalúa mediante un Estudio de Impacto Ambiental y las leyes: Ley 25.675 General de Ambiente (2002), Ley Nacional 22.421 de Conservación de la fauna (1981), Ley 26.331 de Presupuestos mínimos para la Protección de Bosques Nativos (2007), Ley Nacional 24.375 Convenio sobre la Diversidad Biológica (1994), Ley Nacional 22.351 de Parques Nacionales, Monumentos Naturales y Reservas (2018), Ley Nacional 23.919 Convenio RAMSAR sobre humedales (1991). Rangos propuestos: Flora/Fauna no sensible, Especies protegidas, Áreas protegidas.

Zona sísmica

Según INPRES CIRSOC 103 (2018), se identifican 5 zonas dentro de la República Argentina asociadas a una peligrosidad sísmica. Rangos propuestos: Zona 0 (Muy reducida), Zona 1 (Reducida), Zona 2 (Moderada), Zona 3 (Elevada), Zona 4 (Muy elevada).

Cercanía a espacios naturales protegidos

Según EPA, a través del 40 CFR Part 258, se incluyen distancias mínimas específicas a espacios naturales protegidos. Rangos propuestos: 500m (mínimo) y >1.000m (optima).

Zonificación territorial

Según la Ley 26.331 de Bosques de Argentina (2007), se establecen categorías de conservación y se regula su aprovechamiento.
Rangos propuestos: Zona Roja (implica la infactibilidad de la ubicación del vertedero), Zona Amarilla, Zona Verde.

Cercanía a centros poblados

Según la Organización Mundial de la Salud en “Gestión segura de los residuos de las actividades sanitarias” (2ª edición, 2014) recomienda una distancia radial no menor a 500 m respecto de viviendas o asentamientos humanos.
Rangos propuestos: 500 m (mínima) y >1.000 m (óptima).

Aceptación pública y percepción social

Para evaluar este ítem se realizan encuestas de opinión, audiencias públicas, análisis de medios de comunicación, mapas de percepción comunitaria (social mapping), consulta ciudadana y revisión de antecedentes de conflictos socioambientales en la zona. Rangos propuestos: muy mala, mala, buena y muy buena.

Cercanía a patrimonios culturales

Para evaluar este ítem se considera la Ley Nacional N° 12.665 (2014), Comisión Nacional de Monumentos, Lugares y Bienes Históricos y Ley Nacional N° 25.743 (2013), Protección del Patrimonio Arqueológico y Paleontológico. Rangos propuestos: 500 m – 1.000m y >1.000 m (optima).

Accesibilidad a centros poblados

Para evaluar este ítem se considera el estudio de red vial, rutas de acceso y tránsito, análisis de tiempo y distancia de transporte y una Evaluación de Impacto Ambiental. Rangos propuestos: mala, buena, muy buena.

Topografía del terreno

Para evaluar este ítem se deberá contar con un relevamiento topográfico detallado
y/o un Modelo digital del terreno (MDT). Rangos propuestos: llanura, empinada, ondulada.

Disponibilidad de servicios

Se evaluará la disponibilidad de servicios esenciales electricidad, agua potable y servicios sanitarios. Rangos propuestos: existente – no existente (en caso de ausencia de algún servicio).

Espacio disponible y la capacidad de expansión futura

Se compara la superficie del terreno disponible con aquella requerida obtenida a través del cálculo de superficie para satisfacer la demanda asociada a la población de diseño. Rangos propuestos: <20 ha – 20 ha a 50 ha - >50 ha.

Ocupación de suelo permitido

De acuerdo a las Ordenanzas Municipales correspondientes, se determina la Ocupación del Suelo. Así, por ejemplo, la Ord. 8256/86 y la Ord. 8057/85 regulan la Ocupación del Suelo en la Ciudad de Córdoba. Rangos propuestos: cumple – no cumple.

Costo del terreno y acondicionamiento

Se evaluará este aspecto a partir de un estudio de valuación del terreno según Catastro Provincial o Municipal, tasaciones y factibilidad de expropiación de tierras en caso de requerirse, en conjunto con el costo de para adecuar el terreno natural. Rangos propuestos: bajo, acorde, elevado.

Condiciones climáticas locales - Precipitación máxima diaria

El clima condiciona las soluciones técnicas, los costos operativos y los impactos ambientales en un vertedero sanitario desde la construcción del mismo hasta su mantenimiento durante la vida útil del mismo. Un factor clave analizar es la incidencia del clima en la generación de lixiviados. Se considera como datos para la evaluación de este variable, la precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de 10 Años. Rangos: <100 mm - 100 mm a 300 mm - >300 mm

CONCLUSIONES

La figura 1 presenta la evaluación de la factibilidad de la ubicación de un vertedero sanitario considerando tres alternativas de sitio propuestas y los criterios previamente desarrollados.

En la primera sección de la tabla se definen los criterios de selección y los aspectos que cada uno considera.

En la segunda sección se detalla el aspecto evaluado referido a cada alternativa. Aquí el usuario es quien selecciona una opción dentro de los parámetros especificados.

Así, a partir del método de clasificación por colores se visualiza la ponderación individual de cada criterio de selección y su influencia en el valor de la factibilidad final correspondiente a cada sitio.

VERTEDEROS SANITARIOS								
LOCALIZACIÓN DE VERTEDEROS								
CRITERIOS DE SELECCIÓN		ALTERNATIVA						
		A			B		C	
AMBIENTAL	Tipo de suelo	LIMOSOS	59%		LIMOSOS	0%	LIMOSOS	77%
	Profundidad de la NF	1.52m a 3m			1.52m a 3m		1.52m a 3m	
	Pozos de agua	> 1000 m			> 1000 m		500 m a 1000m	
	Cercanía a cuerpos de agua superficiales	>1000 m			>1000 m		>1000 m	
	Riesgo de inundación	Leve			Moderado		Leve	
	Influencia de vientos en centros poblados	Influencia alta			Influencia alta		Influencia minima	
	Flora y fauna	Area protegida			Especie protegida		Area protegida	
	Zona sísmica	4			1		0	
	Cercanía a espacios naturales protegidos	> 1000 m			500 m		> 1000 m	
SOCIAL	Cercanía a centros poblados	500m	88%		>1000 m	0%	500m	43%
	Aceptación publica y percepción social	Muy buena			Muy buena		Muy mala	
	Cercanía a patrimonios culturales	> 1000 m			500 m		> 1000 m	
TÉCNICOS	Accesibilidad a centros poblados	Muy Buena	90%		Mala	0%	Mala	63%
	Topografía del terreno	Llanura			Ondulada		Llanura	
	Disponibilidad de servicios	No existente			Existente		Existente	
	Espacio disponible y expansión futura	20 Ha - 50 Ha			>50 Ha		<20 Ha	
	Condiciones climáticas locales	<100 mm			100 - 300 mm		100 - 300 mm	
NORMATIVO Y LEGAL	Zonificación territorial	Amarillo	25%		Rojo	0%	Amarillo	75%
	Ocupación del suelo permitido	No Cumple			Cumple		Cumple	
ECONOMICO	Costo del terreno y acondicionamiento	Bajo	100%		Elevado	0%	Elevado	30%
FACTIBILIDAD		76%			0%		62%	

Fig. 1. Evaluación de la factibilidad de la ubicación de un vertedero sanitario comparando tres alternativas de sitio. Autoría propia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba y en especial al Departamento de Ingeniería Civil por brindarnos la formación académica y profesional que ha hecho posible la realización de este trabajo, y agradecemos a nuestros docentes por compartir sus conocimientos y por su constante compromiso con la excelencia académica.

REFERENCIAS

Environmental protection agency (EPA). (1991). Criteria for municipal solid waste landfills (MSWLFS), 40 C.F.R. Part 258.

INPRES-CIRSOC 103. (2021). Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes.

Ley N° 12.665 de 1940. Creación de la comisión nacional de museos, de monumentos y de lugares históricos, Argentina. 15 de octubre de 1940.

Ley N° 22.351 de 1981. Ley Nacional de parques nacionales, monumentos naturales y reservas, Argentina. 20 de enero de 1981.

Ley N° 22.421 de 1981. Ley Nacional de conservación de la fauna, Argentina. 5 de marzo de 1981.

Ley N° 23.919 de 1991. Ley Nacional convenio RAMSAR sobre humedales, Argentina. 21 de marzo de 1991.

Ley N° 24.375 de 1994. Ley Nacional convenio sobre la diversidad biológica, Argentina. 6 de octubre de 1994.

Ley N° 25.675 de 2002. Ley general de ambiente. 28 de noviembre de 2002.

Ley N° 25.743 de 2003. Protección del patrimonio arqueológico y paleontológico, Argentina. 4 de junio de 2003.

Ley N.° 26.331 de 2007. Ley de bosques, Argentina. 28 de noviembre de 2007.

Ordenanza 8057 de 1985. [Concejo deliberante de la ciudad de Córdoba]. Establece regulación de la ocupación del suelo y preservación de ámbitos históricos en el área central.

Ordenanza 8256 de 1986. [Concejo deliberante de la ciudad de Córdoba]. Por la cual regula la ocupación del suelo dentro del ejido municipal.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). Gestión segura de los residuos de las actividades sanitarias (2ª ed.).

Resolución 1143. [Secretaría de política ambiental]. (2002). Normativa para la disposición de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios.

Sharma, Hari D. y Reddy Krishna R. (2004). *Geoenvironmental Engineering: Site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. John Wiley & Sons.

CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS EN SEDIMENTOS LOESSOIDES: CASO DE ESTUDIO, CÓRDOBA, ARGENTINA

Matías Forno[1,2], Luciano B. Quota[1,2], Gabriela A. Sacchi[1], Mariana Nai Bregaglio[3]
[1]Escuela de Geología, Facultad de Ciencias de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Ismael Bordabehere s/n, Córdoba, Argentina.
[2]Geólogo independiente, ciudad de Córdoba, Argentina.
[3]Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Cambio Climático - Sec. de Ambiente y Economía Circular - Municipalidad de Córdoba.
Mail de contacto: gsacchi@unc.edu.ar, mforno@unc.edu.ar

RESUMEN
El trabajo analiza la evolución de la contaminación por hidrocarburos en suelos y aguas en una estación de servicio en la ciudad de Córdoba, Argentina. Además, se evaluó la efectividad de las técnicas de remediación implementadas entre 2009 y 2019. El sitio se encuentra caracterizado por una secuencia compuesta de limos arcillosos, arenas finas limosas y limos arenosos finos. Para la determinación del modelo conceptual de sitio (MCS) se siguieron las guías ASTM 1903-97 y ASTM E 1912-98. Las determinaciones de laboratorio en Fase Líquida No Acuosa (FLNA) y en suelos siguieron metodologías definidas por EPA, analizando: HTP´s (Hidrocarburos totales de petróleo), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y HAP´s (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos). El estudio reveló que, aunque en una primera instancia se extrajeron los tanques de almacenamiento, se midió un incremento significativo del área contaminada por HTP, expandiéndose aproximadamente un 385% durante el período analizado (2009-2019). Se identificó una fase líquida no acuosa (FLNA) con espesores entre 0,33 y 0,64 m sobre un nivel freático fluctuante ubicado a ≈ 7,5 m de profundidad. Las técnicas de remediación implementadas (venteo de suelos e inyección de aire) no mostraron resultados efectivos, principalmente debido a la profundidad de inyección de aire (por debajo del nivel freático). Se propone variar el enfoque de para la remediación. Los resultados destacan la importancia de considerar la presencia y variación del nivel freático en el diseño de estrategias de remediación efectivas.

Palabras clave: degradación, hidrocarburos, suelos, FLNA.

ABSTRACT
This study analyzes the evolution of hydrocarbon contamination in soils and groundwater at a service station in Córdoba, Argentina. Additionally, the effectiveness of remediation techniques implemented between 2009 and 2019 was evaluated. The site is characterized by a sequence of clayey silts, silty fine sands, and fine sandy silts. To determine the Conceptual Site Model (CSM), ASTM 1903-97 and ASTM E 1912-98 guidelines were followed. Laboratory determinations of Nonaqueous Phase Liquid (NAPL) and soil samples followed EPA-defined methodologies, analyzing Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes), and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). The study revealed that, although storage tanks were initially removed, a significant increase in the TPH-contaminated area was measured, expanding approximately 385% during the analyzed period (2009-2019). A Nonaqueous Phase Liquid (NAPL) was identified with thicknesses ranging from 0.33 to 0.64 m above a fluctuating water table located at approximately 7.5 m depth. The implemented remediation techniques (soil vapor extraction and air sparging) did not show effective results, primarily due to the air injection depth being below the water table. A change in the remediation approach is proposed. The results highlight the importance of considering the presence and variation of the water table in the design of effective remediation strategies.

Keywords: degradation, hydrocarbons, soils, NAPL.

INTRODUCCIÓN

Las actividades de uso del suelo por el hombre dan origen con frecuencia a consecuencias ambientales especialmente observables en el suelo, por ser este el primer punto de contacto de una fuga accidental de sustancias líquidas o sólidas que pueden ser tóxicas (Coria 2007). Cuando en instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos ocurren pérdidas, se provoca la contaminación de suelos y/o aguas.

Esto justifica la adopción de medidas de vigilancia y control sobre la potencial afectación al suelo, dada la relación de estos con la calidad del agua para consumo humano y las cadenas alimenticias, contribuyentes básicos para la vida humana. Por esta razón,

se propone analizar la problemática de contaminación de suelos por hidrocarburos en un sitio específico de la ciudad de Córdoba, donde se han realizado acciones de remediación sin resultados satisfactorios.

Específicamente, la zona de estudio se encuentra emplazada en lo que Quintana Salvat, et al. (1994), definen como Planicie Pedemontana Oriental, la cual está caracterizada por una capa superficial (~ 0 a 10 m de profundidad), en la que los sedimentos están caracterizados por materiales como limos y arenas, acompañados por la presencia de loess, limos loéssicos y limos, una sedimentación típica en la región, correspondiente a depósitos eólicos finamente estratificados del Pleistoceno Superior?.

Se destaca la presencia de un nivel freático de profundidad variable temporalmente, en torno a los 7,5 metros bajo boca de pozo (mbbp) hacia el año 2009.

Este caso de estudio pone de manifiesto la complejidad de abordar la contaminación de suelos por hidrocarburos y la importancia de implementar medidas adecuadas de evaluación y remediación. La investigación no solo destaca la necesidad de cumplir con la normativa vigente, sino también de considerar la evolución de las tecnologías y los enfoques de gestión de riesgos para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental de la Municipalidad de Córdoba, controla las actividades que puedan generar algún impacto negativo sobre el ambiente, la salud y los recursos naturales. A través de la Ordenanza 9.847 de Evaluación de Impacto Ambiental, controla tanto la instalación de estas actividades como el cierre de estas. Además, la Ordenanza 12.260 de pasivos ambientales, obliga al titular de la actividad que contaminó o generó un pasivo ambiental a remediar o recomponer el sitio. Los valores límites legislados en la ciudad de Córdoba, son los especificados por la Resolución 235 de la Secretaría de Ambiente de la Municipalidad de Córdoba (2010), que además establece el procedimiento metodológico para el muestreo y análisis de suelos contaminados con hidrocarburos.

Dentro de este marco, el presente trabajo se basó en el análisis de los tres cuerpos que conforman el expediente del cierre de una estación de servicios, tomando datos acerca del historial de funcionamiento. Se tuvieron en cuenta muestreos, información sobre las concentraciones de analitos en suelo y agua, profundidades, metodologías de muestreo y perforación, resoluciones que autorizan los procedimientos, datos sobre el nivel freático. Los trabajos destinados a la caracterización inicial, como al seguimiento de la fase de remediación fueron realizados por diferentes actores, y en distintas fases de estudio. En general, se aplicaron los Procedimientos Operativos Estándar (SOP) y las normas de QA/QC recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) para investigaciones de tipo Fase I y II (ASTM E 1527/00 y ASTM E 1903-97-R 2002).

Para la realización de los sondeos de muestreo de suelos y aguas, se utilizaron equipos con tecnología de helicoide continuo de accionamiento hidráulico. Se realizaron perforaciones de 4” hasta un máximo de 13 m de profundidad sin asistencia de fluidos de perforación. El muestreo de fase líquida se llevó a cabo con muestreadores de tipo bailer desechable.

Las determinaciones analíticas en laboratorio incluyeron, para la caracterización de Fase Líquida No Acuosa (FLNA), la metodología EPA 8015 y TNRCC 1005/1006 para HTP’s (Hidrocarburos totales de petróleo), y EPA 8260 y EPA 8270 para BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y HAP’s (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tanto la distribución de la infraestructura del sitio de estudio, como la distribución de las plumas contaminantes para 3 momentos diferentes, se encuentran graficadas en la Figura N°1. La pluma contaminante graficada, representa la distribución areal de todos los valores de hidrocarburos totales de petróleo (HTP´s) por encima de 50 ppm, cualquiera sea su profundidad.

En el historial analizado entre los años 2009 y 2019 (Figura 1(A) y 1(C)), se registró un notable incremento en la contaminación por HTP´s en suelos del predio. En 2009, los valores máximos eran de 12.100 ppm, limitados a zonas profundas (6–8 m) y una pluma localizada principalmente en la zona de tanques de almacenamiento. En ese momento se decidió comenzar con el retiro del sistema de tanques y la instalación de un método de remediación activo mediante inyección de aire comprimido a una profundidad de 9 mbbp y conjunto con un sistema de extracción de gases mediante vacío. Para el año 2012, tras el retiro de tanques, se detectaron concentraciones de hasta 22.100 ppm. En 2014, con el sistema de remediación ya iniciado y en funcionamiento, se alcanzaron picos de hasta 36.000 ppm y una relocalización de la pluma de HTP´s en sentido del flujo subterráneo. Finalmente, en 2019, se verificó una afectación extendida por todo el predio, con hasta valores de 31.038 ppm en suelos. La fase líquida no acuosa (FLNA) estuvo presente en casi todos los períodos, aunque ausente en algunos de los nuevos pozos realizados en 2019. En Tabla 1 se presentan los valores de HTP´s por año en que se realizó el muestreo.

De esta forma, se identificaron, en el sitio de estudio, dos fuentes de contaminación por HTP´s, tanto para suelo como para agua: una vinculada al Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH) del establecimiento hasta el 2012, y otra asociada principalmente al aporte proveniente de la FLNA.

Las técnicas aplicadas de remediación en el sitio de estudio, a saber, el venteo de suelos y la inyección de aire, mostraron limi-

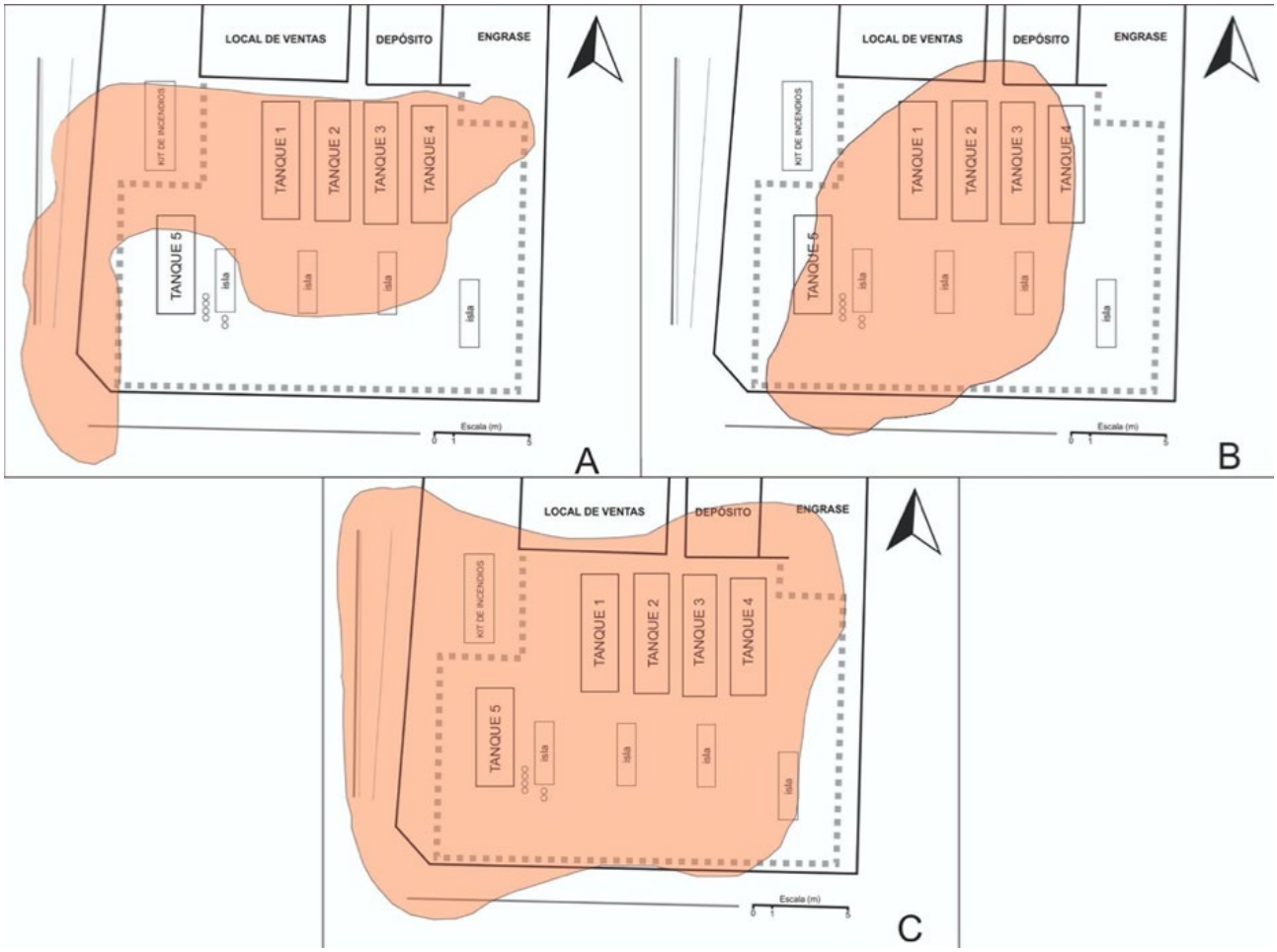


Fig. 1: Distribución de plumas contaminantes incluyendo las áreas de todas las profundidades para los años 2009 (A), 2014 (B) y 2019 (C).

AÑO	POZOS MUESTREADOS	MUESTRAS POR POZO	MUESTRAS >5.000 PPM	MÁX. HTP SUELO (PPM)	FLNA PRESENTE
2009	16	5	2	12.100	Sí (1,4 m)
2012	11	1	5	22.100	----------
2014	23	5	1	36.000	Sí (0,64 m)
2019	22	8	9	31.038	Sí (0,35 m)

Tabla N° 1 - Evolución de contaminación por HTP y FLNA por año de muestreo.

taciones significativas, posiblemente debido a la baja permeabilidad del suelo. La falta de un monitoreo continuo y de un diseño ajustado a las condiciones específicas del sitio podría haber contribuido también a los resultados obtenidos.

En los procesos de remediación de suelos, es necesario considerar la fluctuación del nivel freático como fuente de propagación de hidrocarburos. Debido a esta dinámica, se recomienda implementar un enfoque integral de remediación, priorizando la extracción de la FLNA y el tratamiento del agua subterránea como etapas previas al tratamiento del suelo.

CONCLUSIONES

La superficie afectada por HTP´s en suelos aumentó aproximadamente un 385% entre 2009 y 2019, abarcando profundidades entre los 2 y 8 m de profundidad.

Las muestras de agua presentaron niveles superiores a los valores permitidos, con la presencia de una FLNA.

Se identificaron en el establecimiento dos fuentes de contaminación, el SASH y la FLNA. Siendo necesario evaluar la fluctuación del nivel freático como fuente de propagación de hidrocarburos.

La técnica aplicada de remediación en el sitio de estudio presentó limitaciones significativas, relacionadas a permeabilidad del suelo y plan de ejecución (monitoreo y diseño de muestreo).

REFERENCIAS

ASTM. (1997). Standard Practice for Environmental Site Assessment: Phase II Environmental Site Assessment Process. ASTM 1903-97.

ASTM. (1997). Standard Practice for Environmental Site Assessment: Phase II Environmental Site Assessment Process. ASTM E 1912-98.

ASTM. (2000).Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process. ASTM E 1527-00.

ASTM. (2002). Standard Guide for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process. ASTM E1903-97(2002).

Coria, I. D. (2007). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Ingeniería y Gerenciamiento ambiental, Universidad Abierta Iberoamericana, Centro de Altos Estudios Globales.

EPA (2006). Guidance for Preparing Standard Operating Procedures (SOPs). EPA QA/G-6.

EPA 8015 y TNRCC 1005/1006 para HTPs (Hidrocarburos totales de petróleo), y EPA 8260 y EPA 8270.

Ordenanza 9748 de 1997 – [El Concejo Deliberante de la Ciudad de Córdoba]. Por el cual se regula la localización y aspectos físicos, funcionales y ambientales de estaciones de servicio. 29 de septiembre de 2009.

Ordenanza 9847 de 1998 – [El Concejo Deliberante de la Ciudad de Córdoba]. Por el cual se regula el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental aplicable en el ámbito de la Ciudad de Córdoba. 13 de febrero de 2009.

Ordenanza 12260 de 2013 – [El Concejo Deliberante de la Ciudad de Córdoba]. Por el cual regula la prevención e identificación de los daños y pasivos ambientales. 27 de diciembre de 2013.

Resolución 235 - Municipalidad de Córdoba. Dirección de Evaluación de Impacto Ambiental y Cambio Climático, 2010.

Quintana Salvat, F., & Barbeito, O. (1994). Geomorfología y riesgo geológico del Ejido urbano de Córdoba. Fotointerpretación.

AUSCULTACIÓN DE FALLA CUATERNARIA A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO H/V EN LA ZONA DEL ACEQUIÓN, SAN JUAN, ARGENTINA

Emilce G. Giolo[1], Sebastián M. Vía[1], Francisco A. Calderón[1]
[1]CeReDeTec, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, Mendoza, Argentina.
Mail de contacto: emilce.giolo@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

El área sur de la depresión Matagusanos-Maradona-Acequión muestra evidencias de actividad cuaternaria asociadas a la Falla Acequión. En esta falla maestra principal inversa, con vergencia oriental, con desarrollo de escarpas de hasta aproximadamente 12 m, se han reconocidos por lo menos 5 eventos de magnitud mínima de Mw 6,5 durante los últimos ~35 ka y al menos dos eventos de magnitud superior a Mw 7 en los últimos 12-15 ka (Audemard et al. 2016).

El método de Nakamura (HVSR, horizontal to vertical spectral ratio), tiene el objetivo determinar la frecuencia predominante de suelos y su amplificación sísmica. Esta metodología, permite identificar la frecuencia de la columna de suelo presente entre la superficie y el basamento rocoso, a partir del registro de vibración ambiental. Esta técnica posibilita obtener variaciones del sustrato por lo que puede ser aplicada para identificar estructuras ciegas, en particular fallas de actividad cuaternaria (Giolo et al. 2019).

Palabras clave: Auscultación - Cociente espectral – Falla cuaternaria – Detección de fallas

ABSTRACT

The southern area of the Matagusanos-Maradona-Acequión Depression shows evidence of Quaternary activity associated with the Acequión Fault. This east-verging reverse main fault, with scarps up to approximately 12 m high, has recorded at least 5 events with a minimum magnitude of Mw 6.5 during the last ~35 ka and at least two events with a magnitude greater than Mw 7 in the last 12-15 ka (Audemard et al. 2016). The Nakamura method (HVSR, horizontal to vertical spectral ratio) determines the predominant soil frequency and its seismic amplification. This methodology allows the frequency of the soil column present between the surface and the bedrock to be identified from the ambient vibration record. This technique makes it possible to detect substrate variations and can therefore be applied to identify blind structures, particularly faults with Quaternary activity (Giolo et al. 2019).

Keywords: Subsurface characterization – Spectral ratio – Quaternary tectonics – Fault detection.

INTRODUCCIÓN

La falla Acequión se ubica en el sector sur del valle tectónico Matagusanos–Maradona–Acequión, en la provincia de San Juan. Esta depresión constituye una cuenca tectónica dentro de la unidad morfoestructural de la Precordillera. El segmento presenta una escarpa de hasta 12 metros de altura, orientada norte-sur, con aproximadamente 12 km de longitud. A lo largo de su traza se observan exposiciones naturales donde la falla afecta depósitos del Pleistoceno tardío-Holoceno, tanto lacustres como aluvionales, estudiados por diversos autores (Paredes y Perucca, 2000; Moreiras et al., 2008; Perucca et al., 2009; Audemard et al., 2016; Colavitto et al., 2021).

El presente trabajo expone los resultados de la aplicación del método HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), también conocido como método de Nakamura, con el objetivo de detectar estructuras neotectónicas en zonas con escasa expresión superficial. Esta técnica ha demostrado ser eficaz para identificar variaciones en el lecho rocoso, permitiendo la detección de estructuras activas no visibles en superficie (Hellel et al., 2012). Mediante este método fue posible detectar un sistema secundario de estructuras menores asociadas a la falla principal Acequión. En este sentido, se propone el uso del método H/V como una herramienta geofísica eficaz para la auscultación de estructuras con actividad neotectónica en zonas con escasa evidencia superficial.

El área de estudio se encuentra en la Precordillera de San Juan, extremo sur de los Andes Centrales, caracterizada como una faja plegada y corrida generada por la migración del frente orogénico hacia el antepaís durante el Mioceno, en el contexto de la subducción horizontal de la placa de Nazca iniciada hace unos 18 Ma (Ramos et al., 2002). La región se subdivide en tres unidades morfoestructurales: Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981). Cortés et al. (2006) definieron rasgos específicos de la Precordillera Sur, mientras que Ahumada y Costa (2009) analizaron las interacciones estructurales entre las subunidades Central y Sur. La Figura 1 muestra la localización del área analizada.

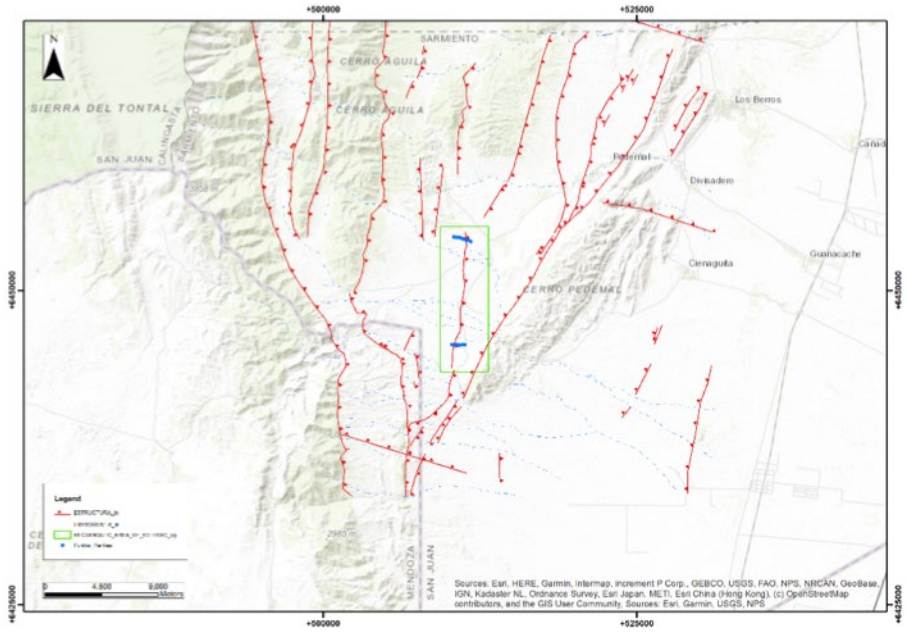


Figura 1: Sistemas de fallas con actividad tectónica cuaternaria en la provincia de San Juan (en rojo). En el rectángulo verde se indica el área de estudio. En traza continua azul se indican los perfiles geofísicos Norte y Sur, perfiles analizados con la técnica (HVSR).

METODOLOGÍA

Descripción del Método H/V

El método HVSR (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*), propuesto por Nakamura (1989, 2000, 2008), se desarrolló inicialmente para el estudio de efectos de sitio asociados a sismos. Esta técnica asume que los microtremores, también llamados ruido ambiental, o vibraciones ambientales, están compuestos por ondas superficiales y ondas de cuerpo (P y S), que se propagan en sedimentos blandos sobre un basamento rocoso. La relación espectral entre las componentes horizontal y vertical del movimiento permite estimar la frecuencia fundamental del suelo. Nakamura afirmó que el movimiento vertical (Vf) y horizontal (Hf) del suelo sobre la superficie libre puede interpretarse como la suma de las ondas internas que viajan desde el basamento rocoso y la contribución combinada de las ondas superficiales.

El efecto de las ondas de Rayleigh se puede estimar con base en la función de transferencia T(f). Las componentes Hf(f) y Vf(f) son respectivamente las transformadas de Fourier de las series temporales de movimiento horizontal y vertical en la superficie, considerando respectivamente la contribución de los dos tipos de onda. A la relación entre Hf(f) y Vf(f), Nakamura la denominó QTS por el acrónimo de *Quasi Transfer Spectrum.* Consideró que Hb(f) y Vb(f) son iguales a los espectros en un afloramiento rocoso, los cuales denominó Hr(f) y Vr(f).

Esto puede considerarse una aproximación porque, aunque los picos entre estos valores coinciden, las magnitudes no. Si se tienen los espectros de amplitud en la capa de roca que es Hb y Vb, se podrían hacer las relaciones entre las componentes horizontal y vertical de la capa superficial y del basamento rocoso, obteniendo funciones de transferencia Th(ωf) y Tv(f) que eliminarían el efecto de la fuente y obtendrían las frecuencias naturales del suelo (Ecuación 1).

$$Tv(f) = \frac{Vf(f)}{Vb(f)} \; ; \; Th(f) = \frac{Hf(f)}{Hb(f)} \qquad (1)$$

Si el valor de Tv(*f*) es cercano a 1, entonces el efecto de las ondas de Rayleigh es cercano a cero. Nakamura propuso el uso de una función de frecuencia modificada Tm(f) (ecuación 2), que relaciona las funciones de transferencia Th(f) y Tv(f):

$$Tm(f) = \frac{Th\,(f)}{Tv\,(f)} = \frac{Hf(f)}{Vf(f)} \qquad (2)$$

Se puede demostrar tanto teórica como empíricamente que, independientemente del tipo de ondas de los movimientos superficiales Hf(*f*) y Vf(*f*), la relación entre ellas es que la razón H/V, presenta un pico consistente con la frecuencia predominante f0 del depósito de suelo asociado a las vibraciones horizontales (Ritta et al., 2012).

Mediciones y procesamiento de las señales

La medición se realizó mediante sensores capaces de registrar las vibraciones ambientales del suelo. En este trabajo se utilizaron acelerómetros modelo Basalt (Kinemetrics), los cuales integran un sensor triaxial interno que permite registrar las tres componentes del movimiento (dos horizontales ortogonales entre sí y una vertical). Además, el equipo cuenta con un sistema GPS incorporado que posibilita la georreferenciación de cada punto de medición y la sincronización precisa del tiempo de adquisición.

En este estudio, se siguieron las recomendaciones establecidas por el manual del proyecto SESAME (2004), ampliamente aceptado como referencia técnica en estudios de microtremores. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 200 Hz, y cada registro tuvo una duración de 10 minutos. El sensor se colocó nivelado directamente sobre el suelo.

El procesamiento de las señales se realizó mediante el software Geopsy, desarrollado en el marco del proyecto europeo SESAME (2004). Geopsy es una interfaz gráfica especialmente diseñada para estudios de sismología y geofísica, que permite calcular la relación espectral entre las componentes horizontales y verticales del ruido ambiental a través del análisis de Fourier.

Identificación de fallas aplicando el método H/V

La técnica del cociente espectral H/V, aplicada a vibraciones ambientales, permite identificar o inferir la presencia de estructuras tectónicas que no presentan una expresión morfológica evidente ni indicios geológicos superficiales. Esta metodología, de adquisición rápida y no invasiva, constituye una herramienta útil para orientar investigaciones más detalladas y específicas en superficie o en el subsuelo.

Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en ingeniería sísmica para la evaluación de efectos de sitio, al identificar la frecuencia fundamental del terreno, la cual está relacionada con la profundidad del basamento rígido y las propiedades dinámicas del perfil geológico (Calderón et al., 2017).

Una aplicación destacada de esta metodología tuvo lugar en la ciudad de Boumerdes, Argelia, donde se logró detectar una falla ciega mediante el análisis del cociente H/V. Los resultados obtenidos fueron posteriormente validados mediante perforaciones y mediciones de velocidad de onda de corte (Vs), confirmando la efectividad del método en la identificación de estructuras subsuperficiales (Hellel et al., 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este estudio se realizaron mediciones de vibraciones ambientales registrando las señales en tres direcciones: Norte-Sur, Este-Oeste y vertical. Para el análisis de las señales se utilizó el software Geopsy, aplicando un algoritmo de tipo anti-trigger con el fin de excluir ventanas afectadas por ruido transitorio de origen antropogénico. A partir de los datos obtenidos, se calcularon los espectros promedio de las dos componentes horizontales (N-S y E-O), los cuales fueron divididos por la componente vertical para estimar la relación espectral H/V.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 1 y 2, donde se consignan las frecuencias naturales (f_0) y la cota topográfica para los distintos puntos observados, distribuidos a lo largo de dos perfiles: Perfil Sur (Tabla 1) y Perfil Norte (Tabla 2).

A partir de las evidencias geomorfológicas asociadas a la traza de la falla, se observa que el Perfil Sur presenta una configuración topográfica asimétrica, con un desnivel máximo de 16 metros en el sector analizado. Los valores de frecuencia natural del subsuelo varían en este tramo, con un máximo de 82,29 Hz y mínimos de 60,88 Hz y 59,81 Hz. Esta variabilidad permite identificar con claridad la zona de máxima deformación, correspondiente a la traza de la Falla Acequión en el sector sur del área de estudio, tal como se ilustra en la Figura 1.

En el caso del Perfil Norte, los rasgos geomorfológicos también evidencian un perfil topográfico asimétrico, caracterizado por una cara libre y una contrapendiente, lo que genera una escarpa de falla de hasta 6 metros de altura. El análisis de la frecuencia natural del subsuelo a lo largo de este perfil indica un valor máximo de 96,52 Hz. Esta información permite interpretar que la zona de máxima deformación vinculada a la Falla Acequión se encuentra en el tramo norte del área en estudio.

PERFIL SUR				
Punto	Longitud	Latitud	Elevación [m]	Frecuencia [Hz]
1	-68°53´25,10´´	-32°07´30,84´´	1.418,00	80,84
2	.68°53´22.40´´	-32°07´30,64"	1.414,71	80,84
3	-68°53'19.33´´	-32°07´31,31"	1.402,52	63,08
4	-68°53'17,6´´	-32°07´31,26´´	1.400,48	60,89
5	-68°53'14,15´´	-32°07´31,37"	1.397,96	82,29
6	-68°53'13,00´´	-32°07´31,20"	1.397,29	59,82
7	-68°53´10,78´´	-32°07'31.21"	1.395,72	73,99
8	-68°53´08,59´´	-32°07´31,17"	1.394,00	67,72

Tabla 1: Cota topográfica y frecuencias naturales obtenidas para cada punto de medición correspondiente al Perfil Sur.

CONCLUSIONES

PERFIL NORTE				
Punto	Longitud	Latitud	Elevación [m]	Frecuencia [Hz]
1	-68°53'22,63''	-32°02'51,95''	1.520,60	-
2	-68°53'18,05''	-32°02'51,96''	1.512,66	80,85
3	-68°53'14,09''	-32°02'52,50''	1.503,71	60,89
4	-68°53'09,22''	-32°02'53,71''	1.500,63	78,03
5	-68°53'05,51''	-32°02'53,38''	1.497,85	96,52
6	-68°53'01,89''	-32°02'55,04''	1.496,71	67,72
7	-68°52'57,85''	-32°02'55,56''	1.489,37	67,72
8	-68°52'54,42''	-32°02'57,76''	1.484,68	93,16

Tabla 2: Cota topográfica y frecuencias naturales obtenidas para cada punto de medición correspondiente al Perfil Norte.

La aplicación del método HVSR en los tramos sur y norte de la falla Acequión, permitió detectar estructuras secundarias asociadas, las cuales se correlacionan con resaltos topográficos y valores anómalos de frecuencia natural del subsuelo.

La técnica del cociente espectral H/V, aplicada a registros de vibración ambiental, permitió estimar la frecuencia natural fundamental de la columna sedimentaria entre la superficie y el basamento rocoso. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad de esta técnica para detectar variaciones en el subsuelo, incluyendo estructuras potencialmente sismogénicas que no presentan expresión superficial evidente.

En este contexto, se concluye que el método H/V no solo constituye una herramienta fundamental para el análisis de efectos de sitio, sino que también resulta eficaz para la detección y caracterización de estructuras neotectónicas. No obstante, dado que la frecuencia fundamental depende tanto de la profundidad del estrato como de la velocidad de propagación de la onda de corte, se recomienda complementar estos resultados con otros métodos o estudios geofísicos que aporten mayor resolución en la caracterización del subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Dr. Juan Manuel Alcacer Sánchez, del Instituto INGEO. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

REFERENCIAS

Ahumada, E. A., y Costa, C. H. (2009). Antithetic linkage between oblique Quaternary thrusts at the Andean front, Argentine Precordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 28, 207–216. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.03.008.

Audemard, F. A., Perucca, L., Pantano Zuñiga, A., Ávila, C., Onorato, M., Vargas, H., Alvarado, P., & Viete, H. (2016). Holocene compression in the Andes Precordillera, in the Acequión region (San Juan Province, Argentina): Geomorphic, (micro- and meso-) tectonic, and (direct and indirect) paleoseismic evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, 67, 140–157. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.005.

Calderón, F., Giolo, E., Frau, C., Guevara, M., Rodríguez, H., Tornello, M., Lujan, F., & Gallucci, R. (2017). Seismic microzonation and site effects detection through microtremors measures: A review. En N. Ceryan (Ed.), Handbook of research on trends and digital advances in engineering geology (pp. 326–349). https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2709-1.ch009.

Colavitto, B., Alcacer, J., Rothis, M., Haro, F., Blanc, P., Onorato, R., & Perucca, L. (2021). Análisis paleosismológico de la falla Acequión mediante perfiles topográficos de escarpa (Precordillera de San Juan, Argentina). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* 73(2), A090121. https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a090121.

Cortés, J., Casa, A., Pasini, M., Yamin, M., y Terrizzano, C. M. (2006). Fajas oblicuas de deformación neotectónica en Precordillera y Cordillera Frontal (31° 30'–33° 30' LS): controles paleotectónicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61, 639–646.

Geopsy. (s/f). Manual de uso del programa Geopsy. Recuperado el 5 de julio de 2025 de http://www.geopsy.org/documentation/geopsy/

Giolo, E. G., Calderón, F. A., Pagano, S., Via Gatica, S. M., & Frau, C. D. (2019). La técnica del cociente espectral H/V como herramienta para la determinación de estructuras ciegas. Un caso de estudio en la ciudad de Mendoza, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 43, diciembre 2019.

Hellel, M., Oubaiche, E., Chatelain, J., Machane, D., Bensalem, R., Guillier, B., & Cheikh Lounis, G. (2012). Basement mapping with single-station and array ambient vibration data: Delineating faults under Boumerdes City, Algeria. *Seismological Research Letters,* 83(5), 798–805. https://doi.org/10.1785/0220110142.

Moreiras, S. y Banchig, A. (2008). "Further evidences of Quaternary activity of the Maradona faulting, Precordillera Central, Argentina". 7th International Symposium on Andean Geodynamics (Extended Abstract), Niza, pp. 344–347.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. Quartely Report of Railway Technical Research Institute 30: 25-33.

Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda, Paper 2656.

Nakamura, Y. (2008). On the H/V spectrum. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Ortiz, A., y Zambrano, J. J. (1981). La provincia geológica Precordillera Oriental. Actas del 8º Congreso Geológico Argentino, 3, 59–74.

Paredes, J., y Perucca, L. (2000). Fallamiento cuaternario en la depresión de Matagusanos, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 55(1–2), 23–30.

Perucca, L. P., Bracco, A. I., y Moreiras, S. M. (2009). "Determination of seismogenic structures and earthquake magnitude from seismites in the Acequion River, Precordillera, Argentina". *Journal of Iberian Geology*, 35, 5–18.

Ramos, V. A., Cristallini, E. O., y Pérez, D. J. (2002). The Pampean flat slab of the Central Andes. Journal of South American Earth Sciences, 15, 59–78.

Ritta, R., Suárez, L., & Pando, M. (2012). Determinación del periodo fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral Horizontal/Vertical. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 31, 1399–1419.

SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Proyecto europeo EVG1-CT-2000-00026.

CONFLICTIVIDADES AMBIENTALES GENERADAS POR ACTIVIDADES EXTRACTIVAS, EN EL ÁREA URBANA Y PERIURBANA DE BAHÍA BLANCA

Luis Nicolás Haag[1], Claudina Di Martino[1,2,3], Lenís Madsen[2,3]
[1]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[2]Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253 - Cuerpo B´. Piso 2º (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[3]Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires - Universidad Nacional del Sur). San Juan 670 (8000) Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: luis.n.haag@gmail.com

RESUMEN
La ciudad de Bahía Blanca, se ubica al suroeste de la Provincia de Buenos Aires. Su notable desarrollo urbano e industrial genera una alta demanda de minerales industriales y rocas de aplicación utilizadas en la construcción. Por ello existen en la ciudad y sus alrededores canteras de tosca, suelos seleccionados, arenas, gravas y conchillas. Esta investigación se centra en los conflictos asociados con las actividades extractivas mineras de tercera categoría en el área urbana y periurbana de Bahía Blanca. Se desarrolló un análisis de la situación actual y pasada de la actividad, del crecimiento urbano de la región y una revisión normativa, utilizando antecedentes bibliográficos, secuencia cronológica de imágenes satelitales y relevamiento de campo, lo que permitió identificar y caracterizar 18 canteras. Entre los resultados se mencionan el incumplimiento normativo generalizado y la falta de control por parte de las autoridades. Asimismo, se evidencia una deficiencia de planificación y ordenamiento territorial integral, dado que el progresivo avance del área urbana, sobre zonas periurbanas, genera problemas e incompatibilidades por el uso del suelo, ejerciendo presión sobre la actividad minera. Por otra parte, se ha identificado canteras inactivas o abandonadas, que no cuentan con tareas de remediación o cierre, convirtiéndose los sitios en pasivos ambientales. Esta investigación busca realizar un análisis integral de la situación para favorecer una adecuada planificación y ordenamiento del territorio, que permitiría desarrollar una gestión integrada, coordinada y sostenible de la actividad minera.

Palabras clave: minería, ordenamiento territorial, sostenibilidad.

ABSTRACT
The city of Bahía Blanca is located in the southwest of the Province of Buenos Aires. Its significant urban and industrial development generates a high demand for industrial minerals and rocks used in construction. Therefore, there are quarries of tuff, selected soils, sand, gravel, and shell in the city and its surrounding areas. This research focuses on conflicts associated with third-category mining activities in the urban and peri-urban areas of Bahía Blanca. An analysis of the current and past status of the activity, the region's urban growth, and a regulatory review were conducted using bibliographical background, a chronological sequence of satellite images, and field surveys, which allowed for the identification and characterization of 18 quarries. Among the results are widespread regulatory noncompliance and a lack of oversight by the authorities. Furthermore, a deficiency in comprehensive planning and land use is evident, given that the progressive expan-sion of urban areas into peri-urban areas generates problems and incompatibilities due to land use, exerting pressure on mining activities. Furthermore, inactive or abandoned quarries have been identified, with no remediation or closure work undertaken, rendering the sites environmentally responsible. This research seeks to conduct a comprehensive analysis of the situation to promote appropriate land use planning and management, which would allow for integrated, coordinated, and sustainable management of mining activities.

Keywords: mining, territorial planning, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bahía Blanca, se ubica al suroeste de la Provincia de Buenos Aires, con una superficie de 2.247 km^2 y 336.574 habitantes (INDEC, 2022). Su notable desarrollo genera una alta demanda de minerales industriales y rocas de aplicación. Dadas las condiciones geológicas, geomorfológicas y topográficas se desarrollan en la zona actividades extractivas de minerales industriales y suelos seleccionados, utilizadas por la industria de la construcción y en obras públicas. En las últimas décadas la ciudad y la región, experimentaron un proceso de urbanización exponencial, con crecimiento de baja densidad, especialmente en el suelo periurbano, fuera del anillo de circunvalación que rodea la localidad, generando cambios en el uso del suelo y expansión de la huella urbana

(IDOM, 2017). Las actividades extractivas están reguladas por el Código de Minería, y su incumplimiento, así como la ausencia de control generan conflictividades como los pasivos ambientales, dificultando la recuperación de los sitios afectados. El presente estudio tiene como objetivo identificar y caracterizar las áreas vinculadas a actividades extractivas, así como investigar el impacto ambiental que estas generan en todas sus etapas, desde la fase productiva hasta el cierre o abandono de la mina. Además, se realizó un análisis exhaustivo de las incompatibilidades que surgen entre estas actividades y otros usos del suelo, especialmente en contextos urbanos, lo que incluyó una revisión del marco legal correspondiente a nivel local, provincial y nacional. Un enfoque fundamental, será determinar las causas de los pasivos ambientales que se generan y por qué no se concretan los cierres de mina adecuadamente. Con base en estos análisis, se proponen lineamientos estratégicos para asegurar una gestión ambiental adecuada de las canteras y mejorar el planeamiento urbano, evaluando al mismo tiempo el desarrollo de las actividades extractivas en relación con las normativas vigentes.

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA

La ciudad cuenta con tres dominios geomorfológicos principales asociados a distintas unidades geológicas: El ámbito continental, que está compuesto por la peniplanicie pedemontana (González Uriarte, 2010), que se desarrolla en el sector nororiental y norte del área de estudio, con elevaciones que van entre los 60 y 100 m s.n.m. y está compuesta por sedimentos de tipo loessoide, que conforman depósitos de calcrete/tosca, denominados “sedimentos pampeanos” (Di Martino y Vecchi, 2024). El área desarrollada entre las cotas de 80-60 y 10 m s.n.m. conformada por el coluvio-aluvio y por conos aluviales coalescentes, asignados a la Fm. Bahía Blanca (González, 1984). Por debajo de la cota de 20-10 m s.n.m., y hacia el sur, se localiza el dominio marítimo vinculado a la formación de planicies mareales conformado por materiales finos conchilla y cantidades variables de esmectitas (Calo et al., 1999; González Uriarte, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

En el área de estudio se pueden identificar tres tipos de yacimientos de minerales industriales, encuadrados dentro de la tercera categoría estipulada por el código de minería: Yacimientos de tosca, ubicados a lo largo del quiebre de pendiente regional; yacimientos de gravas, arenas y conchillas y yacimientos de suelo seleccionado, en zonas donde la pendiente es baja y los suelos están más desarrollados.

El área de estudio, que abarca la superficie urbana de la ciudad de Bahía Blanca, General Daniel Cerri e Ingeniero White y un vasto sector de área rural, donde se identificaron las canteras estudiadas. Se realizó una recopilación bibliográfica y de información pública, a partir de fuentes gubernamentales oficiales, para obtener nombres y otros datos de interés. A su vez, se realizó un relevamiento de campo y un reconocimiento mediante fotointerpretación a partir de imágenes satelitales para realizar un análisis visual multitemporal en función al desarrollo urbano de la ciudad. Para el procesamiento de las imágenes satelitales y la realización de cartografía se utilizaron sistemas de información geográfica QGIS y Google Earth Pro. Por otro parte, se procedió a la revisión y análisis de la normativa nacional, provincial y municipal relacionada con estas actividades y de los códigos de planeamiento urbano existentes en la ciudad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de datos obtenidos de la Hoja Geológica 3963-II Bahía Blanca (Folguera et al., 2017), de la información de catastro minero y de fotointerpretación de imágenes satelitales, se identificaron 18 canteras de tercera categoría (Fig. 1) siendo 10 de tosca, 5 de suelos seleccionados y 3 de arenas, gravas y conchillas; 7 activas, 6 inactivas 5 canteras en estado indefinido. Tanto en las canteras consideradas inactivas como las de condición “indefinida”, no se registran tareas de remediación o cierre de mina, como indica la legislación.

En las Tablas 1, 2 y 3 se presenta una síntesis de la información recolectada para cada una de las canteras, donde se incluyen: tipo de material explotado (ME), estado de actividad (EA), superficie explotada (SE), espesor promedio del frente explotado (EP), distancia a la población más cercana (DP) y otros datos de interés.

Si bien se observan impactos como modificación del relieve y de la dinámica hidrológica el principal problema que se percibe es la falta de control y fiscalización pudiendo identificar: canteras con actividad reciente sin habilitación, canteras inactivas o abandonadas que no cuentan con cierre de mina y canteras inactivas o abandonadas sin cierre de mina en zonas prohibidas por el CPU actual y que siguieron funcionando posteriormente a la sanción del mencionado código.

La expansión urbana de baja densidad y sin control en zonas periféricas, afecta el desarrollo de la actividad de manera negativa. Las canteras dentro del anillo de circunvalación estaban relativamente alejadas del sector urbanizado hasta la década del 90, en áreas consideradas rurales. Ya para 2010 quedaron muy cercanas e incluso rodeadas por la ciudad. Este escenario genera conflictividad e incompatibilidades en el uso del suelo, haciendo que se deba dar fin a la actividad extractiva ante la presión que ejerce el crecimiento urbano sobre el espacio rural. El cese de la actividad en dicho contexto, puede llevar a que no se respeten



Fig 1: Mapa de ubicación del área de estudio y localización de canteras relvadas.

NOMBRE	LAS DOS TOSCAS S.R.L.	LA BARRANCA	EL MANGRULLITO	MOVITRAK	MOVITRAK II	MIGLIORERI
ME	T	SS	SS	SS	SS	AGC
EA	En actividad	En actividad	No se sabe	En actividad	En actividad	Inactiva
CPU	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	ILyS3
RPM	Titular: Las Dos Toscas S.R.L Prod. N°: 350	Titular: Luis Alberto Mozzi Prod. N°: 454	No inscripta	No inscripta	No inscripta	No inscripta
SE	13,7 ha	25 ha	3,42 ha	14,5 ha	1,84 ha	1,26 ha
EP	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	1,20 m
DP	7.750 m	5.800 m	400 m	370 m	2.500 m	1.200 m

Tabla 1: información relevada para cada una de las canteras identificadas.

NOMBRE	CANTERA ACCESO A GRAL. DANIEL CERRI	CANTERA GRAL. DANIEL CERRI	FERREIRA ATILIO	VTO CUERPO DE EJÉRCITO	EX PIERUCCI	S/N (HARDING GREEN Y 17 DE AGOSTO)
ME	AGC	AGC	T	T	T	T
EA	Inactiva	Inactiva	Inactiva	No se sabe	En actividad	No se sabe
CPU	ILyS3	Eur(6) y I3	R2(1)	AE(1)	R2(6) y RP2(4)	RP2(4)
RPM	No inscripta	No inscripta	No inscripta	No inscripta	No inscripta	No inscripta
Sup. aprox.	31,5 ha	3 ha	3 ha	2,51 ha	6,5 ha	12,6 ha
EP	1,20 m	1,5 m.	Destapes sup.	Sin dato	10-12 m.	Sin datos
DP	1.150 m	1.000 m	20 m	300 m	40 m	20 m

Tabla 2: información relevada para cada una de las canteras identificadas.

NOMBRE	EL MONOLITO	CANTERA CERRO Y MORA	CANTERA CYDIND SA	ESPORA	CANTERA SOFIA	FERNANDEZ Y FERNANDEZ
ME	T	T	T	SS	T	T
EA	No se sabe	No se sabe	En actividad	En actividad	Inactiva	Inactiva
CPU	I3(2)	PUC(4)	Rural	Rural	Rural	Rural
RPM	No inscripta	No inscripta	Titular: Oscar R. Bassi y Otros. Prod. N°: 231	Titular: Ángel F. Mezquita. Prod. N°: 346	No inscripta	No inscripta
Sup. aprox.	6,36 ha	8 ha	24,8 ha	7,4 ha	10 ha	5,3 ha
EP	5-6 m	5 m	8 m	Sin dato	Sin dato	Sin dato
DP	200 m	70 m	600 m	2370 m	200 m	20 m

Tabla 3: información relevada para cada una de las canteras identificadas.

los tiempos necesarios para aplicar un correcto cierre de mina dejando en ocasiones taludes con marcados desniveles, situación que va en contrario del artículo 36 del código de minería. Estos espacios en ocasiones son utilizados por los habitantes del sector para esparcimiento y actividades recreativas, o como basureros. Por otra parte, constituyen una isla o barrera para la urbanización, pudiendo dificultar a futuro la apertura de nuevas calles o barrios. Actualmente ya no se admite ese tipo de abandono y la legislación

vigente obliga a diseñar el cierre de la mina como parte integral del proyecto, incluyendo las medidas de rehabilitación, restauración o recomposición del medio alterado (Código de Minería, artículos 249 y 262).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Del análisis y revisión de las modificaciones en los códigos de planeamiento urbano se concluye que la actividad minera no es tenida en cuenta para la definición de los distintos usos del sue-lo.
- Se identificaron fallas en el cumplimiento de la legislación vigente, evidenciando falta de control y fiscalización, tanto de la actividad minera como del desarrollo urbano y el cumplimiento de los códigos de planeamiento.
- El impacto ambiental de la actividad se asocia a problemas como la vibración del suelo, emisiones de material particulado y ruido, modificación de la cobertura vegetal y morfología del terreno y en la dinámica hidrológica
- Es necesario que los planes de ordenamiento y planificación territorial futuros contemplen la actividad minera de minerales no metalíferos, para poder lograr un desarrollo social, económico y ambiental sostenible, debido a que es una actividad indispensable para el crecimiento y desarrollo urbano e industrial.
- Se recomienda realizar a nivel municipal un análisis de sensibilidad ambiental y social del territorio para definir áreas o sectores menos conflictivos y aptos geológicamente, donde se pueda desarrollar a futuro la actividad minera.
- Se deben tener en cuenta costos de traslados de los materiales, usos futuros del espacio, cuantificación de las reservas de material y estimación del tiempo de uso, el tipo de material dis-ponible en cada sector (tosca, suelo seleccionado, arena, conchilla, etc.), limitantes geológicas y geomorfológicas, la demanda de material presente y futura con relación a la planificación y el desarrollo urbano e industrial, entre otras cuestiones
- Un conocimiento exhaustivo del crecimiento urbano, permitirá un adecuado control, evitando así que se expanda hacia zonas donde pueden generarse conflictos. Considerando, que es necesaria la actividad minera como materia prima para la construcción y el crecimiento urbano.
- Las canteras abandonadas, sin control ni acondicionamiento, constituyen un potencial riesgo para la población y un obstáculo para la urbanización.
- En explotaciones que lleven años operativas o estén abandonas, se pueden generar programas o proyectos de reconversión o revalorización de sitio, impulsados desde el municipio o desde la provincia, en coordinación con los dueños del terreno.
- En cuanto al control y monitoreo de la actividad minera, y cumpliendo con la Ordenanza Municipal N° 17.750 y de la Ley provincial N° 13.312, el municipio cuenta con una delegación para tareas de control y fiscalización de la actividad industrias de 3° categoría y cerealeras radicadas en el Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca, otorgada por la Ley Provincial N° 12.530, que creó el Comité Técnico Ejecutivo (CTE) de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Bahía Blanca, al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur y al Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CIC-UNS) por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

Caló J., Fernández E., Marcos A. y Aldacour H. (1.999). Construcción de mapas geológicos ingenieriles a partir de conocimientos previos compilados en un Sistema de Información Geográfico. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N°13: 10p.

Di Martino C., y Vecchi L.G. (2024). Expansión Territorial de Bahía Blanca: Caracterización del Área Periurbana en el sector oeste de la Ciudad. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N°51: 11p. ISSN 2422-5703

Folguera, A., Etcheverría, M. P., Zarate M. y Escosteguy L., (2017). Hoja Geológica 3963-II Bahía Blanca. Provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires. Boletín 425:96.

González, M., (1984). Depósitos marinos del Pleistoceno superior en Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires. 9° Congreso Geológico Argentino, Bariloche. Actas 3:538-555.

González Uriarte, M. (2010). Geomorfología aplicada a la gestión ambiental. En: Ambientes y recursos naturales del partido de Bahía Blanca: clima, geomorfología, suelos y aguas / compilado por Juan Dario Paoloni. - 1a ed. - Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur, 242p.

IDOM; Ingeniería y Dirección de Obras y Montaje (2017). Estudio de huella urbana y escenarios de crecimiento. Estudios Base para las Municipalidades de Bahía Blanca y Coronel Rosales, Provincia de Buenos Aires. 364p.

Instituto Nacional de Estadística y Censo (2022). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Provincia de Buenos Aires.

Código de Planeamiento Urbano de Bahía Blanca, (1993). Municipalidad de Bahía Blanca.

https://sigam.segemar.gov.ar/visor/.

https://www.gba.gob.ar/produccion/area_de_trabajo/mineria.

LA INDUSTRIA MINERA, UN LUGAR DE OPORTUNIDADES PARA LA MUJER

María A. Jerez[1,2], María N. Ahumada[1,3,4]
[1]WIM Argentina, Comité de Género, diversidad e inclusión - Comité Asesor.
[2]Magistrali Consultores. Pablo Buitrago 6063 Dpto. 2 - Córdoba, Argentina.
[3]Instituto Superior Tecnológico IES 9-019, Dirección de Educación Superior, San Juan 467 Mendoza, Argentina.
[4]International Association for Promoting Geoethics, Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma, Italia.
Mail de contacto: lic.mariajerez@gmail.com

RESUMEN
Esta investigación busca acercar información que describa la importancia de la industria minera para la inserción de la mujer en el ámbito laboral, su impacto en la formación profesional y crecimiento económico. WIM Argentina ha tenido un rol de liderazgo y acompañamiento en las acciones llevadas a cabo en terreno con una perspectiva federal para la construcción de espacios de trabajo y escucha, con la valoración del abordaje transdisciplinario para un acompañamiento integral.
Una de las principales estrategias propuestas para la inserción y el avance de la participación de la mujer en la industria minera fue la conformación estratégica de Redes Sociales que intervienen en distintos niveles de acompañamiento: programas de mentoreo nacionales e internacionales, asesoramiento focalizado a las necesidades emergentes, difusión de contenidos, acciones relevantes, conformación de acuerdos, bolsa de trabajo entre otras.

Palabras clave: minería, mujeres, desarrollo.

ABSTRACT
This research seeks to provide information describing the mining industry's importance in incorpo-rating women into the labor market and its impact on professional training and economic growth. WIM Argentina has played a leading and supportive role in the actions carried out in the field, with a federal perspective, for the construction of work spaces, with an assessment of a transdisciplinary approach for comprehensive support.
One of the main strategies proposed for the incorporation and advancement of women's participation in the mining industry was the strategic creation of social networks, which intervene at different levels of support: mentoring programs, advice focused on emerging needs, dissemination of relevant content and actions, and the creation of agreements, job listings, etc.

Keywords: mining, women, development.

INTRODUCCIÓN

La gran necesidad de inserción de profesionales en el área STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) motiva a generar diversos programas que inviten a ver en la minería una gran oportunidad de desarrollo, desmitificando falsos conceptos. Es por ello que los espacios de trabajo de campo junto a la Educación Superior (universitaria y tecnicaturas) son aliados estratégicos para fortalecer la permanencia de las mujeres en esta industria y ampliar la convocatoria a más mujeres; a su vez, facilitando la continuidad de sus estudios hasta la finalización de la carrera para poder tener una excelente oportunidad laboral.

Si bien la mayor demanda en el campo laboral de la minería está relacionada a formaciones asociadas a carreras STEM, también se requieren otro tipo de perfiles capacitados para poder dar respuesta a numerosas necesidades dentro del espacio de trabajo. Muchos de estos requisitos surgen de empresas proveedoras que forman parte de la cadena de valor de la producción y repre-sentan una posibilidad de crecimiento económico considerable.

Respondiendo a estas necesidades, se considera en este trabajo que la actualización de los programas de estudio, su articulación a través de prácticas y pasantías (en algunos casos ya desde la escuela secundaria) y hacer que las propuestas laborales sean tentadoras para la población es uno los mayores compromisos que se tiene que afrontar desde las organizaciones. Asimismo, vencer el desconocimiento y prejuicios que hay con respecto a la complejidad de actividades que comprende la industria minera representa un desafío. La Figura 1 brinda información estadística concreta elaborada por WIM y Poliarquía (2025).

Tomando estas estadísticas como referencia, desde Women in Mining Argentina (WIM) se trabaja para el aumento de la partici-pación femenina en la minería a lo largo de todo el país. La invitación a estos espacios de trabajo abarca una gran diversidad de profesiones y especialidades, como puede verse en la Figura 2.

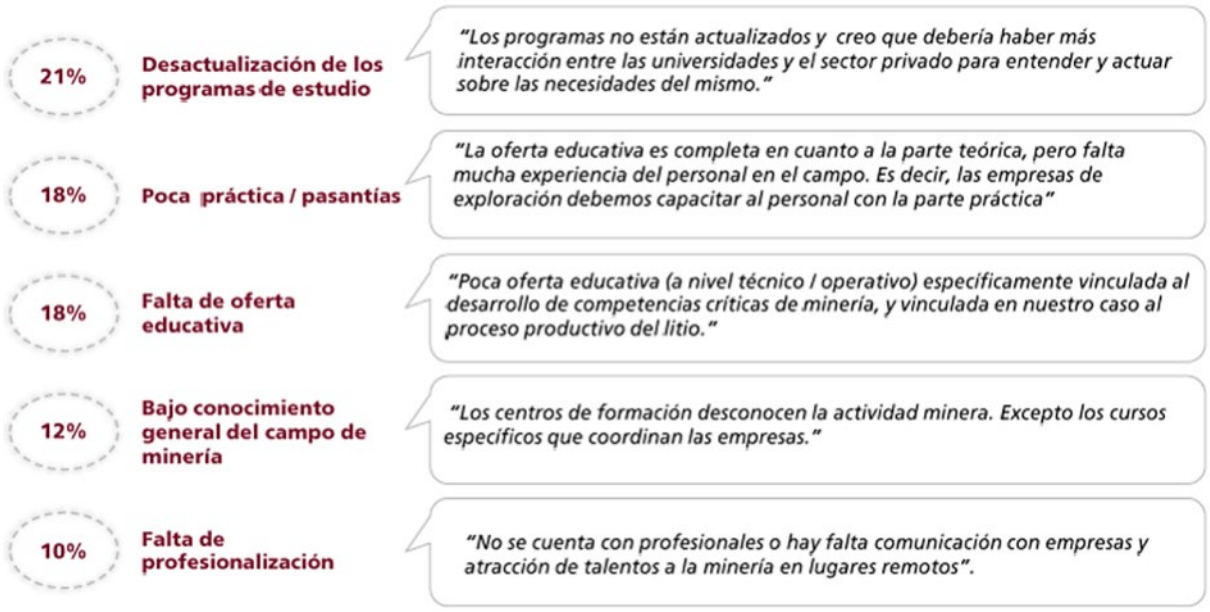


Fig. 1. Respuesta a "qué problemática identifica entre la oferta educativa y la necesidad del sector".

De acuerdo a las distintas fases que se encuentran los proyectos, serán los requisitos que varían al momento de las incorporaciones laborales. Son muy interesantes los distintos trabajos de campo que surgen en la Industria Minera. Contar con diferentes herramientas de especialización y creatividad para la adaptación en el espacio de campo es un requisito que se valora desde WIM Argentina.

	TOTAL	Salta	Catamarca	San Juan	Mendoza	Jujuy	Santa Cruz	Bs.As. + CABA
Minas	60	50	**76**	**60**	**64**	**58**	**89**	33
Ciencias ambientales	**47**	46	52	40	50	42	33	33
Industrial	**46**	50	48	45	36	42	33	**42**
Electromecánica	**42**	54	33	35	43	25	67	**42**
Seguridad e Higiene	39	42	57	25	57	25	44	25
Mecánica	36	**58**	33	25	50	17	33	25
Metalurgia	35	42	33	50	29	8	56	25
Eléctrica	**34**	46	29	35	50	17	44	**42**
Electrónica	33	33	29	25	50	33	44	**42**
Informática	32	25	19	50	50	17	22	33
Ciencias químicas	31	42	33	10	43	33	56	0
Ciencias de la tierra	30	33	38	20	7	25	33	17
Civil	27	21	29	50	14	25	11	0
Ciencias empresariales	20	21	19	30	21	8	11	8
Legales	15	13	14	5	14	17	0	17
Ciencias sociales	11	17	5	10	0	0	22	17
Agrimensura	10	13	5	10	14	0	0	8
Ciencias de la comunicación	10	4	14	0	14	8	0	8
Ciencias de la salud	9	8	10	5	14	8	0	0
otra	2	0	0	0	0	8	0	8
Ns/nc	5	13	0	10	7	0	0	0

Fig. 2. Respuesta a "¿Qué formación técnico-profesional demandará en los próximos 5 años el sector en el país?" (Respuesta múltiple, por tanto, la suma de los porcentajes puede ser mayor a 100%).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este documento se basa en prácticas realizadas en campo a través de más de 400 entrevistas individuales y grupales confidenciales, con herramientas de encuestas de opinión propias, abiertas, de múltiple opción, personales y en línea.

El trabajo se desarrolló en el proyecto Mara que comprende: Pachón, Veladero y Gualcamayo (Figura 3) en San Juan, Alumbrera y Agua Rica (Catamarca), y Abrasilver (Salta). Dentro de la aproximación al trabajo de campo se realizaron capacitaciones virtuales para la prevención de la violencia por razones de género (WIM y Ministerio de Economía, 2023), entre alguna de las temáticas,

apuntando a una comunicación inclusiva, respetuosa y equitativa. Asimismo, se dictaron capacitaciones a proveedores. De estas experiencias se efectuaron relevamientos de escritos e informes de las distintas actividades que también fueron fuentes de consulta. Además, se utilizaron como herramienta de análisis encuestas e informes elaborados por WIM Argentina entre febrero del 2022 y 2025.



Fig. 3. Trabajo de campo realizado en mina Gualcamayo (San Juan) en 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Minería, a pesar de ser llamada “Madre de Industrias”, es aún una actividad altamente masculinizada a nivel global, con todas las repercusiones que todo esto implica.

En el hacer de la actividad práctica aún se observa mucha desinformación en cuanto a la magnitud de la complejidad que conforma el mundo de esta industria. Se trabaja desandando muchos mitos sobre el agua o aspectos económicos y ambientales basados en una verdadera desinformación a la que están sometidas las comunidades; mayormente, posverdades.

Se evidencia que la participación laboral de la mujer ha crecido notablemente en Sudamérica en las últimas tres décadas, aunque en menor medida en países con creencias y tradiciones populares fuertemente arraigadas. Es por esta razón, que trabajar sobre la agenda 2030 de los ODS es una valiosa herramienta frente a esta realidad, que permite tener indicadores concretos para un correcto análisis. Entre 2017 y 2022, a pesar de la pandemia, donde se registró una baja laboral importante, el empleo femenino formal creció un 3,7%, lo que representó una incorporación de más de 1.700 mujeres a la industria minera nacional (WIM Argentina, 2022).

La inserción de la mujer en el ámbito laboral es un gran desafío a seguir afrontando por toda nuestra sociedad puesto que cuando el crecimiento personal de una mujer se concreta en torno a un trabajo de calidad, con normas que también garantizan las condiciones para su desarrollo profesional, el impacto se extiende directamente a todo el núcleo social que la rodea. Por ello, WIM, que cuenta con excelentes profesionales voluntarias, tiene como objetivos promocionar y apoyar el trabajo de la mujer en el sector minero, propiciando su incorporación en toda la cadena de valor de los proyectos de exploración y minas. Esta industria representa muchas veces la única oportunidad de inclusión laboral y crecimiento profesional para mujeres. El acercamiento de los proyectos mineros genera un intercambio de beneficio mutuo con la comunidad, trayendo oportunidades no solamente de trabajo sino de diferentes conocimientos y experiencias culturales.

De este análisis también se destaca otro punto que demanda atención, y es la permanencia y continuidad de la mujer a través del tiempo dentro de los diferentes proyectos mineros. Para ello se han tenido en cuenta múltiples variables, no solamente el relacionado con las competencias laborales. Un tópico recurrente que surgió en encuestas y entrevistas grupales presenciales es la responsabilidad ante la mirada social que implica muchas veces la maternidad, este prejuicio hace que muchas veces las mujeres abandonen sus puestos de trabajo aunque este realmente no sea su verdadero deseo (Figura 4).

De acuerdo al informe presentado por WIM Argentina y Poliarquía Consultores (op.cit.) se destaca que la tendencia de las oportunidades de empleo en el sector minero del país crecerá por los próximos 5 o 10 años. Sin embargo, se necesita seguir convocando y acompañando la formación de profesionales para la incorporación de personal de calidad a lo largo del territorio de nuestro país. Si bien se pondera la incorporación de las personas localizadas en cada provincia de pertenencia un alto porcentaje es convocado desde otros lugares. Córdoba, conocida por su calidad académica, es un espacio de referencia para estas convocatorias. Este in-

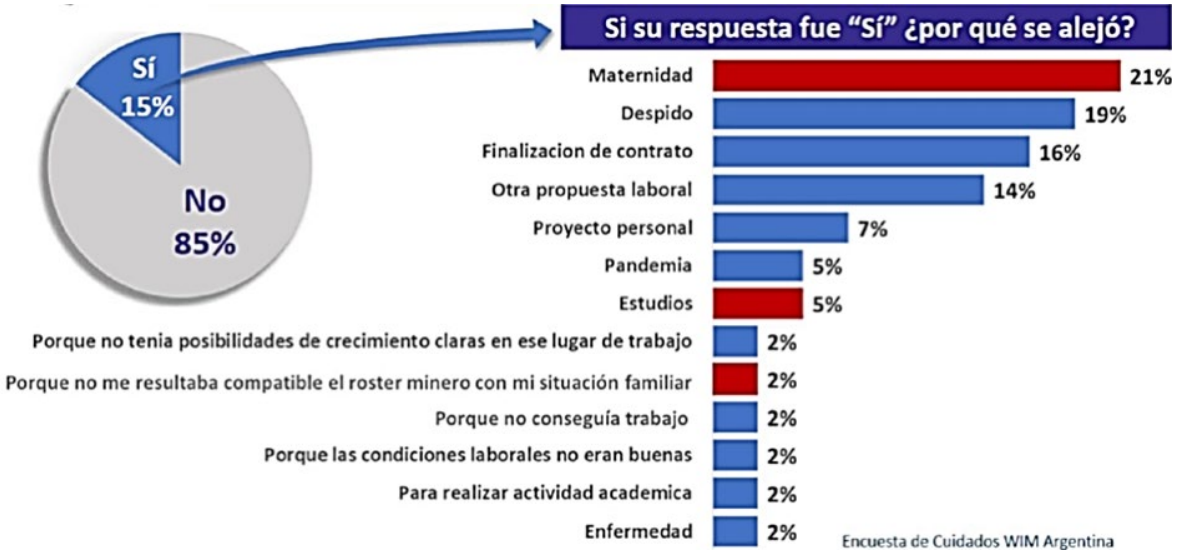


Fig. 4. Respuesta a "¿Ud. estuvo en la industria y en algún momento se alejó?" Base 310 encuestadas.

forme resalta además que: entre el 63% y 74% del total de encuestados hay una percepción de que no existe una oferta educativa suficiente para cubrir las necesidades actuales de la industria minera, que la distribución geográfica de los institutos o universidades no es adecuada y que la oferta de posgrados en minería no cubre las necesidades de capital humano formado del sector. La encuesta refleja además la necesidad de capacitación no solo en Inteligencia Artificial e Informática, sino en salud mental, contención emocional y psicología motivacional (Figura 5); siendo el desarrollo de estas competencias comprendidas en las "habilidades blandas", condiciones básicas para convivir con compañeros (muchas veces personas desconocidas) durante largos turnos de trabajo en condiciones de desarraigo, rigurosidad climática o altitudes superiores a los 3.000 m s.n.m.

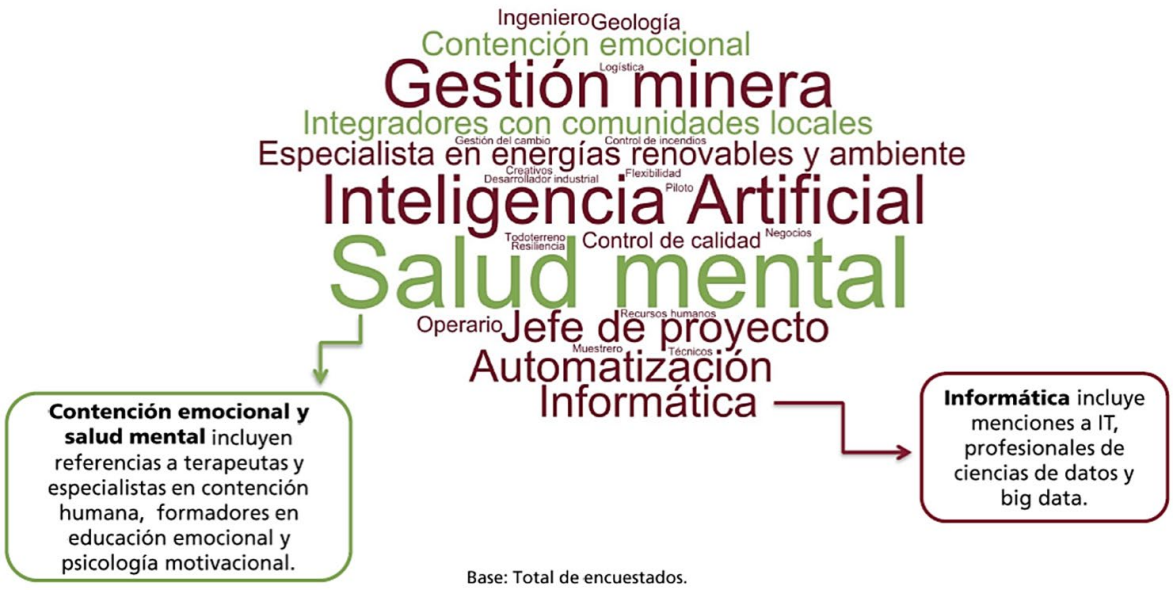


Fig. 5. Respuesta abierta sobre nuevos oficios y profesiones para el futuro de la industria minera.

Desde el comienzo del siglo pasado se pueden visualizar cambios sociales positivos de una manera más clara y acelerada, y grandes transformaciones en cuanto a la estructuración y dinámica de los sistemas familiares. Estas dinámicas implican un notable cambio en cuanto a la distribución de las responsabilidades y tareas de cuidado en el espacio familiar, impactando directamente en la estructuración del ámbito laboral. La representación social de la familia y sus correspondientes dinámicas traen el desafío de pensar nuevas estrategias: nuevos permisos, licencias por paternidad, creación de espacios como lactarios en el ámbito minero, por mencionar algunos ejemplos. Asimismo, dentro de los cambios culturales que atraviesa la sociedad, se registra cómo en el ámbito de la minería muchas mujeres que recientemente se incorporan a esta industria, deciden priorizar su carrera laboral y profesional sobre roles vinculados a la maternidad.

Jóvenes profesionales egresadas buscan en organizaciones como WIM el apoyo suficiente para poder trazar su plan de carrera,

siendo el mentoreo una de las estrategias que mayor desarrollo promociona para lograr el alcance del éxito (Figura 6). En conjunto con International WIM se crearon alianzas con otros países de Sudamérica ayudando así al intercambio con distintos profesionales sobre estrategias posibles para un desarrollo profesional de excelencia, con una visión amplia de las problemáticas de acuerdo a la idiosincrasia de la región.



Fig. 6. VII Programa de Mentoring Ed. Internacional WIM Perú 2025

La propuesta de trabajo que comprende la minería permite realizar una vinculación de manera única, teniendo el trabajo interdisciplinario un gran valor. WIM Argentina lleva a cabo distintos proyectos, que sumados al trabajo de campo, han agregado valor a todas las acciones que ya se venían realizando. Se resalta el trabajo en red, construyendo puentes entre diferentes espacios: público, privado y del Estado.

Desde la Psicología, junto a otras disciplinas como Comunicación Social, Trabajo social y Recursos Humanos se busca coconstruir distintas estrategias que faciliten y garanticen entornos laborales seguros, libres de violencia y espacios de contención, debido a que las principales barreras que obstaculizan la incorporación o retención de mujeres en minería son: la baja matrícula femenina en carreras STEM, la falta de liderazgo en puestos de toma de decisión y la articulación entre las tareas de cuidado como la crianza de los hijos o familiares y cuidado en el hogar. Representaciones sociales que antes impactaron sobre el "deber ser y deber hacer de la mujer" limitaron anteriormente la capacidad de acción y aggiornamiento a las nuevas dinámicas de conformación familiar que se pueden notar alrededor de todo el mundo: familias ensambladas, monoparentales, personas que deciden no *maternar* o *paternar*. Desde WIM entendemos que el abordaje sobre todos estos temas genera cambios trascendentales.

Cabe mencionar que la actividad minera en sí misma implica mucha demanda cognitiva y exigencia física al momento de realizar las tareas, más aún, teniendo en cuenta que los campamentos de exploración o las minas se hallan mayormente en zonas inhóspitas por su altitud, lejanía o condiciones climáticas. En la minería se presenta la característica de una dinámica de roster donde muchas veces las trabajadoras están 15 o 20 días en campamento y otros 15 o 10 días en sus vidas cotidianas en su lugar de origen, donde la dinámica tiene otra particularidad completamente diferente.

La consulta realizada por WIM Argentina y Consultora Insertarse (2023) sobre "¿Cómo describiría la posibilidad de tener hijos/personas a cargo y trabajar bajo régimen roster?" arrojó como resultados que el 57% de las trabajadoras lo consideran viable, pero para el 43% esta posibilidad se torna inviable. Esto es debido al condicionamiento social de poner a la mujer a cargo de la responsabilidad de la crianza viendo la posibilidad de que ella deje postergada su realización personal, como una opción necesaria. La falta de una construcción de redes de contención alrededor de estas trabajadoras termina repercutiendo en la continuidad de la actividad laboral.

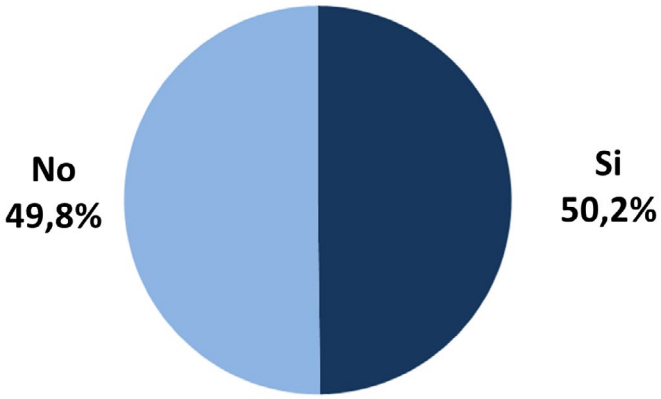


Fig. 7. ¿Tiene personas a cargo (menores, mayores o con algún tipo de dificultad que requiere su atención? (WIM et. al. 2023. Encuesta de Cuidados).

Uno de los focos de trabajo fue el concepto de "tareas de cuidado", referido al bienestar y desarrollo de las personas, en este sentido se hace referencia no solamente a la alimentación, la higiene, la atención y apoyo emocional como también actividades indirectas como puede ser la propia gestión del hogar (compras, limpieza, pagos de impuestos, entre otros). Estos cuidados son muy necesarios y demandan mucho tiempo, pero usualmente no son remunerados. Se ha monitoreado específicamente este tema (Figura 7) puesto que muchas personas tienen hijos o personas a cargo con una necesidad especial. Una particularidad que se destaca es que a veces las personas que trabajan en una mina con modalidad de roster, cuando retornan a sus hogares la demanda termina siendo muy alta, siendo este uno de los motivos para que la permanencia de la mujer en la industria minera sea menor que la de los varones.

Los trabajos de campo que se realizaron en diferentes proyectos mineros mostraron diversas realidades donde muchas mujeres se desempeñan de una manera destacada, poniendo su capacidad de adaptación física y emocional, sus conocimientos y habilidades al servicio de estos proyectos. Datos de WIM et al. (2023) indican que los principales sectores de desempeño son: geología, Ing. de minas, civil, química, industrial y ambiente; analista, asistente, contabilidad, recursos humanos, administración de empresas, compras, abogacía, higiene y seguridad, chofer, bromatología, comunicación, psicología, relaciones comunitarias, traducciones, relaciones públicas, sociología, geografía, laboratorio, trabajo social, marketing y perforaciones.

Tras la implementación de los talleres y encuentros que facilitaron el diálogo se observó un gran cambio en cuanto a la interacción y comunicación dentro y fuera de los espacios de trabajo. Conocer y escuchar desde la empatía sobre la realidad de las otras compañeras de equipo propició que los vínculos fueran más comprometidos, estables y solidarios.

En estos abordajes siempre surgieron necesidades de compartir y contactar empáticamente a través de la escucha activa con los otros compañeros de trabajo. De cada encuentro siempre se pudieron elaborar estrategias posibles para mejorar los espacios de trabajo a través del cumplimiento de las Buenas Prácticas. Generar espacios laborales donde los empleados puedan conversar sobre sus vivencias laborales tiene un impacto profundamente positivo en múltiples niveles, desde el bienestar individual hasta la productividad y el clima organizacional. Estos espacios, seguros, confidenciales y liderados de manera cuidada representan fuentes de aprendizaje, herramientas de cohesión y solidaridad.

CONCLUSIONES

Es necesario conocer más integralmente todo lo que implica la industria minera para el desarrollo y el crecimiento de la actividad laboral en nuestro país, e identificar las actividades relacionadas que permiten brindar calidad a nuestro hacer presente. La mujer puede tener un lugar protagónico en todo este movimiento de crecimiento.

Por ello, construir alianzas y redes que garanticen espacios seguros en cuanto a las condiciones de desarrollo laboral y académico, facilitarán esa proyección. En este sentido, la difusión y convocatoria de esta industria junto a un estrecho vínculo con espacios académicos promueve el desarrollo de trabajo de calidad.

Uno de los aspectos más destacados que resulta del relevamiento realizado fue la constatación de que es fundamental el hecho de contar con instituciones como WIM Argentina que den apoyo, sistematización y acompañamiento en la información que necesita ser socializada para lograr la inserción de la mujer en la Minería, y aporten a su continuidad laboral. En este sentido, generar documentación y reglamentos que organicen garantías en el ámbito laboral ha constituido un gran paso.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Sra. Celeste González, Lic. Mercedes Rodríguez, Lic. Jimena Barry, Geól. Tay Such y Dras. Ariana Carrazana y Karina Viñas, a Ernesto Cusianovich y Melina Patti, a Magistrali Consultores, IES 9-019 Mendoza, IAPG, y a la Secretaría de Minería de la Nación.

REFERENCIAS

WIM Argentina (2022). Evolución del empleo femenino registrado en la industria minera argentina. https://wim.ar/docs

WIM Argentina (2023). Empirismo de percepción sobre las violencias de género en la industria minera argentina. https://wim.ar/docs. Comité de Género, Diversidad e Inclusión.

WIM Argentina - Consultora Insertarse (2023). Encuesta de cuidados. https://wim.ar/docs

WIM Argentina - Ministerio de Economía Argentina. (2023). Guía de prevención y actuación ante violencias por razones de género. Secretaría de Minería. Guía de prevención y actuación ante violencias por razones de género | WIM Argentina | WIM Argentina

WIM Argentina - Poliarquía Consultores (2025). Desafíos y necesidades educativas y laborales en el sector minero argentino. https://wim.ar/docs

IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA INFRAYACENTE A ESCORIAS DE FUNDICIÓN, SAN ANTONIO OESTE, RIO NEGRO

Claudio Lexow[1,2], Leonardo E. Scherger[1,2], Nicolás Luna[1, 2]
[1]Dpto. de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina
[2]CGAMA (CIC-UNS), Bahía Blanca, Argentina
Mail de contacto: lexow@uns.edu.ar

RESUMEN

En San Antonio Oeste, Río Negro, funcionó, entre 1961 y 1984, una planta de tratamiento mineral, proveniente de la Mina Gonzalito, que generó importantes volúmenes de escorias de fundición, que fueron dispuestos sin control sobre el suelo. El objetivo del trabajo es determinar el grado de atenuación que generan las propiedades físicas y químicas de la zona no saturada (ZNS) sobre la movilidad de los metales en dos sitios de disposición. En el sitio "Estanciera", la capa de escoria medida fue de 50 cm, los sedimentos subyacentes presentaron una conductividad hidráulica saturada (Ks) de hasta 2,74 m/d y la capa freática se encontró a -1,90 m. En "Autódromo", el espesor de escoria fue de 15 a 50 cm, Ks de hasta 2,85 m/d y no se detectó la presencia del nivel freático hasta -3 m. En la ZNS de ambos sitios se identificaron precipitados de minerales secundarios. Verticalmente, Cd y Zn mostraron mayor movilidad que Cu, Fe y Pb. En ensayos de lixiviación de la escoria éstos mismos elementos también demuestran una mayor liberación, sugiriendo que los mecanismos de sorción y precipitación son menos eficientes para retenerlos. La baja liberación de Cu, Pb y Fe se asocia a su incorporación en minerales poco solubles.

Palabras clave: zona no saturada – metales – escorias fundición.

ABSTRACT

In San Antonio Oeste, Río Negro, a mineral processing smelter from the Gonzalito Mine operated between 1961 and 1984. It generated significant volumes of smelting slag, which were disposed of on the soil without any control. The objective of this study is to determine the degree of atten-uation that the physical and chemical properties of the vadose zone (VZ) have on the mobility of metals at two disposal sites. At the "Estanciera" site, the measured slag layer was 50 cm, the underlying sediments exhibited a saturated hydraulic conductivity (Ks) of up to 2.74 m/d, and the water table was found at 1.90 m. At the "Autódromo" site, the slag thickness ranged from 15 to 50 cm, with a Ks of up to 2.85 m/d, and the water table was not detected down to a depth of 3 m. In the VZ of both sites, secondary mineral precipitates were identified. Vertically, Cd and Zn showed greater mobility than Cu, Fe, and Pb. In slag leaching tests, these same elements also demonstrated a higher release, suggesting that sorption and precipitation mechanisms are less efficient at retaining them. The low release of Cu, Pb, and Fe is associated with their incorpora-tion into poorly soluble minerals.

Keywords: vadose zone – metal – smelting slag.

INTRODUCCIÓN

En 1961 la Empresa Geotécnica S.A. inicia en San Antonio Oeste (SAO) la construcción de una planta de fundición para procesar sulfuros metálicos extraídos de la mina Gonzalito, ubicada aproximadamente a 100 km de SAO. Las escorias del proceso se depositaban a cielo abierto sobre suelo desnudo en terrenos fiscales ubicados al O de la Localidad, en ese entonces, relativamente alejados de la planta urbana. A mediados de la década del '80 la empresa se declaró en quiebra y finalizó sus actividades, abandonando los depósitos en el estado en que se encontraban. Entre 1994 y 1995, la Fundación Patagonia Natural llevó a cabo un estudio para evaluar la contaminación por hidrocarburos y metales pesados a lo largo de la costa patagónica argentina. En particular, se registraron concentraciones muy elevadas de metales pesados en la Bahía de San Antonio, hasta tres veces superiores a las encontradas en el resto de los sitios. Bonuccelli et al. (2005) realizaron un estudio sobre la contaminación por metales pesados derivados de la lixiviación de escorias de fundición. Se identificaron tres depósitos de escorias, siendo el más significativo un sector de 25 ha denominado "Estanciera", con elevados valores de contaminación superficial. Se reveló la existencia de procesos de transporte y dispersión por acción del viento y de las lluvias. Posteriormente Gil et al. (2006) estudiaron la bioacumulación de metales en la biota local. Idaszkin et al. (2017) analizaron los procesos geoquímicos y la distribución de metales en sedimentos mareales superficiales, concluyendo que la zona adyacente a los depósitos es un entorno geoquímicamente activo que mitiga de forma natural la contaminación causada por el drenaje ácido.

Recientemente, Scherger et al. (2024a) analizaron los niveles de contaminación y la asociación mineralógica de metales pesa-

dos en la zona no saturada (ZNS). Scherger et al. (2024b) analizaron los procesos de fraccionamiento y lixiviación de metales de los residuos de fundición. Tras años de reclamos de la población, se llevó a cabo la remediación parcial de las zonas afectadas, que incluyó la excavación y extracción de escorias y sedimentos contaminados para su traslado ex situ a una celda de seguridad. Esta solución resultó ineficaz, ya que el volumen de material superó la capacidad de la celda diseñada. En el año 2023 se dio por finalizada la remediación del área urbana donde se ubicaba la planta de fundición. No obstante, aún quedan por remediar pilas de escoria situadas a escasa distancia de la población en los predios denominados “Estanciera” (Pila 2 o central) y “Autódromo”. La superficie afectada es de aproximadamente 5.400 m² y 3.500 m², respectivamente. El objetivo del presente trabajo es determinar el grado de atenuación que gene-ran las propiedades físicas y químicas de la ZNS sobre la movilidad de los metales en estos dos sitios de disposición.

Ubicación y características físicas del área de estudio

La ciudad de SAO (40°43’48”S; 64°56’20”O) se ubica al NE de la provincia de Río Negro, Argentina (Fig. 1). El clima es seco con escasa precipitación (293 mm para la serie 1991 – 2000), con una temperatura media anual de aproximadamente 15°C y temperaturas medias mensuales que varían entre 6 y 23 °C. Los afloramientos, descriptos en la Hoja Geológica 4166-II (Martínez et al. 2001), conforman arenas y gravas con variable participación de conchillas, agrupadas en la Formación San Antonio de edad holocena y de ambiente marino. Esta unidad se apoya en discordancia erosiva sobre los conglomerados arenosos con cemento calcáreo de la Formación Baliza San Matías de edad pleistocena. También se observan depósitos modernos de dunas, cordones litorales, planicies de marea, marismas y playas ubicados al S de SAO, y depósitos aluviales situados al N. En el subsuelo se encuentran los Rodados Patagónicos, también aflorantes, las areniscas de la Formación Río Negro (inferida) y la Formación Gran Bajo del Gualicho. La profundidad del nivel freático se encuentra entre 2 y 3 metros de profundidad, estableciéndose un flujo subterráneo local con descarga hacia los canales de marea. En la marisma superior, la vegetación se compone principalmente de *Spartina densiflora* y *Sarcocornia perennis*, coexistiendo con otros arbustos como *Limonium brasiliense* y *Atriplex* spp. en menor proporción (Idaszkin et al. 2017).



Fig. 1. Localización del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

En campo se recolectaron muestras (1 kg de peso) de la capa superficial (0-15 cm) para ca-racterizar la escoria de fundición. Para analizar las propiedades de la ZNS, se realizaron tres perforaciones en cada una de las pilas analizadas con barreno manual de hasta 300 cm de profundidad. El muestreo se interrumpió cuando se alcanzó el nivel freático, registrándose su profundidad. El agua subterránea se muestreó desde un piezómetro ubicado aguas abajo del sitio “Estanciera”. La infiltración en campo bajo condiciones de saturación se midió mediante el método del sondeo inverso. Se realizaron mediciones por triplicado para los intervalos de profundidad de 0-50 cm y 50-100 cm. El análisis granulométrico se realizó por tamizado en muestras seleccionadas de cada unidad sedimentológica reconocida en campo. Las muestras se prepararon para análisis químico y mineralógico. En primera instancia se secaron al aire a temperatura ambiente, se molieron y se pasaron por un tamiz para obtener la fracción < 2 mm. La digestión de sedimentos y de los residuos de fundición se realizaron según el método ISO 11466.3 que permite obtener concentracio-nes

pseudototales de metales pesados. Las concentraciones de Cd, Cu, Fe, Pb y Zn se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica de llama en un instrumento GBC Avanta 932. El pH (H_2O) se midió en una suspensión de sólido:líquido 1:2,5. La conductividad eléctrica (CE) se midió en una suspensión de sólido:líquido 1:5. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los sedimentos se determinó tras la saturación con acetato de sodio (pH 8,2) y la posterior extracción del Na intercambiable con una solución de acetato de amonio (pH 7). El carbono orgánico total (COT) se midió mediante combustión seca utilizando un analizador de carbono LECO CR-12 (modelo 781-600). El contenido de carbonatos (equivalente $\%CaCO_3$) se determinó en un calcímetro de Bernard modificado. La mineralogía se caracterizó utilizando una lupa binocular Schonfeld Op-tik y difracción de rayos X de polvo en un difractómetro Rigaku Geiger Flex Dmax III-C con monocromador de grafito. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y los espectros de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) se obtuvieron utilizando un microscopio EVO 40-XVP y un Oxford X-Max 50, respectivamente. Para estimar la lixiviación de metales desde la escoria de fundición se realizaron ensayos de liberación en "batch", utilizando una relación sólido:líquido 1:10, una solución de NaCl 0,1M a pH constante de 3, y un tiempo de reacción de 18 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lixiviación de metales de la escoria de fundición

El residuo de fundición es un material ácido con valores de pH entre 3,1 y 4,1. Las concentraciones de metales se encontraron en el orden Fe > Pb > Zn > Cu > Cd. Las mismas estuvieron en el rango entre 142.603 - 219.998 mg/kg Fe, 71.682 - 136.390 mg/kg Pb, 18.167 - 32.855 mg/kg Zn, 4.535 -12.399 mg/kg Cu, y 7 - 58 mg/kg Cd. La mineralogía de los residuos está compuesta principalmente por minerales de alteración como sulfatos secundarios (miembros de la familia de las jarositas (incluyendo, natrojarosita ($NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) y plumbojarosita ($PbFe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$)), anglesita ($PbSO_4$), yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), changoita ($Na_2Zn(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$), gunningita ($ZnSO_4 \cdot H_2O$)) y oxihidróxidos de Fe (magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3)). Los silicatos son subordinados (caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)). La asociación mineralógica observada en el residuo puede atribuirse a la meteorización de los sulfuros metálicos que constituían originalmente la mena, los cuales han sufrido una alteración significativa debido a décadas de exposición a condiciones atmosféricas (Idaszkin et al. 2017). De acuerdo con el ensayo de lixiviación, el Cd fue el elemento tóxico más móvil cuya liberación rondó entre el 21 - 71% del total. El Zn también mostró una liberación alta de entre el 13 - 25%. Cabe destacar que este metal fue el que presentó las mayores concentraciones solubles (media de 3.779 mg/kg), asociado a su incorporación en sulfatos eflorescentes. El resto de los metales presentó concentraciones solubles menores, entre 45 - 676 mg/kg para Cu y 19 - 143 mg/kg para Pb.

Caracterización de la ZNS

Las escorias de fundición fueron depositadas sobre sedimentos naturales en el sector supramareal, presentando espesores variables. En "Estanciera" rondó los 50 cm, mientras que en "Autódromo" el espesor varió entre 15 y 50 cm. Debajo de la escoria los sedimentos presentan un perfil granocreciente, las unidades reconocidas se detallan en la Tabla 1. En "Estanciera" se encuentran arenas y arenas gravosas hasta el primer metro que gradan a gravas arenosas en profundidad. En "Autódromo" la distribución es similar, pero se reconocen arenas fangosas con grava en el nivel superior. Predominan clastos de rocas volcánicas que pueden alcanzar hasta 3 - 4 cm en su eje mayor. Los granos de arena están constituidos principalmente por cuarzo y feldespatos (plagioclasa y ortosa), siendo menor la presencia de calcita y magnetita. En "Estanciera" es frecuente la aparición de fragmentos de conchillas en profundidad. En superficie también se encuentran restos bioclásticos con recubrimientos de malaquita ($Cu_2CO_3(OH)_2$) y azurita ($Cu_3(CO_3)_2(OH)$), indicativos de procesos de alteración secundaria. Similarmente, la presencia de yeso secundario en las muestras afectadas por drenaje ácido puede estar relacionada con la reacción del SO_4^{2-} con la calcita, lo que da lugar a la coprecipitación de oxihidróxidos de Fe. La presencia de minerales metalíferos precipitados en la superficie de minerales que forman la matriz de los sedimentos se detectó mediante la técnica SEM-EDS. Se observaron sulfatos secundarios de Pb (como, anglesita y plumbojarosita) y Zn y oxihidróxidos de Fe en forma de agregados y recubrimientos.

SITIO (N = 3)	PROFUNDIDAD (CM)	GRAVA (%)	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	PH	CE (MS/M)	COT(%)	$CACO_3$(%)	CIC (CMOL/KG)
"Estanciera"	50 – 100	6,8	85	6,9	1,3	5,9	4,7	0,40	0,51	9,7
	200 - 250	25	71	3,2	0,8	6,7	3,0	0,21	4,73	5,4
"Autódromo"	50 – 100	10	76	11	3,0	6,5	6,7	0,48	0,47	11,3
	200 - 250	52	48	-	-	6,2	1,7	0,11	0,45	2,8

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los niveles de la ZNS evaluados.

Los ensayos de infiltración para el nivel superficial (0-100 cm) en los sedimentos naturales de ambos sitios permitieron determinar que el medio poroso no saturado presenta alta permeabilidad. En "Estanciera" se determinó una conductividad saturada media (±ds) de 2,74 (±0,33) m/d para el intervalo de 0 - 50 cm y de 1,89 (±0,64) m/d para el intervalo de 50 - 100 cm. En "Autódromo" los valores determinados fueron de 1,21 (±0,21) m/d y 2,85 (±1,03) m/d, respectivamente. Esta condición hidráulica aumenta el riesgo de afectación del acuífero freático, especialmente en el predio "Estanciera", sitio en el cual el nivel freático fue detectado a

solo 190 cm de profundidad. El agua subterránea aguas debajo de las pilas presentó las siguientes características fisicoquímicas: pH de 7,2; CE de 48,3 mS/cm; 0,085 mg/l Cd; 0,099 mg/l Cu; 0,36 mg/l Fe; 0,49 mg/l Pb; 0,12 mg/l Zn.

Aunque el área presenta un régimen de precipitaciones que no supera los 300 mm, la lixiviación de metales al acuífero es un proceso que ocurrió en las últimas décadas. Sin embargo, el predominio de episodios de alta evaporación queda registrado en campo por la formación de costras salinas sobre la superficie de los depósitos de escoria (Scherger et al. 2024a). Estos minerales altamente solubles representan un potencial elevado de contaminación para el agua subterránea, especialmente durante el periodo de lluvias cuando se producen procesos de lavado (Scherger et al. 2024b). Las concentraciones medias de los metales en los pozos analizados se incluyen en la Tabla 2.

PROFUNDIDAD (CM)	"ESTANCIERA" (N=3)					"AUTÓDROMO" (N=3)				
	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
0 - 15	16	6.434	238.534	93.975	19.525	54	9.007	221.448	174.428	32.174
15 - 50	17	7.690	210.053	85.223	20.213	53	6.189	114.437	74.786	28.407
50 - 100	7,0	365	26.997	2.714	13.641	22	295	38.512	4.497	15.470
100 - 150	6,2	289	18.107	1.982	9.664	16	281	26.142	3.688	8.587
150 - 200	4,7	282	31.365	1.771	6.775	10	437	16.916	4.072	4.771
200 - 250	0,3	334	24.252	5.422	3.154	8,7	268	14.742	1.559	3.591
250 - 300	-	-	-	-	-	7,6	383	12.170	1.774	1.759

Tabla 2. Concentraciones medias (mg/kg) de metales en la ZNS de los sitios analizados.

En las capas más profundas correspondientes a los sedimentos naturales, las concentraciones de Fe, Pb y Cu disminuyeron de manera significativa en relación con las concentraciones de las escorias de fundición. Las concentraciones de Cu disminuyeron entre 94 y 97 % a profundidades superiores a 50 cm. En el caso del Fe, la disminución fue entre 83 y 93 %. Por último, las concentraciones de Pb fueron entre 95 y 98 % inferiores a las concentraciones en el residuo. Por el contrario, las concentraciones de Cd y Zn disminuyeron de manera más gradual con la profundidad. El Cd disminuyó de 56 % a 98 % y de 59 % a 84 % en "Estanciera" y "Autódromo", respectivamente. En el caso del Zn, la disminución en profundidad fue de 30 a 84 % en "Estanciera" y de 52 a 89 % en "Autódromo".

CONCLUSIONES

La ZNS subyacente a los depósitos de escoria juega un papel crucial en la atenuación de la contaminación por metales. Por un lado, la misma presenta una elevada conductividad hidráulica debido a su textura, que combinada a la escasa profundidad del nivel freático, genera un riesgo elevado, favoreciendo el transporte de metales disueltos hacia el acuífero. A pesar del riesgo hidráulico, las propiedades geoquímicas de los sedimentos son el principal factor de atenuación. La presencia de carbonatos representa el agente principal de neutralización de los lixiviados ácidos, induciendo cambios de pH que generan la precipitación de nuevas fases minerales secundarias. El Pb es inmovilizado de manera eficiente al ser incorporado en minerales secundarios muy poco solubles (plumbojarosita) y escasamente solubles (anglesita). El Fe precipita formando oxihidróxidos, que pueden incluir metales traza en su estructura y también favorecer los procesos de retención vía sorción. Sin embargo, el Cd y el Zn muestran una movilidad significativamente mayor, indicando que los mecanismos de sorción y precipitación son menos eficientes para retenerlos completamente, permitiendo su migración a mayores profundidades.

REFERENCIAS

Bonuccelli, R., Malan, J., Luna, L. I. y Torres, L. (2005). Contaminación por metales pesados derivados de la lixiviación de escorias de fundición San Antonio Oeste - Río Negro. Actas del Congreso Geológico Argentino de La Plata, Tomo IV, 1 - 8.

Gil, M. N., Torres, A., Harvey, M. y Esteves, J. L. (2006). Metales pesados en organismos marinos de la zona costera de la Patagonia Argentina continental. *Revista de Biologia Marina y Oceanografia*, 41(2), 167–176.

Idaszkin, Y. L., Carol, E., y Alvarez, M. del P. (2017). Mechanism of removal and retention of heavy metals from the acid mine drainage to coastal wetland in the Patagonian marsh. Chemosphere, 183, 361–370.

Martínez, H., Náñez, C., Lizuain, A., Dal Molin, C., Turel, A., Dalponte, M. y Faroux, A. (2001). Descripción de la Hoja Geológica 4166-II, San Antonio Oeste Provincia de Río Negro. SEGEMAR.

Scherger, L. E., Luengo, C. V., Lafont, D., Lexow, C. y Avena, M. J. (2024). Fractionation and leaching of Cd, Cu, Fe, Pb, and Zn from smelter residues of an old environmental liability in Argentina. Chemosphere, 364, 143019.

Scherger, L. E., Luengo, C. V., Zanello, V., Luna, N., Lexow, C. y Avena, M. J. (2024). Vertical distribution and contamination assessment of heavy metals in the vadose zone of a 50-year-old smelter dumpsite, San Antonio Bay, Argentina. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(2), 111954.

LA SOSTENIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN

Lenís Madsen[1,2], Claudina Di Martino[1,2,3]
[1]Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires - Universidad Nacional del Sur). San Juan 670 (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[2]Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Av. Alem 1253 - Cuerpo B´. Piso 2º (8000) Bahía Blanca, Argentina.
[3]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, Argentina.
Mail de contacto: lenismad@gmail.com

RESUMEN
La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible proyecta que el 83,5% de la población mundial vivirá en áreas urbanas para mediados de siglo, alcanzando en Argentina una urbanización del 94% (ONU, 2018). Este crecimiento urbano acelerado plantea desafíos significativos ya que ejerce una presión creciente sobre los recursos naturales no renovables, generando impactos negativos en los ecosistemas, la biodiversidad y la disponibilidad de suelos. Para ello es necesario implementar políticas de construcción sostenible, que contemplen el uso de materiales, la optimización de la eficiencia y durabilidad en las construcciones, el desarrollo de alternativas innovadoras, como así también la actualización de normas y códigos de la construcción. Este trabajo propone metodologías sostenibles basadas en análisis de flujo de materiales (AFM), mediante la creación de fichas metodológicas específicas para identificar el potencial de reutilización de agregados gruesos en distintas etapas del proceso constructivo y fomentar la reutilización eficiente del mismo. De esta manera se busca contribuir con la mitigación del impacto ambiental consecuente de las actividades constructivas y promover un desarrollo urbano sostenible, alineado con los objetivos de la Agenda 2030.

Palabras clave: sostenibilidad, agregado para hormigón, recursos naturales.

ABSTRACT
The 2030 Agenda for Sustainable Development projects that 83.5% of the world's population will live in urban areas by mid-century, with Argentina reaching 94% urbanization (UN, 2018). This accelerated urban growth poses significant challenges as it exerts increasing pressure on non-renewable natural resources, generating negative impacts on ecosystems, biodiversity, and land availability. To achieve this, it is necessary to implement sustainable construction policies that consider the use of materials, the optimization of efficiency and durability in buildings, the development of innovative alternatives, as well as the updating of construction standards and codes. This work proposes sustainable methodologies based on material flow analysis (MFA) by creating specific methodological sheets to identify the potential for reusing coarse aggregates at different stages of the construction process and promote their efficient reuse. This approach seeks to contribute to mitigating the environmental impact resulting from construction activities and promote sustainable urban development, aligned with the objectives of the 2030 Agenda.

Keywords: sustainability, concrete aggregate, natural resources.

INTRODUCCIÓN

En paralelo con el crecimiento urbano, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2019), estima que para 2060 se duplicará el consumo de materiales no metálicos, especialmente aquellos utilizados en la producción de hormigón. La explotación intensiva, de este recurso no renovable, puede generar impactos negativos en los ecosistemas, la biodiversidad y la disponibilidad de suelos. Ante esta problemática, es crucial adoptar enfoques sostenibles en la selección y el uso de agregados gruesos, promoviendo la implementación de políticas de construcción sostenible, que contemplen el uso de materiales reciclados, el desarrollo de alternativas innovadoras, como así también la actualización de normas y códigos de la construcción. La reutilización de agregados reciclados (AR) provenientes de la desmaterialización estructuras de hormigón, se presenta como una estrategia para fomentar ciudades resilientes, reducir la demanda de materiales vírgenes, minimizar la generación de residuos, impulsando una economía circular en el sector de la construcción.

El análisis de flujo de materiales (AFM), es una herramienta clave que permite cuantificar y rastrear materiales en el sistema constructivo, identificando oportunidades de mejora (Brunner y Rechberger, 2003). De lo mencionado anteriormente surge el objetivo de este trabajo, que propone metodologías sostenibles, mediante la elaboración de informes metodológicos que reflejen el potencial de reutilización del material en las diferentes etapas del proceso de producción alentando a la desmaterialización futura en obras de hormigón y fomentando la reutilización eficiente de agregados gruesos en obras de hormigón .De esta manera se busca contribuir con la mitigación del impacto ambiental consecuente de las actividades extractivas y promover un desarrollo urbano sostenible, alineado con los objetivos de la Agenda 2030.

MÉTODOS

La creciente necesidad de adoptar estrategias sostenibles en el sector de la construcción ha promovido la implementación de enfoques metodológicos que prioricen la reutilización de materiales y la reducción de residuos, con base en los beneficios que ofrece el AFM. En este contexto, la secuencia de fases presentada propone una estructura operativa para la gestión integral de materiales, apuntada hacia un modelo de desmaterialización, aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) y la transición hacia una economía circular. El elemento clave de esta propuesta es la creación de fichas metodológicas de los materiales, diseñadas para recopilar, sistematizar y evaluar la información técnica de los recursos empleados a lo largo del ciclo de vida del proyecto, aportando herramientas concretas para la toma de decisiones en políticas de construcción sostenible.

RESULTADOS

La fase inicial contempla una evaluación temprana del proyecto bajo un enfoque de ciclo de vida que permite identificar materiales y componentes con potencial de reutilización antes del inicio de la obra. Esta planificación anticipada facilita la integración temprana de criterios de desmaterialización desde la etapa de diseño y ejecución, promoviendo una visión sistémica que contempla el fin de vida útil de los elementos constructivos y su reinserción en nuevos ciclos productivos, basándose en una *gestión integral del proyecto*.

En la fase dos se elabora un plan detallado, técnico y progresivo para el desmontaje selectivo de los elementos constructivos. A través de un inventario técnico de componentes estructurales recuperables (figura 1), se anticipa la gestión de materiales en función de su reutilización o reciclaje, asegurando su separación eficiente durante las fases subsiguientes. Este modelo pone en contraste dos rutas críticas al final de la vida útil del hormigón: el *vertido directo*, que implica una pérdida de recursos y una alta carga ambiental o el reciclaje mediante *demolición selectiva*, que permite reincorporar materiales al circuito productivo. Esta planificación constituye una herramienta fundamental para minimizar la generación de residuos mixtos.

La tercera etapa de *desmaterialización y trazabilidad* es un eslabón clave, para una mayor valorización de los RCD. La demolición controlada se presenta como una estrategia fundamental para preservar la calidad de los materiales recuperables. Mediante la aplicación de técnicas dirigidas al desmontaje sin mezcla de componentes, se facilita la trazabilidad del material, permitiendo mantener su pureza y características técnicas. Asimismo, la separación en origen de los RCD resulta indispensable para incrementar su potencial de revalorización en etapas posteriores, dándoles una segunda vida. La desmaterialización implica utilizar menos material para ofrecer el mismo nivel de funcionalidad al usuario (Cleveland y Ruth, 1998).

Una vez separados, en la siguiente etapa, los residuos se clasifican según su naturaleza y propiedades técnicas, para luego ser sometidos a procesos de trituración, limpieza y procesamiento. Esta fase de gestión de RCD, apunta a la producción de agregados reciclados, especialmente en el caso de materiales pétreos, que pueden reincorporarse en nuevas mezclas de hormigón estructural o no estructural. La creación de *fichas metodológicas* durante estas etapas permitirá cuantificar el potencial de reutilización según el origen de los materiales, identificar barreras técnicas, normativas o logísticas y proponer líneas de acción para su valorización (figura 2).

El cierre del ciclo se manifiesta en la implementación de principios de *economía circular*, orientados a la reducción de residuos, el ahorro de costos por reutilización de materiales, la menor demanda de materiales vírgenes y la prolongación del ciclo de vida de

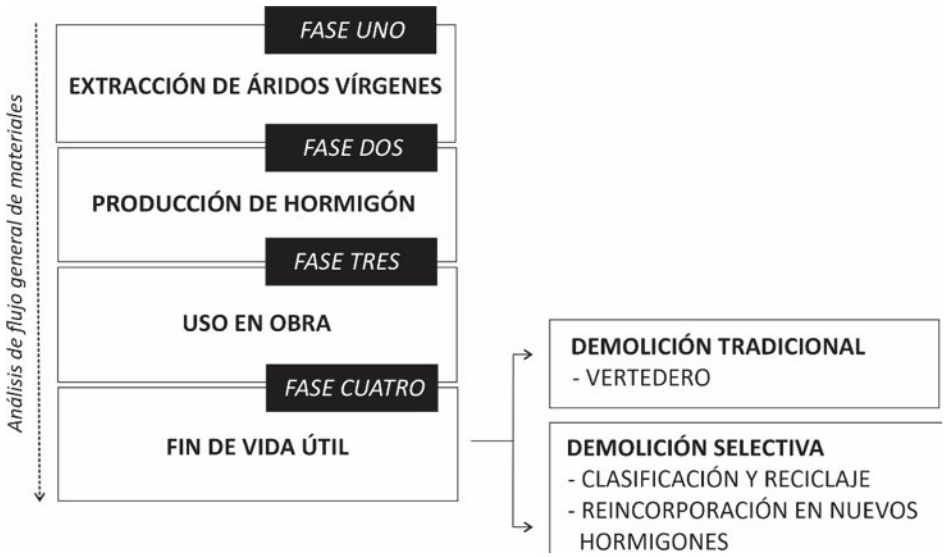


Fig. 1. Esquematización del análisis de flujo general de materiales.

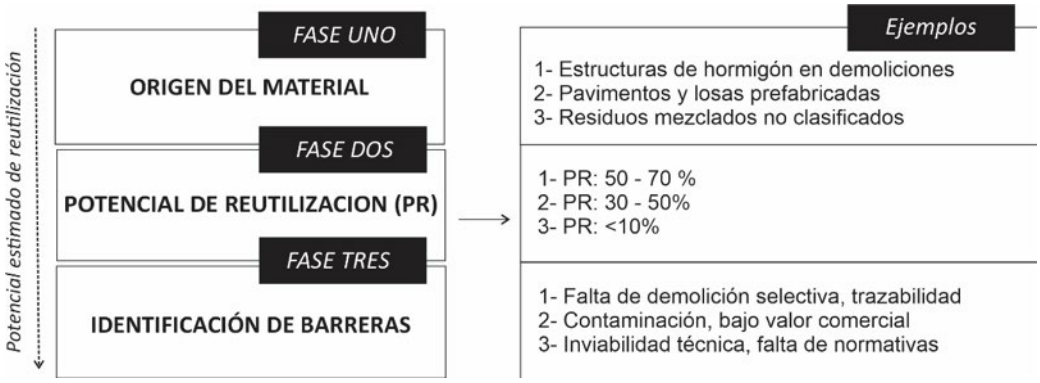


Fig. 2. Esquematización del potencial de reutilización según el origen

los recursos. Este enfoque permite establecer un modelo de construcción más resiliente y eficiente respecto al actual, alineado con los objetivos de desarrollo sostenible.

En la figura 3 se esquematiza la secuencia de fases metodológicas completa, diseñada para mostrar los detalles de un proyecto, desde la gestión integral de la obra hasta la trazabilidad de los materiales. A lo largo del proceso, se destaca el uso de *fichas metodológicas* como herramienta técnica fundamental. Estas fichas documentan, en distintas fases del proyecto, aspectos críticos de los materiales, tales como: tipo y volumen de hormigón utilizado, proveedores de cemento y agregados, Origen, requisitos normativos y características físico-mecánicas de los materiales (IRAM 1531), análisis de flujo de materiales y potencial de reutilización. Su aplicación contribuye a mejorar la trazabilidad de los materiales, optimizar la planificación de demoliciones selectivas y sistematizar criterios de decisión durante el diseño, la ejecución y el fin de vida del proyecto. Estas fichas permiten integrar conocimientos normativos y operativos que fortalecen la sostenibilidad del proceso constructivo.

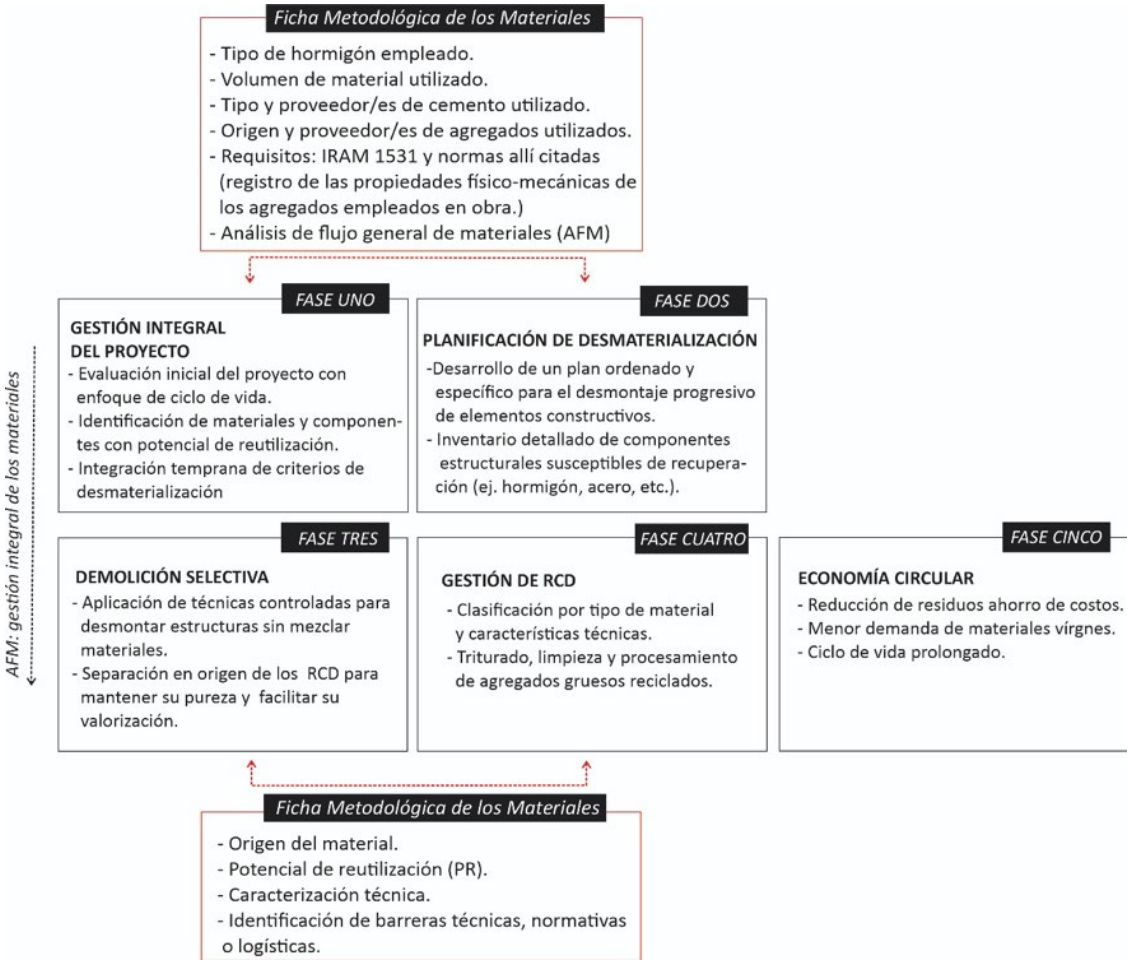


Fig. 3. Fases metodológicas para la gestión integral de los materiales, donde se destaca la elaboración de fichas metodológicas (recuadros rojos).

DISCUSIONES

En Argentina existe un marco normativo incipiente para el uso de áridos reciclados en hormigón y la gestión y valorización de los RCD, mencionada en los Objetivos de Desarrollo Sustentable 2030 (ODS 2030). Desde 2016 la Norma IRAM 1531 permite reemplazar hasta un 30 % del agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado (AGR) en hormigones hasta 30 MPa. Sin embargo, la implementación real es limitada, ya que los residuos de construcción y demolición (RCD) están considerados en general como parte de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y dispuestos en vertederos clandestinos o directamente en canteras abandonadas. Esto pone en evidencia la fuerte dependencia de materias primas vírgenes, lo que incrementa los impactos ambientales asociados a la extracción y transporte de áridos naturales, y acentúa la necesidad de mejorar la planificación y valorización de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Un estudio reciente aplicado al Área Metropolitana de Buenos Aires (Cordoba et al., 2023) cuantificó los flujos de hormigón listo para usar y sus materiales. Se estimó que para producir 2.604.862 m³ de hormigón se necesitan aproximadamente 7 Mt de materiales (entradas totales), de las cuales 99,1 % fueron materias primas vírgenes y sólo 0,9 % materias primas secundarias. Del total de materiales extraídos (~7 Mt), el 78,6 % correspondió a áridos (piedra triturada para agregados), de los cuales sólo el 6,3 % de los agregados gruesos utilizados en hormigón fueron reciclados, es decir, el 93,7 % restante fue árido primario. Este bajo porcentaje refleja la fuerte dependencia de recursos naturales vírgenes en el sector y la baja tase de reciclaje aun cuando la normativa permite un porcentaje mucho mayor.

Da Costa Reis y colaboradores (2019) estudiaron el impacto estimado del uso eficiente de materiales mediante AFM concluyendo que: la incorporación de AGR puede reducir el consumo de áridos vírgenes en un 8–12 %, lo que representa aproximadamente 0,3 t/m³. A su vez, la aplicación de desmaterialización en el diseño estructural, si bien para el hormigón es menor que en para los morteros (24%), reciclar áridos al final de su vida útil es fundamental para reducir la presión sobre las materias primas y mejorar la economía circular. Esto permitiría una reducción adicional del 5–10 % en la cantidad total de material empleado. Dichos resultados reflejan el potencial transformador de una gestión sistémica, como la plateada en este trabajo. A su vez, los mismos autores, afirman que el reciclaje planificado puede reducir los residuos enviados a disposición final hasta en un 40 %.

Sin embargo, dicho potencial de mitigación mediante el aumento de la eficiencia del uso de materiales en la industria del hormigón aún no se ha estimado. La mayor parte del agregado reciclado proviene de obras de demolición de pavimentos o cortes de hormigón específicos, y se emplean principalmente en bases y subbases de caminos (Sosa y Zega, 2023). Este uso en obras de baja calidad implica un infrarreciclaje o "*downcycling*"; se desaprovechan usos de mayor valor manteniendo así, la demanda de agregados vírgenes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La implementación de fichas metodológicas como herramienta para el Análisis del Flujo de Materiales representa un aporte significativo a la sostenibilidad en la construcción, al facilitar la trazabilidad de los materiales, optimizar la planificación de demoliciones selectivas y respaldar la toma de decisiones en políticas orientadas a la construcción sustentable.
- Las fichas metodológicas están especialmente dirigidas a organismos de control, entidades estatales, proyectistas y profesionales de la construcción, como instrumentos de consulta y planificación que favorezcan decisiones informadas en cada etapa del ciclo de vida de una obra
- A través del desarrollo de metodologías específicas, centradas en la reutilización de recursos, este trabajo aspira a sentar las bases para una industria constructiva comprometida con la economía circular y la preservación ambiental.
- La incorporación obligatoria de informes metodológicos previos al inicio de obras podría ser una herramienta clave para facilitar la futura desmaterialización de construcciones y el aprovechamiento de agregados reciclables, especialmente los gruesos destinados a hormigón.
- La elaboración y uso de fichas específicas para agregados permite separar y reciclar materiales de manera más eficiente, reduciendo tanto el impacto ambiental de los procesos de demolición como los costos asociados en el largo plazo.
- El reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición puede optimizarse significativamente si se contempla desde la etapa de diseño, con demoliciones selectivas planificadas que favorezcan la recuperación de materiales.
- Es esencial implementar políticas públicas enfocadas en la gestión integral de los Residuos de Construcción y Demolición, junto con el fortalecimiento de la infraestructura mediante el aumento del número de plantas de reciclaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CIC-UNS) y al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

Brunner, P.H., y Rechberger, H. (2003). Practical handbook of material flow analysis, 2da Edición. CRC, Boca Ratón, Fia. 43-68

Cleveland, C.J., y Ruth, M. (1998). Indicators of dematerialization and the materials intensity of use. Journal of industrial ecology, 2(3), 15-50.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL. (2017). Panorama multidimensional del desarrollo urbano en América Latina y el Caribe. Laetitia Montero, Johann García. https://www.cepal.org/es/publicaciones/41974-panorama-multidimensional-desarrollo-urbano-america-latinacaribe

Cordoba, G.P., Paulo, C.I., y Irassar, E.F. (2023). Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a la región metropolitana de Buenos Aires. Revista Hormigón, N°64: 5–23.

Da Costa Reis, D., Mack-Vergara, Y., y John, V M. (2019). Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. Journal of Industrial Ecology, 23(6), 1396-1409.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) (2012). Agregado grueso para hormigón de cemento - Requisitos, Cuarta edición, 28 pp.

ONU (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Online Edition.

Organisation for Economic Co-operation and Development, OCDE. (2019). Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental https://doi.org/gqs2wj

Sosa, M. E., y Zega, C. J. (2023). Gestión y valorización de agregados reciclados de hormigón en obras viales. Ciencia y Tecnología de los Materiales. N°13: 13pp

PROSPECCIONES CON GEORRADAR PARA LA DELIMITACIÓN DE ESTRUCTURAS ARQUEOLÓGICAS DEL PROYECTO CENTRO CULTURAL Y DE INTERPRETACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

German R. Molina[1], Bernabé R. Franchino[1], Víctor A. Rinaldi[2]
[1]Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.
[2]Laboratorio de Geotecnia, Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: rmolina@unc.edu.ar

RESUMEN
El Centro Cultural y de Interpretación de la Universidad Nacional de Córdoba, Paseo Córdoba de la Nueva Andalucía, se encuentra ubicado en el casco céntrico de la ciudad de Córdoba. En dicho centro se erigen dos construcciones de diferentes épocas: el antiguo Refectorio o comedor Jesuítico, que data del siglo XVII-XVIII, y un edificio del siglo XIX en donde funcionó el antiguo Instituto Técnico Universitario (ex ITU). Entre el año 2017 a 2021, mientras en lugar se encontraba en obra, por encargo de la Secretaría de Planeamiento Físico de la Universidad Nacional de Córdoba, se realizaron prospecciones con Georradar para constatar y delimitar estructuras de valor arqueológico. Las prospecciones se realizaron en diferentes etapas. La primera de ellas consistió en realizar prospecciones a nivel del terreno en el antiguo Refectorio Jesuítico, el edificio ex ITU y espacios aledaños. La segunda etapa consistió en prospecciones sobre calle Duarte Quirós, casi esquina calle Obispo Trejo. La tercera etapa consistió en prospecciones sobre los muros del antiguo Refectorio Jesuítico. Las prospecciones en la primera etapa permitieron determinar estructuras enterradas, que fueron luego excavadas y que hoy se exhiben en el centro cultural. Las prospecciones en la segunda etapa permitieron confirmar los indicios de muros que atravesaban la actual calle Duarte Quirós. Finalmente, la tercera etapa de prospecciones, permitieron dar indicios sobre la estructura de los muros del antiguo Refectorio Jesuítico.

Palabras clave: Georradar, Patrimonio Jesuita, Centro Cultural de la UNC.

ABSTRACT
The Cultural and Interpretation Center of the Universidad Nacional de Córdoba, located in the downtown area of Córdoba city, integrates two historic buildings: the old Jesuit Refectory (17th–18th centuries) and a 19th-century structure formerly occupied by the University Technical Institute (ITU). Between 2017 and 2021, during a period of site construction managed by the Secretaría de Planeamiento Físico de la Universidad Nacional de Córdoba, GPR surveys were conducted to identify and delineate subsurface structures of archaeological interest. The investigation was carried out in three stages. The first involved ground-level geophysical surveys within the old Jesuit Refectory, the former ITU building, and surrounding areas. These surveys revealed buried architectural elements that were later excavated and are now part of the site's public exhibition. The second stage focused on Duarte Quirós Street, near the corner of Obispo Trejo Street, where the surveys confirmed the presence of buried walls crossing beneath the current street layout. The third stage consisted of structural analysis through GPR on the vertical surfaces of the Jesuit Refectory's walls, providing valuable insights into the original construction techniques and wall composition.

Keywords: GPR, Jesuit Heritage, Culture Patrimonial UNC.

INTRODUCCIÓN

El Paseo Córdoba de la Nueva Andalucía es reconocido como bien patrimonial tanto a nivel municipal y nacional, como a nivel internacional por UNESCO, al incorporarse, en el año 2000, a la Lista de Patrimonio Mundial por su "valor universal excepcional".

En términos de historicidad, cabe destacar ciertos datos relevantes para la comprensión del estudio realizado: el Refectorio formó parte del Real Convictorio de Nuestra Señora de Monserrat, creado en 1687 y que luego se traslada a su emplazamiento actual en 1782. Su edificación se atribuye a los hermanos Andrés Bianchi o Blanqui (1677/1742) y Juan Bautista Prímoli (Malandrino, 2016).

Entre el año 2017 a 2021, mientras en lugar se encontraba en obra, por encargo de la Secretaría de Planeamiento Físico de la Universidad Nacional de Córdoba, se realizaron prospecciones con georradar para constatar y delimitar estructuras de valor arqueo-

lógico. El georradar o GPR (por sus siglas en ingles de Ground Penetrating Radar), puede considerarse actualmente como el sistema más versátil de aplicación entre los estudios relativamente superficiales como los requeridos en la Arqueología (usualmente menos de 10 m) (Annan, 1992; Daniels, 2004; Jol, 2009). Al ser un método de prospección no invasivo, se han obtenido interesantes resultados, sobre todo en la detección de estructuras soterradas correspondientes a sitios históricos (Daniels, 2004; Molina et al., 2008; Montes et al., 2012; Flores García, 2017).

En este trabajo se muestran los resultados relevantes obtenidos de las prospecciones realizadas con georradar en tres diferentes etapas, durante el periodo de obra y puesta en valor del Centro Cultural y de Interpretación de la Universidad Nacional de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron prospecciones con georradar en diferentes etapas. La primera de ellas consistió en realizar prospecciones a nivel del terreno en el antiguo Refectorio Jesuítico, el edificio ex ITU y espacios aledaños. La segunda etapa consistió en prospecciones sobre calle Duarte Quirós, casi esquina calle Obispo Trejo. La tercera etapa consistió en prospecciones sobre los muros del antiguo Refectorio Jesuítico (ver Fig. 1). Para ello se empleó un georradar modelo RAMAC/GPR de la firma MALÅ GeoScience con una antena blindada de un 1GHz y una antena no blindada de 200 MHz. La antena blindad de mayor frecuencia se utilizó en las etapas uno y tres, ya que se requería de mayor detalle o resolución, con el costo de tener menor profundidad de investigación. En la etapa dos se utilizó la antena no blindada de 200 MHz.



Fig. 1. Detalle de la ubicación y etapas de prospección con georradar realizados.



Fig. 2. a) Equipo de georradar utilizado. b) Antena no blindada de 200 MHz. c) Antena blindada de 1 GHz.

La profundidad de investigación del georradar, al igual que todos aquellos métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos, está limitado por la conductividad del terreno donde se realiza la prospección y el contraste de impedancias eléctricas que subyacen en el suelo. En muchos casos se pueden presentar suelos muy conductivos, como por ejemplo las arcillas y limos saturados. En tales circunstancias la penetración del GPR estaría limitada a algunos centímetros de profundidad (Rinaldi y Francisca, 2000; Daniels, 2004; Jol, 2009). Para nuestros estudios la profundidad máxima de investigación lograda fue de 6 metros, adoptando velocidades de propagación de onda electromagnética del medio entre 0,14 m/ns y 0,18 m/ns. Estas velocidades se eligen en función de las características del medio en cuanto a sus valores dieléctricos.

En la primera etapa (flechas de color azul) se prospectaron tres perfiles denominados P1, P2 y P3, en dirección Norte-Sur, en donde la profundidad de investigación fue de 6 m aproximadamente, con una resolución lograda del orden de los 0,1m. El perfil P1 tenía 22 m de longitud, el perfil P2 de 12 m de longitud y el perfil P3 de 8 m de longitud.

En la segunda etapa (flechas de color rojo), se prospectaron cuatro perfiles denominados P4, P5, P6 y P7, en dirección Este-Oeste, también con una profundidad aproximada de investigación de 6 m. Para este caso por haber utilizado una mayor frecuencia de antena, la resolución lograda fue del orden de los 0,2m. Los perfiles P4 y P5, tenían 39,5 m de longitud, mientras que los perfiles P6 y P7, tenían 13,20 m de longitud. Finalmente, en la última etapa (flechas de color verde) los perfiles prospectados se denominaron como P8 y P9, desarrollados en dirección Norte-Sur en dos de las paredes internas del antiguo Refectorio Jesuítico. Para este caso la profundidad de investigación configurada fue 2,5 m, con una resolución lograda del orden de los 0,08m. El perfil P8 tenía 11,20 m de longitud y el perfil P9 tenía 8,2 m de longitud.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cada una de las etapas ejecutadas se obtuvieron radargramas en los cuales se identificaron patrones de reflexión acordes a las geometrías esperables según los indicios arqueológicos previos al estudio. Las prospecciones en la primera etapa permitieron determinar estructuras enterradas, que fueron luego excavadas y que hoy se exhiben en el centro cultural. Las prospecciones en la segunda etapa permitieron confirmar los indicios de muros que atravesaban la actual calle Duarte Quirós. Finalmente, la tercera etapa de prospecciones, permitieron dar indicios sobre la estructura de los muros del antiguo Refectorio Jesuítico. Un ejemplo de los radargramas obtenidos de las prospecciones, es el que se muestra en la Fig. 3. Dicho radargrama corresponde al perfil prospectado

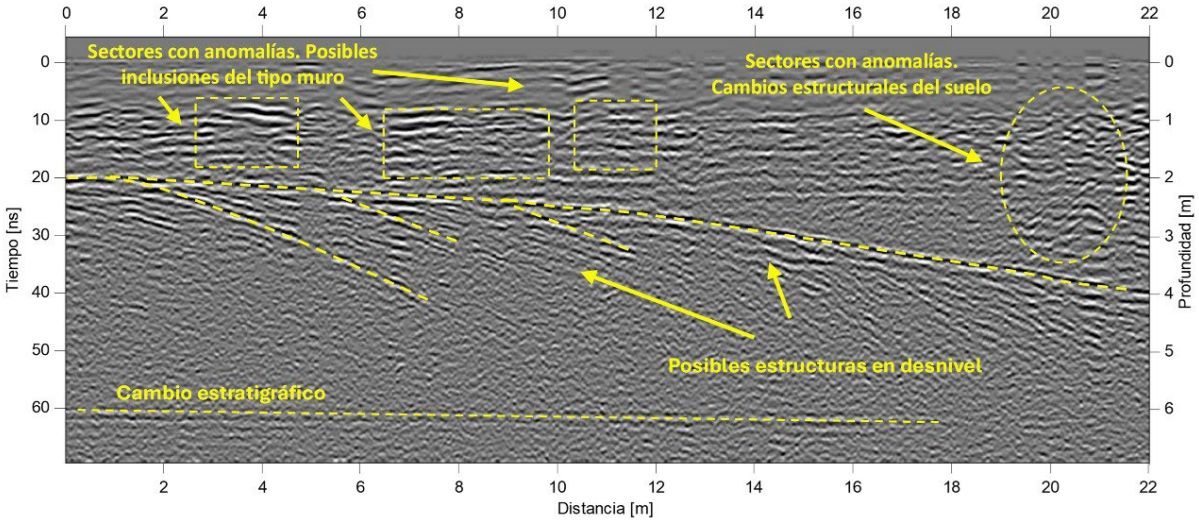


Fig. 3. Radargrama obtenido para el perfil prospectado P1 con la antena blindada de 1GHz.



Fig. 4. Imágenes de las estructuras arqueológicas desenterradas a partir de los resultados sugeridos por los perfiles prospectados con georradar P1 y P2.

P1. En dicho perfil se observan claramente cambios estratigráficos y sectores con anomalías, las cuales se interpretaron como cambios o discontinuidades estructurales del suelo, posibles inclusiones del tipo muro y posibles estructuras en desnivel. Las escalas de profundidades han sido estimadas con un margen de error de ± 15%.

En la Fig. 4 se muestran dos imágenes de las estructuras arqueológicas desenterradas, a partir de las interpretaciones sugeridas de los radargramas para los perfiles prospectados P1 y P2.

Finalmente, en la Fig. 5 se muestran aquellos resultados de mayor relevancia de todas las áreas prospectadas. Los Perfiles P4-P5 y P6-P7, presentaron patrones de reflexión similares, atribuibles a los muros enterrados que atraviesan calle Duarte Quirós. Para el caso del perfil P8-P9, se distinguieron claramente sectores con reflectores subparalelos compatibles con los cambios o discontinuidades de material en el muro. Se detectaron además sectores con anomalías del tipo “piedra bola” y sectores con posibles oquedades o de baja densidad material.

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostraron los resultados más significativos, de las prospecciones realizadas con georradar durante el periodo de obra y puesta en valor del Centro Cultural y de Interpretación de la Universidad Nacional de Córdoba. La manera en cómo se abordaron dichas prospecciones, permitieron cumplir con las necesidades planteadas por la Secretaría de Planeamiento Físico de la Universidad Nacional de Córdoba y Arqueólogos trabajando en el lugar.

A partir de las identificaciones e interpretaciones realizadas en los radargramas, se pudieron inferir estructuras atribuibles a muros enterrados, anomalías y cambios estructurales en el suelo. Estos datos fueron de utilidad, para el diseño de las excavaciones arqueológicas tanto para la primera y segunda etapa en las prospecciones.

En lo que respecta a la tercera etapa de las prospecciones, los resultados de los radargramas permitieron interpretar la configuración estructural de los muros del antiguo Refectorio Jesuítico y brindar información de valor a los Arqueólogos, para las tareas de restauración y puesta en valor de dicho lugar.

Se concluye, que tanto el equipo utilizado como las antenas seleccionadas, fueron adecuados para alcanzar niveles razonables de entendimiento e interpretación, como complemento a los trabajos desarrollados durante el periodo de obra y puesta en valor del Centro Cultural y de Interpretación de la Universidad Nacional de Córdoba.

REFERENCIAS

Annan, A. P., (2001). Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensor and Software Inc. Mississauga, Ontario, Canadá.

Daniels, David J., (2004). Ground Penetrating Radar - 2nd. Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Flores García, W. A., (2017). El radar de penetración terrestre como una herramienta de geofísica somera, aplicado a la exploración arqueológica. Revista Geofísica N°66, p. 77-93.

Jol, H. M., (2009). Ground Penetrating Radar Theory and Applications. First edition, Elsevier Science.

Malandrino, Melina (2016). El colegio Convictorio Nuestra Señora de Montserrat: arqueología y documentos históricos para su interpretación. Revista del Centro de Estudios de Arqueología Histórica, Año V. Vol. 5, 2016. oai:rephip.unr.edu.ar:2133/14920.

Molina, G. R., Clariá, J. J., Rinaldi, V. A. (2008). Procesamiento de Imágenes de Geo - Radar Obtenidas en Escenarios con Múltiples

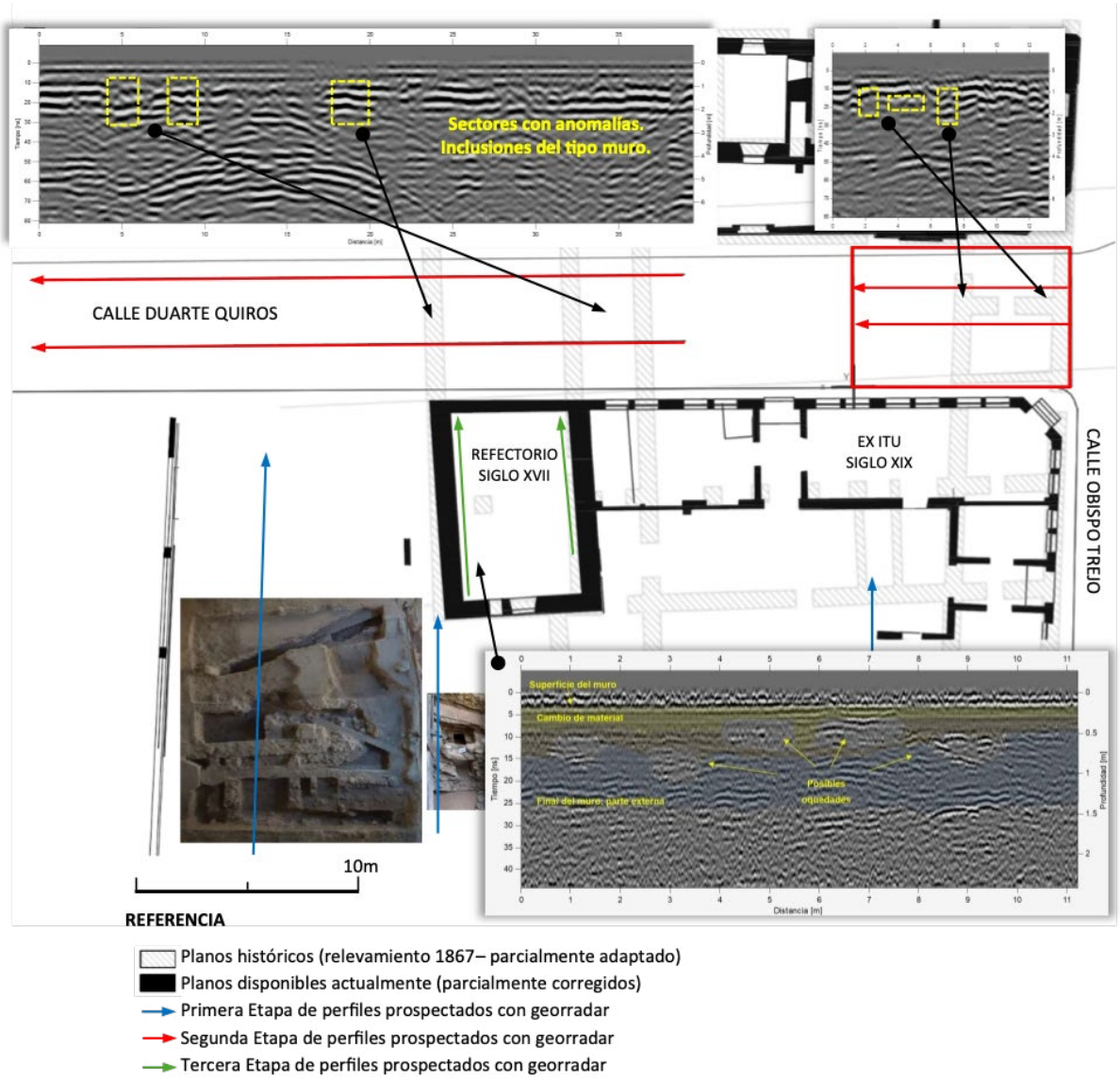


Fig. 5. Resultados notables en las etapas de prospección con georradar realizados.

Reflectantes Superficiales. XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, CAMSIG 2008, Octubre del 2008, La Plata, Argentina. DOI: 10.13140/2.1.3035.2644.

Montes, A., Salemme, M., Santiago, F., Guichón, R., 2012. Prospección con GPR (Ground Penetrating Radar) en el Cementerio de la Misión Salesiana, Río Grande, Tierra del Fuego, Argentina. Comechingonia, Revista Arqueológica N°16, primer semestre de 2012, 217 – 228, Córdoba.

Rinaldi, V. A. & Francisca, F. M., 2000. Dielectric Permittivity of Loess From the Central Area of Argentina. XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguazú, Brasil, Vol 1, pp. 209-216.

MODELOS DE LABORATORIO DE ACUÍFERO-ACUITARDO: ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT) TIME-LAPSE

Analía Olivera[1], Marcos Musso[2]
[1]Departamento de Ing. Geotécnica Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay.
[2]Departamento de Ing. Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay.
Mail de contacto: anaoliv.geo@gmail.com

RESUMEN
Se presentan los primeros resultados de la aplicación de Tomografía de Resistividad Eléctrica time-lapse (ERT time-lapse) en modelos de laboratorio para estudiar el comportamiento del agua en subsuelo, cuando existen fisuras en el suelo. Se elaboró un modelo de acuífero-acuitardo en una caja de acrílico utilizando una capa acuífera y una capa acuitarda. Se realizaron ERT usando el arreglo Wenner-Schlumberger previo a simular el proceso de infiltración en el pozo. Se fue agregando agua destilada en el pozo en diferentes tiempos y simultáneamente se fueron tomando medidas de ERT. En las tomografías se observan las grietas formadas y las variaciones de resistividad asociadas a la infiltración del agua a partir de cambios en los valores de resistividad y la tendencia a la formación de un bulbo. La técnica es adecuada, el proceso de inversión y el análisis de los resultados muestran claramente contrastes de resistividad con las zonas sin infiltración generándose un bulbo de menor resistividad aparente con respecto al entorno en la capa acuitarda.

Palabras clave: ERT, time-lapse, acuífero-acuitardo.

ABSTRACT
First results of application of time-lapse Electrical Resistivity Tomography (ERT-time lapse) in laboratory models to study the behavior of water in the subsoil when fissures exist are presented. An aquifer-aquitard model was developed in an acrylic box using an aquifer layer and an aquitard layer. ERTs were performed using the Wenner-Schlumberger array prior to simulating the water infiltration process within the well. Distilled water was added to the water well at different times, and ERTs measurements were taken simultaneously. In ERTs, fissures and variations in resistivity associated with water infiltration can be observed based on changes in resistivity values and the tendency for bulbs to form. The technique is appropriate, and the inversion process and analysis of the results clearly show contrasts in resistivity with areas without infiltration, generating a bulb of lower apparent resistivity respect to the surrounding area in the aquitard layer.

Keywords: ERT, time-lapse, aquifer-aquitard system

INTRODUCCIÓN

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), es una técnica geofísica que permite obtener imágenes del subsuelo a través de mediciones de resistividad eléctrica. Se utiliza principalmente en la prospección de agua subterránea y en la identificación de plumas de contaminación. Consiste en introducir una corriente eléctrica controlada por 2 electrodos (A y B), a partir de la línea de alimentación (creando un campo eléctrico artificial), determinando así la diferencia de potencial (V) originada por ese campo eléctrico en los electrodos M y N (líneas de recepción). Mover los electrodos ABMN y aumentar su separación entre ellos, permite crear un modelo 2D de la resistividad. Aplicando la ley de Ohm se determina la resistividad aparente (Ra), datos que se procesan empleando un programa de inversión, con el que se transforman las resistividades medidas a una distribución de las resistividades eléctricas en subsuperficie (Souza & Gandolfo, 2021).

La aplicación de ERT para identificar fisuras o grietas generadas en suelos y sedimentos arcillosos ha sido estudiada en Laboratorio. Samouelian et al. (2003) estudian la generación de fisuras en un bloque de suelo loéssico dejándolo secar al aire, y las detectan posteriormente con análisis de ERT. Sentenac & Zielinski (2009) realizaron el seguimiento de la génesis de fisuras en un estanque de acrílico, con arcilla compactada, combinando ERT y registro fotográfico. Los resultados en ERT ambos métodos fueron concordantes, mostrando la utilidad de la ERT para esta clase de investigaciones en modelos a escala. Jones et al. (2012) validan

este tipo de método logrando monitorear y mapear en 3 dimensiones (3D), usando ERT y registro fotográfico de propagación de las grietas de desecación.

Tsourlos et al (2007) utilizaron la técnica ERT en pozos para monitorear la infiltración de agua durante el proceso de recarga con agua de tratamiento de efluentes. Comina et al (2011) realizaron experiencias de medir el transporte de soluciones salinas usando ERT time-lapsed en laboratorio con suelos arcillosos y arenosos. La ERT time-lapse consiste en adquirir datos de resistividad tomados en un sitio en diferentes tiempos, para analizar variaciones en el período investigado. La técnica tiene aplicaciones ambientales, en la identificación de plumas de contaminación, así como en el estudio de recarga de acuíferos combinando con ensayos de infiltración, determinando si hay caminos preferenciales para el movimiento del agua.

En Uruguay desde hace varios años se estudia la recarga del acuífero Raigón a través de la Fm Libertad usando diferentes métodos como infiltración y prospección geofísica (Musso et al, 2019; Giménez et. al 2021,). El acuífero Raigón se asocia a la Fm. Raigón (Mioceno-Plioceno superior), compuesta por areniscas finas a conglomerádicas, mal seleccionadas, con estratificación cruzada y paralela, de color blanco amarillento, e intercalaciones de arcillas verdes. Parte de la unidad es cubierta por la Fm. Libertad, formada por sedimentos limo arcillosos y arcillosos de edad cuaternaria, con espesor de 5 m a 35 m identificados en perforaciones para captación de agua subterránea.

Osta et al. (2024), presentaron los primeros resultados de comparar modelos físicos de laboratorio con datos de campo. El modelo de laboratorio fue elaborado en 2 capas, una inferior compuesta por arenas simulando la Formación Raigón, y una superior de arcilla de la Formación Libertad. Dejaron secar y agrietar naturalmente la capa arcillosa. Mediante ERT buscaron identificar la presencia de fisuras en los suelos. Los autores afirman que el método aplicado en campo es robusto, obteniéndose resultados de las condiciones naturales que permiten interpretar claramente las fisuras en las imágenes ERT, sin embargo, en laboratorio, si bien el método es efectivo, los modelos deben construirse con ciertos requerimientos (homogeneidad, espesor, granulometría, humedad), para poder obtener mejores resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboró un modelo de acuífero-acuitardo en una caja de acrílico utilizando una capa acuífera de 10 cm de espesor compuesta de arena y una capa acuitarda de 15 cm conformada por suelos de la Formación Libertad (Figura 1b). Ambas capas fueron compactadas de manera manual utilizando el método de amasado.

Al suelo arcilloso se le realizó el análisis granulométrico (ASTM D422), se determinaron sus propiedades físicas tales como límites de Atterberg (límite plástico e índice de plasticidad ASTM D4318), y los parámetros de compactación mediante el ensayo de Proctor normal (ASTM D698). Se realizó clasificación de suelos por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS (ASTM D2487).

En el modelo, se colocaron 32 electrodos alineados separados 2 cm entre sí, y se realizaron grietas artificiales cada 10 cm (Figura 1a). La caja acrílica se dejó secar a temperatura ambiente. Por último, se perforó la capa acuitarda unos 4 cm en el centro de la línea de electrodos para simular un pozo.

En estas condiciones, se realizaron ERT según el arreglo Wenner-Schlumberger. Posteriormente, se fue agregando agua destilada en el pozo de manera permanente y se fueron tomando medidas de ERT cada media hora con un equipo GEOMATIVE GD-10. Los resultados se analizaron en el software RED2DINV.x64 ver.4.10.20 del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería-UdelaR. La última medida fue realizada pasado una hora de la anterior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis granulométrico realizado indica la presencia de limo 57,3%, arcilla 37,2% y en menor porcentaje arena 3,3%. De acuerdo con la clasificación SUCS, el suelo es arcilloso de alta plasticidad, con humedad óptima de compactación de 21,7% y peso unitario seco máximo de 15,7 kN/m^3.

En la Figura 2A y B, se observa la estructura del modelo físico antes y después de la exposición a temperatura ambiente. Como puede verse, las grietas se agrandaron, alcanzando el centímetro de abertura, luego de los 50 días de exposición. La primera medida de ERT, corresponde a la tomada en el modelo sin agregar agua en el pozo (Ver Figura 2C). Los valores altos de resistividad mostrados en las inversiones se atribuyen a las fisuras formadas en la capa arcillosa.

En la zona del pozo, los valores de resistividades se encuentran en el entorno de 120 ohm/m antes de comenzar el ensayo. Una vez iniciado el mismo, en la zona del pozo de infiltración, los valores disminuyen a menos de 50 ohm/m. En cambio, en las otras zonas del modelo, las resistividades permanecen constantes. Este efecto de decrecimiento de la resistividad es atribuible a la infil-

SUELO	LL (%)	IP (%)	SUCS	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	PESO UNITARIO SECO MÁX. (KN/M3)
CSIC-RA	59	39	CH	21,7	15,7

Tabla 1. Propiedades del suelo CSIC-RA-3 (Límites de Atterberg, clasificación, proctor).



Figura 1. A) Fisuras elaboradas. B) Modelo en dos capas.

tración de agua. Se puede identificar, a su vez, la tendencia a la formación de un bulbo, mostrando como se mueve el agua en este modelo, por la disminución de las resistividades en los alrededores del pozo de infiltración.

CONCLUSIONES

Los modelos físicos de laboratorio permiten tener un seguimiento controlado de la génesis de las grietas, un registro fotográfico de las mismas, así como del comportamiento del agua en el proceso de infiltración, detectadas por las mediciones de ERT, lo cual permite analizar las facilidades y dificultades que tiene la técnica aplicada en modelos a escala.

Los resultados obtenidos permiten entender el proceso de infiltración de agua en laboratorio, visualizado por medio de imágenes de resistividades permitiendo generar un modelo conceptual del proceso que ocurriría en campo, el cual debe ser construido con ensayos “in situ”.

AGRADECIMIENTOS

A los colegas de Grupo de Hidrología Subterránea (GHS) de la Facultad de Ingeniería por ceder el equipo de resistividad eléctrica.

REFERENCIAS

ASTM (1988). Standart methods D422, D698, D2487, D4318. Annual Book of Standards – Soil and Rock, Building Stones, Section 4, V.04.08, ASTM Publication, Philadelphia, USA.

Comina C.; Cosentini R.M; Della Vecchia G.; Foti S.; Musso G (2011). 3D-electrical resistivity tomography monitoring of salt transport in homogeneous and layered soil samples. In: *ACTA GEOTECHNICA*. ISSN 1861-1125. STAMPA. -6:4, pp. 195-203. [10.1007/s11440-011-0146-3].

Geotomo Software (2004). RES2DINV ver. 3.54. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least square method.

Gimenez, M. Agustín Menta, Julián Ramos, Marcos Musso y Alfonso Flaquer (2021) Aplicación de métodos geofísicos al estudio del sistema hidrogeológico Libertad Raigón de Uruguay. Boletín Geológico y Minero, 132 (1): 193-206 ISSN: 0366-0176. DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1.005.

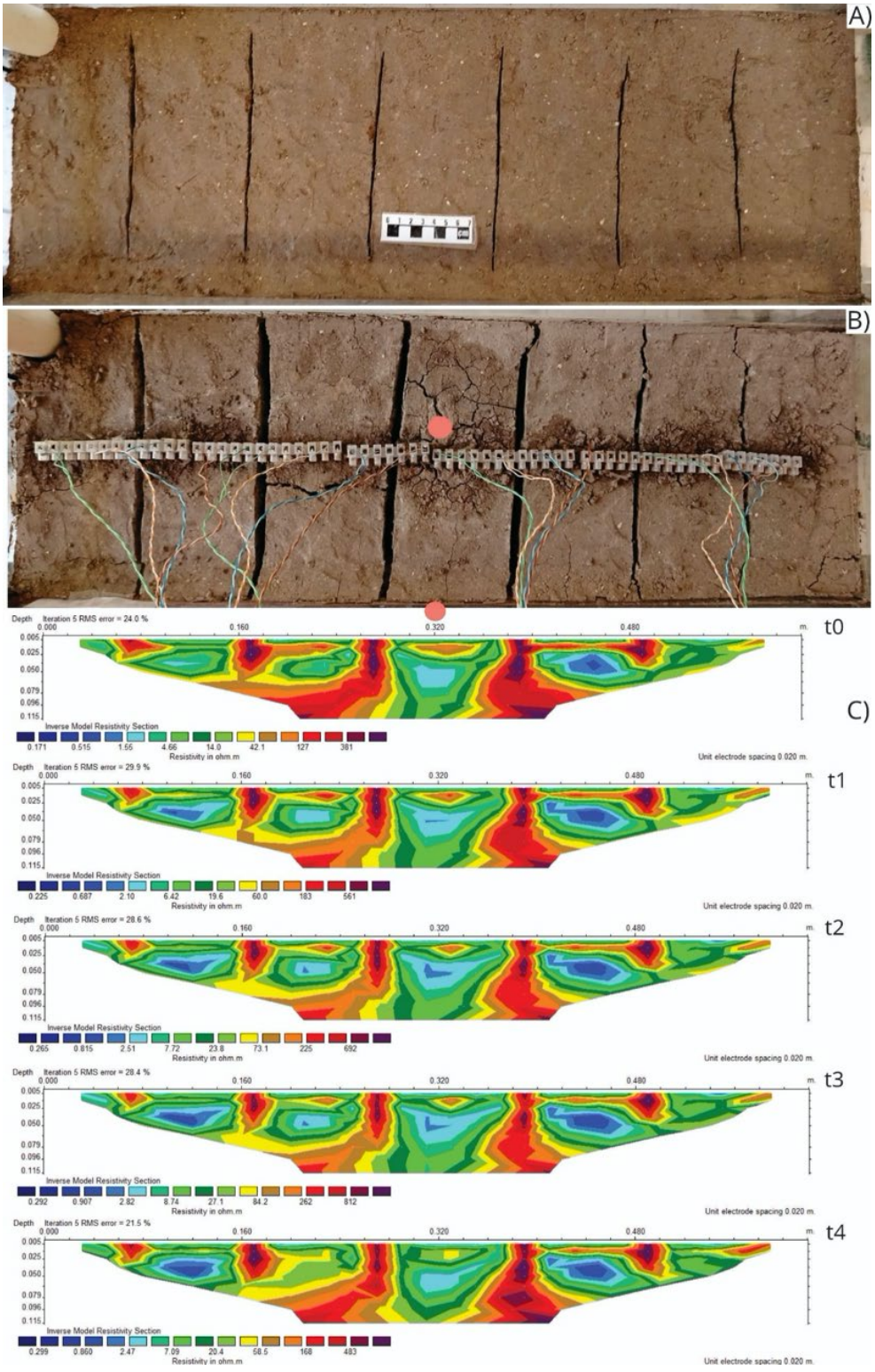


Figura 2. A) Fisuras elaboradas al construir el modelo B) Estructura del modelo a los 50 días de exposición. C) Inversiones en diferentes tiempos. La primera imagen corresponde a la medida antes de colocar agua. La ubicación del pozo se indica con el círculo.

Jones, Gareth and Zielinski, Marcin and Sentenac, Phillippe (2012) Mapping of desiccation fissures in flood embankments using 3D electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 84 (Septem). pp.39-51. ISSN 0926-9851.

Musso et al. (2019) Conductividad Hidráulica en Campo y Laboratorio: Desempeño de Suelos Finos en Aplicación Ambiental. XVI Panamerican Congress Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cancún, Mexico, noviembre 2019.

Osta, Bruno; Olivera, Analía; Musso, Marcos (2024): Tomografía de resistividad eléctrica en modelos de laboratorio y ensayos de

campo: dificultades y desafíos. XII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul- GEORS 2024. 23 e 24 de maio - Rio Grande – RS.

Samouelian, Anatja; Guy Richard, Isabelle Cousin, Alain Tabbagh, Ary Bruand (2003). Can electrical resistivity tomography describe soil structure evolution?. *16th Triennial Conference of the ISTRO*, 2003, Brisbane, Australia. 2003, 13-18 juillet 2003. hal-00079716.

Sentenac, P. and Zielinski, M. (2009). Clay fine fissuring monitoring using miniature geo-electrical resistivity arrays. *Environmental Earth Sciences*, 59 (1). pp. 205-214. ISSN 1866-6280.

Souza, L & Gandolfo, O (2023): Geofísica aplicada á geología de engenharia e medio ambiente: manual de boas prácticas. 1 Ed.-Sao Paulo:ABGE, 2021. ISBN 978-65-88460-02-3.

Tsourlos, P et al. (2007) Monitoring water injection with borehole ERT: preliminary results of an experiment carried out in Sindos (N. Greece).

APORTE METODOLÓGICO A LA DEFINICIÓN DE LA COMPETENCIA Y LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE EXPLOTACIONES MINERAS EN FAJAS FLUVIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ASPECTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS BÁSICOS A TENER EN CUENTA

David H. Palacio[1], Pedro A. Ventre[1], Rocío E. Cañas[1], Nicolas R. Nimis[1], Priscila M. Vizuara[1], Galo J. Palma[1], Marcelo H. Micca[1], María José Etcheverry Aldonza[1]

[1]Secretaría de Minería -Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica, Av. Hipólito Yrigoyen 401, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: davidhpalacio@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo aborda la problemática ambiental asociada a la minería de áridos de tercera categoría, centrada en la extracción de arenas y gravas en depósitos fluviales y paleocanales (detríticas), tomando como caso de estudio el entorno inmediato de la localidad de Despeñaderos, Córdoba. La cercanía de estos yacimientos a centros urbanos les confiere un valor estratégico para la industria de la construcción, pero también genera desafíos ambientales, especialmente en recursos hídricos y ordenamiento territorial. La actividad extractiva afecta las condiciones hidrodinámicas e hidroquímicas de aguas superficiales y subterráneas, requiriendo una gestión adecuada para mitigar impactos.

A nivel normativo, tanto la legislación nacional como provincial exige medidas de restauración y mitigación ambiental, supervisadas por organismos competentes. Sin embargo, la superposición de competencias puede prolongar los plazos de realización de las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA). Este estudio destaca la importancia de incorporar criterios técnicos y ambientales en las EIA, priorizando la identificación de actores responsables y el uso de información hidrogeomorfológica e hidrogeológica básica para mejorar la precisión de las evaluaciones.

Asimismo, se analiza el marco normativo en Córdoba y el rol de la Secretaría de Minería en la gestión ambiental de estas actividades. El trabajo busca contribuir al ordenamiento integral de la actividad minera, promoviendo un enfoque que articule el desarrollo productivo con la sostenibilidad ambiental, garantizando una explotación responsable de los recursos naturales.

Palabras clave: minería, áridos, impacto ambiental, recursos hídricos.

ABSTRACT

This work addresses the environmental issues associated with the extraction of third category construction aggregates, focusing on the mining of sand and gravel from fluvial and paleochannel (detrial) deposits, using the immediate surroundings of Despeñaderos, Córdoba, as a case study. The proximity of these deposits to urban centers gives them strategic value for the construction industry, but also presents environmental challenges, particularly concerning water resources and land-use planning. Extractive activities impact the hydrodynamic and hydrochemical conditions of both surface and groundwater systems, requiring proper management to mitigate these effects.

At the regulatory level, both national and provincial legislation mandate environmental mitigation and restoration measures, under the supervision of competent authorities. However, overlapping jurisdictions can delay the completion of Environmental Impact Assessments (EIA). This study highlights the importance of integrating technical and environmental criteria into EIAs, with an emphasis on identifying responsible stakeholders and incorporating basic hydrogeomorphological and hydrogeological information to improve assessment accuracy.

The work also analyzes the regulatory framework in Córdoba Province and the role of the Mining Secretariat in the environmental management of these activities. The aim is to contribute to the integrated planning of mining operations, promoting an approach that balances productive development with environmental sustainability, and ensuring the responsible exploitation of natural resources.

Keywords: sand and gravel mining, environmental impact, water resources

INTRODUCCIÓN

La explotación de áridos de tercera categoría, fundamentalmente arenas y gravas detríticas de origen fluvial, cumple un rol estratégico en el desarrollo urbano y la infraestructura del Gran Córdoba y localidades circundantes. Estos materiales provienen de ambientes fluviales actuales y paleocanales, ubicados en terrazas y planicies de inundación. La zona de Despeñaderos donde se focaliza este estudio (ver Figura 1), se destaca como uno de los principales ámbitos geológicos proveedores de áridos para la región del Gran Córdoba.

El proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para las denominadas "canteras secas" localizadas fuera de la línea de ribera (límite entre el dominio público y el privado) puede requerir, de acuerdo a su situación geomorfológica, la intervención coordinada de diversos organismos provinciales (Secretaría de Minería, Ministerio de Ambiente, Administración Provincial de Recursos Hídricos - APRHI), generando en algunos casos superposición de competencias y demoras.

La explotación de estos recursos naturales, si bien técnicamente es sencilla, plantea importantes desafíos ambientales, especialmente en relación con la afectación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Debido a su génesis, la ubicación de los yacimientos en terrazas y llanuras de inundación de ríos implica una interacción directa con el entorno hidrogeológico, lo que exige una adecuada gestión ambiental y el cumplimiento del marco normativo vigente.

El presente trabajo tiene por objetivo proponer una metodología integrada y operativa para la identificación y gestión de impactos ambientales hacia los recursos hídricos; basada en el conocimiento del marco hidrogeomorfológico e hidrogeológico, destinada a anticipar los escenarios de afectación ambiental, optimizar los tiempos de evaluación, delimitar competencias institucionales y fortalecer la gestión sostenible de estos recursos estratégicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla a partir de un caso piloto representativo, seleccionado por sus condiciones minero-ambientales típicas dentro del contexto provincial de Córdoba, con el objetivo de proponer criterios extrapolables a otras zonas de explotación minera de áridos.

La caracterización inicial del área de estudio se basó en:

- Revisión bibliográfica, que abarcó antecedentes geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y experiencias comparadas de evaluaciones ambientales en minería de áridos.
- Relevamientos de campo, orientados a ajustar el modelo hidrogeológico, identificar aspectos críticos del entorno geológico y validar datos de gabinete.
- Identificación y delimitación de unidades hidrogeomorfológicas, esenciales para vincular los procesos extractivos con el sistema hidrológico superficial y subterráneo.

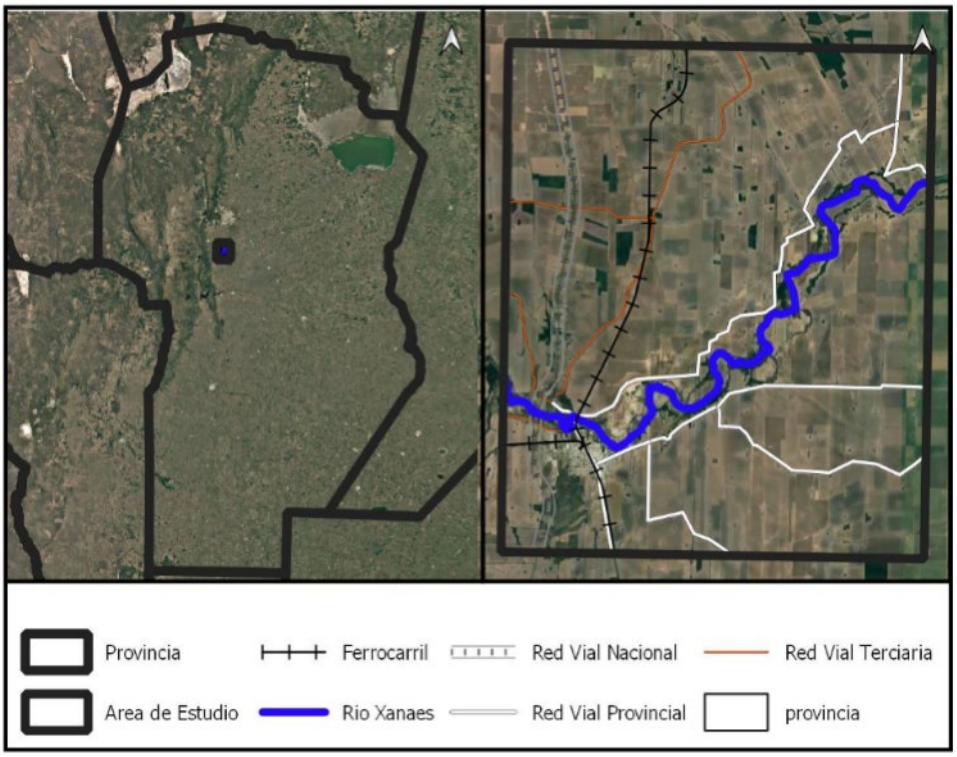


Fig. 1. Ubicación del área de estudio

La estrategia metodológica combinó tres ejes complementarios:

1.Fundamentación conceptual y técnica. En base a un análisis detallado de la bibliografía técnica disponible a nivel nacional e internacional, orientado a establecer un marco conceptual sólido y operativo que sustente los criterios de evaluación ambiental aplicables a explotaciones de áridos en ambientes fluviales.

2.Análisis técnico-normativo. Mediante examen del marco jurídico vigente en la provincia de Córdoba y nación, particularmente la

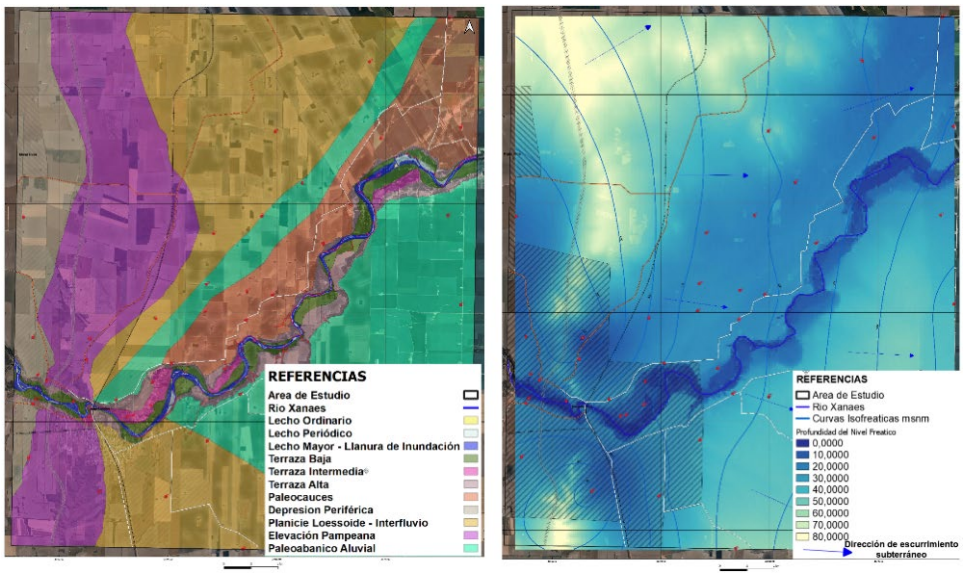


Fig. 2. Mapas: hidrogeomorfológico (izquierda). Isofreático e isoprofundidad (derecha).

normativa minera y ambiental, y el Código de Aguas (Ley 5589), con especial énfasis en su aplicación práctica dentro del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de canteras secas. Este análisis permitió interpretar de manera integrada los alcances y competencias de los distintos organismos intervinientes.

3.Sistematización de criterios operativos. En base a la recopilación y normalización de los principales criterios de evaluación ya aplicados por la Secretaría de Minería en dictámenes técnicos precedentes, identificando prácticas efectivas, debilidades recurrentes y oportunidades de estandarización. Esta sistematización sirvió como base para diseñar un procedimiento metodológico claro, repetible y técnicamente válido para la gestión ambiental de los emprendimientos analizados.

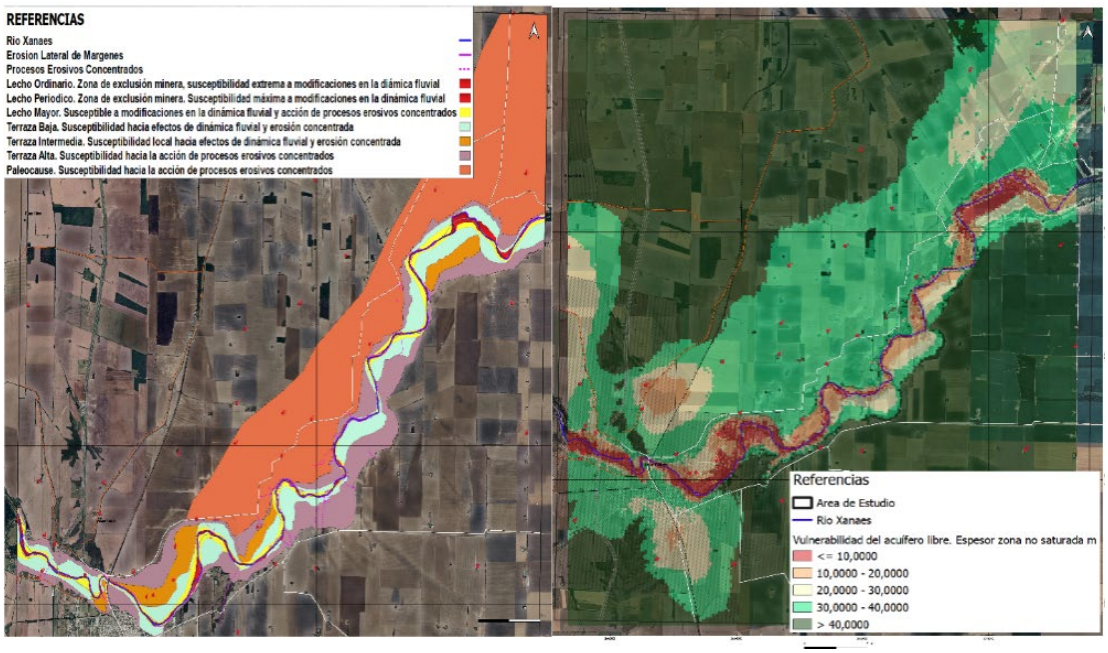


Fig. 3. Mapas resultantes: Susceptibilidad de afectación del recurso hídrico superficial (izquierda) y vulnerabilidad del sistema subterráneo (derecha).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología permitió establecer un modelo de análisis basado en interpretaciones hidrogeomorfológicas e hidrogeológicas, que facilitan la evaluación ambiental de las explotaciones mineras de áridos en el área de estudio, permitiendo su extrapolación a otros emprendimientos de similares características.

En primer término, se definieron con precisión las unidades hidrogeomorfológicas (Figura 2), fundamentales para evaluar la interacción con el sistema fluvial y determinar competencias administrativas. A través del análisis de Modelos Digitales de Elevación (MDE), imágenes satelitales, fotografías aéreas, perfiles de elevación y chequeos de campo, se delimitaron los componentes de la llanura aluvial: lecho ordinario (cauce activo), lecho periódico (áreas inundadas por crecidas frecuentes), lecho mayor o episódico (áreas afectadas por eventos extraordinarios), y los distintos niveles de terrazas fluviales (alta, intermedia y baja). Esta cartografía hidrogeomorfológica, elaborada en software SIG (QGIS), incluyó también la red de drenaje superficial, paleocauces, interfluvios, procesos erosivos y márgenes inestables.

A nivel hidrogeológico, se definieron condiciones hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero libre; en base al procesamiento de datos provenientes de censos de pozos y perforaciones, que determinaron profundidad y conductividad eléctrica del acuífero libre. Los mapas isofreáticos y de isoprofundidad (Figura 2) permitieron representar el comportamiento del acuífero libre y el espesor de la zona no saturada.

A partir de la información integrada y el modelo conceptual generado, se procedió a la evaluación de la susceptibilidad hídrica superficial y la vulnerabilidad del acuífero libre (Figura 3) por acción de la actividad minera. En el caso del recurso superficial, se clasificaron las unidades hidrogeomorfológicas en niveles de susceptibilidad extrema, alta, media y baja, atendiendo a factores como movilidad de cauces, erosión de márgenes, escurrimiento superficial y acción de procesos erosivos concentrados. Se identificaron zonas críticas (lecho menor, llanura de inundación) con alta sensibilidad, estableciendo áreas de exclusión o necesidad de autorizaciones específicas por parte de APRHI.

Para el recurso subterráneo, la vulnerabilidad natural del acuífero se calculó en función de la profundidad del nivel freático y el espesor de la zona no saturada, siguiendo los lineamientos de Foster et. al. (1991).

Tanto para los recursos superficiales como subterráneos, los resultados se representaron mediante un sistema de clasificación tipo semáforo: rojo (exclusión o vulnerabilidad alta), amarillo (evaluación particular) y verde (baja susceptibilidad o vulnerabilidad). Esta codificación facilita la interpretación operativa de los riesgos ambientales y la toma de decisiones.

Finalmente, el análisis permite también clarificar las competencias regulatorias conforme al Código de Aguas de la provincia de Córdoba (Ley 5589), destacándose que:

- Las extracciones dentro de la línea de ribera, asimilables a áreas en lecho ordinario (cauce activo) y lecho periódico (áreas inundadas por crecidas frecuentes), son de exclusiva competencia de APRHI.
- Las extracciones fuera de línea de ribera, pero dentro de la llanura de inundación, dentro del lecho episódico (presencia de riesgo hídrico), requieren evaluación conjunta de APRHI y Secretaría de Minería.
- Las extracciones sobre terrazas no inundables (fuera de la línea de riesgo hídrico) quedan bajo competencia exclusiva de la Secretaría de Minería.

Esta definición temprana de jurisdicciones permite optimizar los procesos de evaluación ambiental, reduciendo tiempos y fortaleciendo la prevención y gestión de impactos ambientales.

CONCLUSIONES

A través de la zonificación hidrogeomorfológica, basada en la interpretación de rasgos geológicos y geomorfológicos del área, se logró identificar con claridad los sectores de alta sensibilidad fluvial donde se requiere aplicar restricciones a la actividad minera. Esta diferenciación permite establecer con anticipación las áreas de exclusión total, aquellas que requieren intervención específica del APRHI y aquellas que, por inexistencia de riesgo hídrico, pueden ser evaluadas directamente por la Secretaría de Minería. Esta clasificación contribuye a acelerar los procesos administrativos, resolviendo uno de los problemas centrales que motivaron este trabajo.

En el análisis del recurso subterráneo, los resultados confirman una correspondencia entre las zonas identificadas como vulnerables mediante el modelo propuesto y los niveles freáticos observados en campo. La metodología permite detectar sectores críticos por alumbramiento del techo del acuífero libre y modificaciones en su hidrodinámica e hidroquímica, lo que fortalece la prevención de riesgos sobre la calidad y disponibilidad de agua subterránea.

Un aspecto central de la propuesta es su simplicidad operativa. La metodología puede ser aplicada por: consultores ambientales para evaluar emprendimientos particulares, y/o profesionales de organismos públicos (en el marco del proceso de EIA); con conocimientos de geología, geomorfología e hidrogeología; utilizando herramientas accesibles como interpretación de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG) de código abierto, sin necesidad de instrumental sofisticado ni costos elevados de implementación. Esto permite incorporar su uso generalizado en la etapa inicial de la Evaluación de Impacto Ambiental, optimizando recursos y orientando estudios detallados solo en los casos que los requieran.

En síntesis, la metodología desarrollada constituye una herramienta de gestión ágil, económica y técnicamente sólida para con-

tribuir a la evaluación ambiental de proyectos mineros de áridos, compatible con el marco normativo provincial vigente y adaptable a otros escenarios hidrogeomorfológicos similares dentro de la provincia de Córdoba.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Minería de la provincia de Córdoba y al Ministerio de Producción Ciencia e Innovación Tecnológica por el apoyo brindado para la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

Palacio, D. (2022). Propuesta metodológica para contribuir a la evaluación y gestión de los impactos ambientales de la actividad minera de áridos sobre los recursos hídricos, planteada para la faja y paleofaja fluvial del río Xanaes, entre sus nacientes y el paralelo de 64º 09´. Tesis Maestría. FCEFyN UNC.

https://rdu.unc.edu.ar/items/d300a674-d0fb-4e5a-a975-a7bcf5b502f0

Foster, S. e Hiriata R. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.

Software QGIS 3.16.8-Hannover. Sistema de Información Geográfica QGIS. Proyecto de la Fundación Geoespacial de Código Abierto. http://qgis.org» .

PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA ACTIVIDAD MINERA DE CÓRDOBA, MARCO NORMATIVO AMBIENTAL Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA AUTORIDAD MINERA PROVINCIAL

David H. Palacio[1], Pedro A. Ventre[1], Rocío E. Cañas[1], Nicolás R. Nimis[1], Priscila M. Vizuara[1], Galo J. Palma[1], Marcelo H. Micca[1], María J. Etcheverry Aldonza[1], Leonor M. Trucco[1]
[1]Secretaría de Minería -Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica, Av. Hipólito Yrigoyen 401, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: davidhpalacio@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo resume el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para la actividad minera en la provincia de Córdoba, que se basa en un marco normativo que contempla legislación nacional y provincial. A nivel nacional, el Código de Minería (Ley 1.919) considera a la minería como una actividad de "utilidad pública", y la Ley 24.585 establece la necesidad de cumplir con estándares ambientales. Estas leyes delegan a las provincias la responsabilidad de designar autoridades competentes para evaluar y autorizar proyectos, guiadas por principios de prevención, precaución y responsabilidad ambiental.

El proceso comienza con la presentación de un Informe de Impacto Ambiental (IIA) ante la Autoridad Minera Concedente, que debe incluir una línea de base ambiental, descripción pormenorizada del proyecto minero, identificación de impactos potenciales y un plan de manejo ambiental.

La Ley Provincial Ambiental N° 10.208 (2014) establece la Evaluación de Impacto Ambiental como una herramienta clave de gestión ambiental, exigiendo estudios específicos en áreas geográficas ambientalmente sensibles.

La Licencia Ambiental es otorgada por el Ministerio de Ambiente y Economía Circular tras someter los proyectos a evaluación técnica y audiencia pública. Esta, junto con la Declaración de Impacto Ambiental otorgada por la Autoridad Minera Provincial, constituyen los documentos que autorizan las operaciones mineras, estableciendo condiciones y plazos para las futuras actualizaciones del Informe de Impacto Ambiental, según lo establecido en la legislación ambiental minera nacional.

Palabras clave: impacto ambiental, gestión ambiental y marco normativo ambiental.

ABSTRACT

This paper summarizes the Environmental Impact Assessment (EIA) process for mining activities in the province of Córdoba, which is based on a regulatory framework that includes both national and provincial legislation. At the national level, the Mining Code (Law 1,919) considers mining to be an activity of "public utility," and Law 24,585 establishes the need to comply with environmen-tal standards. These laws delegate to the provinces the responsibility of appointing competent authorities to evaluate and authorize projects, guided by the principles of prevention, precaution, and environmental responsibility.

The process begins with the submission of an Environmental Impact Report (EIR) to the Granting Mining Authority. This report must include an environmental baseline, a detailed description of the mining project, identification of potential impacts, and an environmental management plan.

The Provincial Environmental Law No. 10,208 (2014) establishes the Environmental Impact As-sessment as a key tool for environmental management, requiring specific studies in environmen-tally sensitive geographic areas.

The Environmental License is granted by the Ministry of Environment and Circular Economy after subjecting the projects to technical evaluation and a public hearing. This license, together with the Environmental Impact Statement issued by the Provincial Mining Authority, constitute the docu-ments that authorize mining operations, setting conditions and deadlines for future updates of the Environmental Impact Report, in accordance with national mining environmental legislation.

Keywords: environmental impact, environmental management, environmental regulatory frame-work.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer el procedimiento de EIA para proyectos mineros dentro de la provincia de Córdoba, con sus particularidades; y además, fomentar la inserción y ejecución de la actividad minera dentro de los planes de ordenamiento territorial (debido al crecimiento demográfico que afecta cada vez más las áreas mineras), desarrollando programas

de actuación ante cierre de minas y canteras, aplicando criterios y metodologías de evaluación tendientes a eficientizar y optimizar los procesos.

Si bien existe un amplio marco normativo que rige la actividad, el Estado debe procurar la inclusión de los emprendimientos mineros en el sistema, perfeccionar los mecanismos de información, participación y consulta ciudadana; asumiendo una mayor participación en este campo y adoptando un rol activo; dando ejemplo de responsabilidad social, fiscalizando el cumplimiento estricto de las leyes y divulgando las buenas prácticas, con la finalidad de visibilizar la importancia de los productos a obtener mediante las actividades mineras extractivas.

Son funciones primordiales del Estado el respeto hacia los derechos de toda la población, promoviendo la Responsabilidad Social desde distintos frentes, sean estos de concertación o normativos. Intentando promover alianzas estratégicas entre las partes involucradas y garantizando el cumplimiento de los acuerdos entre empresas y comunidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA) minero de la provincia de Córdoba se encuentra regulado por un extenso marco normativo integrado por el Código de Minería de la Nación Argentina (CM), ley nacional 24.585 que modificó en el año 1995 el CM, Ley General del Ambiente N.º 25.675/02, Ley Provincia 7.343/85, Ley Provincial de Política Ambiental N.º 10.208, Decretos Reglamentarios y Resoluciones Internas (Resolución 025/98 Dirección de Minería); y la legislación específica vinculada a la actividad minera y la protección de áreas sensibles, como los Bosques Nativos (Ley N.º 9.814). Estas normativas establecen los requisitos técnicos, administrativos y participativos que rigen la presentación, análisis y autorización de proyectos mineros.

El procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental se resume en la Figura 1. Como puede observarse, es un trámite administrativo complejo que incluye la participación conjunta de, al menos, dos reparticiones: Secretaría de Minería (dependiente del Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica) y Ministerio de Ambiente y Economía Circular. El proceso puede complejizarse notoriamente en casos donde otros organismos requieran participación. Entre los más comunes se encuentran la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI), Empresa Provincial de Energía Eléctrica (EPEC), Vialidad Nacional y Provincial, organismos de gestión de acueductos, poliductos, gasoductos, etc.; que si bien no evalúan ambientalmente, tienen participación por ser Autoridades de Control en cada una de las materias.

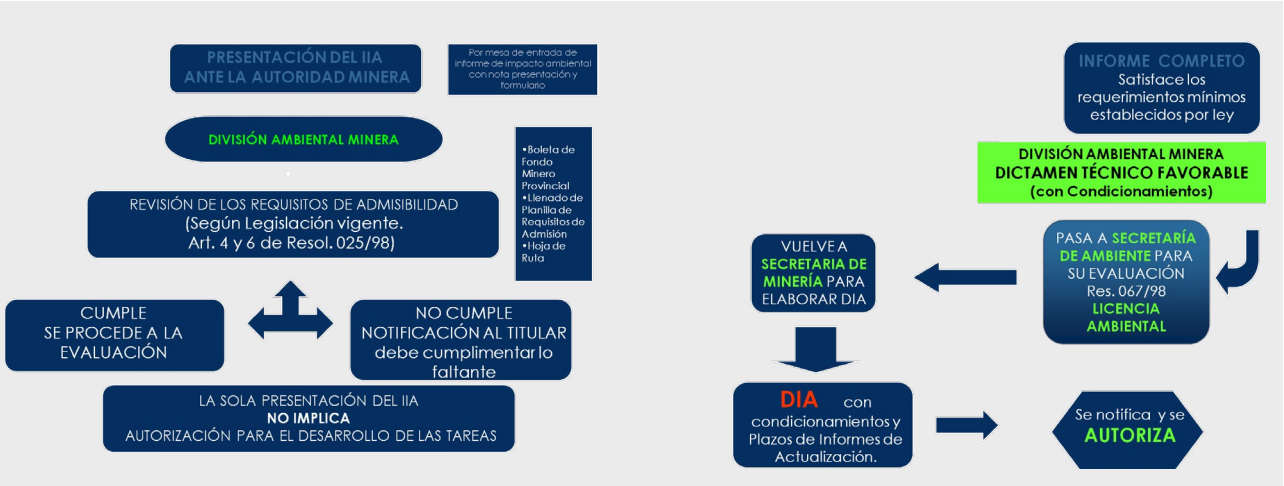


Fig. 1. Flujograma Conceptual del Trámite de EIA para emprendimientos mineros.

Una vez realizada la presentación del Informe de Impacto Ambiental (IIA) por parte del titular del proyecto (bajo el asesoramiento de un Consultor Ambiental habilitado) ante la Autoridad Minera, la evolución del trámite puede resumirse en tres etapas:

La primera etapa consiste en verificar los requisitos de admisibilidad del Informe de Impacto Ambiental (IIA) y continúa con la instancia de verificación administrativa, donde intervienen el RUAMI (Registro Único de Actividades Mineras de la Provincia de Córdoba) y el Servicio Administrativo de la Secretaría de Minería.

La segunda etapa consiste en una inspección de campo al emprendimiento minero donde participan profesionales de la Secretaría de Minería, que se encargan de analizar y registrar el grado de correspondencia existente entre lo declarado en el IIA presentado y las condiciones reales del entorno.

Finalmente, la tercera etapa consiste en la evaluación de gabinete, donde se lleva a cabo el análisis técnico integral de la documentación presentada. Este proceso de evaluación tiene como objetivo elaborar un dictamen técnico, que podrá ser favorable o desfavorable según se cumplan o no las exigencias y criterios de la Autoridad Minera.

El proceso culmina con la participación del Ministerio de Ambiente y Economía Circular, que realiza su propia evaluación técnica

en el marco de la Comisión Técnica Interdisciplinaria (CTI) y convoca a audiencia pública, otorgando Licencia Ambiental en el caso de corresponder. Luego, la Autoridad Minera Concedente emite la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) que, en conjunto con la Licencia, constituyen los instrumentos legales que habilitan la operación minera bajo condiciones y plazos definidos.

Actualmente, una situación de mejora se presenta en el proceso de admisión de los trámites con la verificación de requisitos de admisión. Se está trabajando en un trámite conjunto que asegure requisitos unificados y contenidos técnicos mínimos que reúnan los requisitos normativos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Evaluación de Impacto Ambiental realizada por las distintas Reparticiones del Estado provincial permite regular la actividad minera con el fin de lograr una gestión sustentable y ambientalmente adecuada, que contemple la explotación racional de los recursos naturales y la protección ambiental y de la biodiversidad.

Para alcanzar estos objetivos, se considera no solo el cumplimiento del marco legal ambiental y minero vigente, sino también la articulación con normativa complementaria, como la Ley de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos, las leyes de conservación de áreas naturales protegidas y reservas, los criterios de factibilidad de localización, las autorizaciones emitidas por la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI), y, cuando corresponde, la intervención de organismos nacionales como la ANMAC (Agencia Nacional de Materiales Controlados), entre otros. Esta mirada integral permite evaluar la viabilidad ambiental de los proyectos mineros en función del contexto territorial, ecológico y normativo en el que se insertan.

Si bien no se cuenta con estadísticas y datos certeros, puede afirmarse que casi la totalidad de los emprendimientos mineros estables cuentan con presentaciones ante la Secretaría de Minería, alcanzando distintos niveles de cumplimiento y autorizaciones. Debe considerarse para estos análisis la evolución de la actividad en el tiempo. Existen emprendimientos planteados para ser desarrollados en cortos períodos de tiempo y otros que forman parte del ámbito tradicional minero de Córdoba, insertados desde hace tiempo en el mercado regional y que proveen de materiales a amplios sectores, incluyendo otras provincias.

Los emprendimientos mineros que se encuentren realizando actividades extractivas por fuera del marco legal, pueden ser advertidos mediante denuncias de particulares, actuaciones de otros estamentos del Estado, o por inspecciones realizadas por personal de la Secretaría de Minería y de la Secretaría de Policía Ambiental. En esos casos, las actividades son inmediatamente paralizadas. En los casos en que se manifieste la voluntad de avanzar con la explotación y la gestión de las habilitaciones correspondientes, se intima a los productores a comparecer ante la Autoridad de Aplicación, a los fines de registrarse como productores mineros en el RUAMI y presentar un Informe de Impacto Ambiental, con lo cual se desencadena el proceso de EIA.

En materia de cumplimiento de plazos se puede afirmar que, si bien se han acortado notoriamente los plazos de respuesta, la complejidad del trámite por la participación conjunta de varias reparticiones, lo torna engorroso y los plazos se dilatan por encima de los fijados por ley.

Ante esta situación, actualmente se prevé avanzar con la digitalización de todos los documentos y actuaciones de carácter administrativo en los expedientes ambientales de cada proyecto minero, tarea que se realiza de manera progresiva para reemplazar definitivamente el soporte papel por el digital, en consonancia con lo que establece la ley 10.618 de Simplificación y Modernización de la Administración. En este sentido, vale aclarar que la ley de procedimientos administrativos provincial mantiene criterios diferentes al código de procedimientos mineros (5436/72), por lo que la tareas de aplicar la ley de modernización a la actividad minera, principalmente la concesión minera, lleva implícito una problemática a resolver y que forma parte de las prioridades de la administración minera provincial. En segundo término, existe la voluntad política de avanzar en la generación de un trámite customizado particular que prevea la intervención conjunta de las reparticiones actuantes, los requisitos técnicos normativos a formar parte de las presentaciones y las actuaciones técnico administrativas previstas por parte de las reparticiones actuantes, con lo que se optimizarán los recursos y mejorarán los plazos de evaluación.

CONCLUSIONES

La Secretaría de Minería es un organismo público específico del Estado que tiene las funciones principales de controlar y promover la actividad minera. Cabe destacar que la minería es la única actividad económica dentro de la provincia de Córdoba que está estrictamente reglamentada desde un punto de vista ambiental y jurídico; en este caso, bajo el Código de Minería a nivel nacional y un marco normativo provincial complementario.

Existen evidencias ciertas de que se han acortado los plazos de respuesta en las evaluaciones. En este respecto, se reconoce que aún no se ha logrado cumplir con los plazos de ley y se está trabajando para lograrlo. La acción conjunta de los distintos organismos públicos inherentes al trámite, va a repercutir en un beneficio generalizado en cuanto a la tramitación y los plazos. De esta manera, la aplicación de criterios consensuados entre las distintas reparticiones mejorará los procesos. La aplicación de la ley de modernización y la digitalización del proceso de EIA, será una herramienta que permitirá sumar a la gestión y alcanzar los objetivos planteados.

Es necesario un cambio de paradigma en lo que hace a la actividad minera y su relación con la sociedad, en donde los distintos actores intervinientes tomen un rol activo ante la problemática. La actividad minera debe desarrollarse respondiendo a una

planificación sustentable para el aprovechamiento de estos recursos no renovables, y de manera tal que no provoque impactos ambientales irrecuperables en los sitios afectados. Para alcanzar esta premisa resulta necesario realizar controles y procedimientos efectivos y permanentes en las zonas donde se desarrolla la actividad extractiva. Por ello cobran gran importancia el compromiso, la coordinación y la integración de los organismos competentes, definiendo pautas y procedimientos generales, así como la gestión y ejecución de las actuaciones necesarias para el cumplimiento de la normativa vigente, y mantener una adecuada comunicación con los equipos consultores responsables para el avance de los emprendimientos mineros y sus modificaciones.

La Autoridad Minera Provincial ha desarrollado criterios de evaluación que evolucionan constantemente para optimizar procesos administrativos y asegurar una explotación responsable de los recursos.

En resumen, Córdoba busca equilibrar la actividad minera con la sustentabilidad a través de un sistema normativo que integra exigencias técnicas, legales y sociales, garantizando la coherencia entre el interés público y la protección ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba y al Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica por el apoyo brindado para la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

Argentina. (s.f.). Ley 19.199. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-1919-43797

Argentina. (s.f.). Ley 24.585 y Ley 30.096. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-24585-30096

Argentina. (s.f.). Ley provincial 7.343. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/provincial/ley-7343-123456789-0abc-defg-343-7000ovorpyel/actualizacion

Argentina. (s.f.). Ley provincial 10.208. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/provincial/ley-10208-123456789-0abc-defg-802-0100ovorpyel

Argentina. (s.f.). Ley 26.331. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26331-136125

Gobierno de Córdoba. (2013). Ley 9.814. Recuperado de https://www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2013/05/LEY-N%-C2%BA-9814.pdf

Argentina. (s.f.). Ley 25.675. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25675-79980/texto

LA TRÁGICA INUNDACIÓN DE BAHÍA BLANCA. PROPUESTAS DE MITIGACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DEL EVENTO Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE GEOLÓGICO

Fernando X. Pereyra[1,2], Diego Azcurra[1], Guadalupe Buceta[1]
[1]Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR-IGRM). Buenos Aires, Argentina y
[2]Departamento de Ambiente y Turismo, Universidad Nacional de Avellaneda
Mail de contacto: fpereyra@undav.edu.ar

RESUMEN

El 7 de marzo del 2025 se produjo una catastrófica inundación que afecto a la ciudad de Bahía Blanca (sur de la Provincia de Buenos Aires) y zonas aledañas. Numerosas inundaciones se han producido en la región. Las inundaciones urbanas se intensifican debido a factores antrópicos como la urbanización acelerada, impermeabilización del suelo y falta de una infraestructura de drenaje adecuada. La ciudad se ubica, desde el punto de vista geológico-geomorfológico en la zona de transición entre el piedemonte distal sur de las Sierras Australes y al ambiente litoral marino-estuarico. Destacan en la zona los arroyos Napostá Grande y Sauce Chico que nacen en la zona serrana distante a alrededor de 100 Km de Bahía Blanca. El primero de ellos atraviesa la zona más densamente poblada. En la presente contribución se han delimitado las áreas potencialmente inundables en la cuenca del arroyo Napostá, utilizando herramientas de análisis geoespacial como imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Se realizan una serie de propuestas de medidas de mitigación (reservorios, canalizaciones, alerta temprana, planificación urbana). Finalmente, se proponen la realización de una serie de embalses y diques en la cuenca media del arroyo Napostá Grande, señalando algunos sitios para su construcción.

Palabras clave: Bahía Blanca, inundaciones, mitigación

ABSTRACT

On March 7, 2025, a catastrophic flood affected the city of Bahía Blanca (southern Buenos Aires Province) and surrounding areas. Numerous floods have occurred. Urban floodings are intensified by anthropogenic factors such as rapid urbanization, soil imperviousness, and lack of adequate drainage infrastructure. From a geological and geomorphological perspective, the city is located in the transition zone between the southern distal foothills of the Sierras Australes and the coastal marine-estuaric environment. The Napostá Grande and Sauce Chico streams, which originate in the mountainous area approximately 100 km from Bahía Blanca, are prominent in the area. The former flows through the most densely populated area. In this contribution, we delimit the potentially floodable areas in the Napostá Stream basin using geospatial analysis tools such as satellite imagery and digital elevation models. A series of mitigation measures (reservoirs, channeling, early warning, urban planning) are proposed. Finally, the construction of a series of reservoirs and dams in the middle basin of the Napostá Grande Stream is proposed, with some sites for their construction being identified.

Keywords: Bahía Blanca, floodings, mitigation

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bahía Blanca y zonas aledañas sufrió una gran inundación el día 7 de marzo del 2025, la cual ocasionó numerosas muertes y desapariciones, evacuaciones y significativas pérdidas económicas y destrucción de infraestructura. Si bien la región ha experimentado numerosas inundaciones en el pasado esta última fue la mayor registrada, volviendo ineficaz la mayor parte de la infraestructura preexistente tendiente al manejo de excedentes fluviales. La ciudad se ubica, desde el punto de vista geológico-geomorfológico en la zona de transición entre el piedemonte distal sur de las Sierras Australes y al ambiente litoral marino-estuarico. Destacan en la zona los arroyos Napostá Grande y Sauce Chico que nacen en la zona serrana distante a alrededor de 100 Km de Bahía Blanca. El primero de ellos atraviesa la zona más densamente poblada.

En la presente contribución de analizan y se proponen algunas acciones concretas para mitigar los efectos de futuras inundaciones. Se han utilizado herramientas de análisis geoespacial como imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (DEM). A partir del análisis de la geología y geomorfología y del análisis morfológico del terreno, se identificaron las pendientes y zonas de acumulación de escurrimiento, complementando este enfoque con el análisis multitemporal de imágenes Sentinel-2. Asimismo, se han utilizado índices espectrales relacionados con la presencia de agua (como el NDWI, Índice Diferencial Normalizado del Agua).

Se incluyen: 1) caracterización geo-ambiental de la zona, 2) Evaluación de las causas del riesgo de inundación, 3) Identificación de zonas críticas y 4) Propuestas de medidas de mitigación (reservorios, canalizaciones, alerta temprana, planificación urbana).

GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA E HIDROLOGÍA

Pueden diferenciarse, en la zona estudiada, dos ambientes: 1-continental y 2-marino-estuarico. En la zona continental afloran depósitos plio-pleistocenos loessicos y pleistocenos-holocenos pedemontanos, cubriendo parcialmente a los anteriores (Formaciones La Norma y Aguas Blancas, respectivamente. En todos los casos suelen coronar las secuencias potentes niveles calcretizados (toscas) los que participan también como rodados ocasionalmente. En los valles fluviales se encuentran depósitos holocenos-recientes limo-arenosos. En el ambiente marino se observan al menos dos niveles de cordones litorales y de planicies mareales, generalmente agrupadas en la llamada Formación Bahía Blanca (Folguera et al. 2017). La ciudad se localiza en la zona distal de la Planicie Sur de las Sierras Australes, en la transición al ambiente marino-estuarico. La Planicie Sur es una unidad compleja que incluye geoformas pedemontanas que cubren parcialmente a depósitos loessicos. A su vez la presencia de potentes niveles de calcretes (¨tosca¨) en los depósitos loesicos y pedemontanos han actuado luego como una planicie estructural, controlando la erosión posterior. Estos niveles cementados nacen al pie de la sierra, en cotas en el orden de los 300 m s.n.m., inclinan suave pero sostenidamente hasta el sur (hasta cerca de los 60 msnm). La Planicie Sur, presenta en la zona distal una escarpa de erosión posiblemente debida a la acción litoral pasada, de varios metros de desnivel (antiguo paleoacantilado). Actualmente, se encuentra parcialmente suavizada por ulterior acción fluvial y gravitacional. Al salir del ambiente pedemontano, han generado pequeños abanicos aluviales-deltas que se apoyan sobre materiales marinos y antiguos niveles de loess. En el caso del río Napostá Grande, el abanico-delta se encuentra en la zona más densamente poblada de la ciudad, incluyendo la zona céntrica. La zona de Cerri y barrios aledaños, se ubica en el abanico aluvial-delta del río Sauce Chico, siendo directamente afectado por este. Hacia el E y el S, se encuentra el ambiente Litoral marino-estuarico, que incluye la antigua planicie de marea, cordones litorales y la actual planicie estuárica y canales de marea. Por su parte, Ingeniero White se ubica directamente en el ambiente litoral marino-estuarico, parcialmente rellenado y elevado por la acción antrópica.

La red de drenaje del sur de las Sierras Australes se estructura a través de tres cuencas principales, los ríos Sauce Grande, Napostá Grande y Sauce Chico, que desembocan directamente en el océano.

El arroyo Napostá Grande nace al pie de la Sierra de la Ventana, en la zona de mayor relieve de las sierras, al E de Tornquist. En su recorrido recibe las aguas, por la margen izquierda de los arroyos Del Aguila y Los Leones. El control estructural es evidente en su recorrido, mostrando cambios en el hábito y sinuosidad. En general se encuentra encajonado y puede reconocerse usualmente un nivel de terraza. La planicie aluvial varía en su ancho, si bien, en general no es amplia.

Tiene un recorrido aproximado de 120 Km y la cuenca un área de 1.100 Km^2. El caudal medio, en la zona cercana a Bahía Blanca es de 1 m^3/seg, pero muestra una gran variabilidad. En general tiene dos picos de crecientes, en otoño y en primavera y los mínimos (0,1m^3/seg) en verano. Caudales superiores a los 200 m^3/seg han sido registrados en el pasado (por ejemplo, en 1944). La cuenca muestra un diseño subdendrítico y una forma claramente alargada (relación ancho-largo), lo que evidencia, sumado a características semejantes en cuencas aledañas, un importante control estructural, con componentes distensivos (con probables reactivaciones inversas) y probablemente, también de rumbo (transcurrentes). En la zona urbana, el curso se encuentra profundamente modificado, con su cauce principal desaguando hacia el este de la zona urbana, en el extremo oriental del Puerto de Ing. White, Este tramo discurre canalizado y en algunos sectores se encuentra entubado. En las cercanías de ápice, se ha construido un canal aliviador (Canal Maldonado), en 1949 que sale en forma más o menos rectilínea hacia el oeste de la zona céntrica.

ANÁLISIS DIGITAL

La identificación precisa de las áreas afectadas por inundaciones resulta clave para el diseño de obras de protección, la evaluación de la vulnerabilidad de infraestructuras lineales y urbanas, así como para la actualización de cartografía de amenazas. Entre las diversas plataformas disponibles, el satélite Sentinel-2 proporciona imágenes ópticas de alta resolución espacial y temporal, adecuadas para el análisis detallado de eventos hidrológicos. Dentro de los índices espectrales utilizados para la detección de cuerpos de agua superficiales, el Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) propuesto por Xu (2006) ha demostrado alta efectividad para discriminar áreas inundadas en escenarios rurales y semiurbanos (Du et al., 2016). Su aplicación en combinación con análisis de diferencia temporal permite no solo cartografiar la extensión de las inundaciones, sino también proporcionar insumos valiosos para la modelización hidrodinámica y la gestión del riesgo. Consecuentemente, se ha aplicado la metodología basada en imágenes Sentinel-2 y el índice MNDWI para detectar y delimitar las áreas afectadas por el evento de inundación registrado en el área de estudio. Para la detección de áreas inundadas se emplearon imágenes ópticas del sensor Sentinel-2, perteneciente al programa europeo Copernicus. Se seleccionaron dos imágenes correspondientes a fechas clave del evento hidrológico analizado: una imagen previa a la inundación, adquirida el 9 de febrero de 2025, y una imagen posterior al evento, obtenida el 11 de marzo de 2025. Posteriormente, se calculó el Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), para la imagen anterior al evento y para la imagen posterior, expresado por la siguiente fórmula:

MNDWI=(Green-SWIR1)/((Green+SWIR1))

donde Green corresponde a la banda verde (B3) y SWIR1 a la banda del infrarrojo de onda corta (B11) de Sentinel-2. Tras el cálculo del índice para cada fecha, se aplicó un umbral de 0,10 para segmentar las áreas con presencia de agua superficial. Es decir, aquellos píxeles con valores superiores a este umbral fueron clasificados como cuerpos de agua. Luego, se efectuó una reclasificación teniendo en cuenta la variable temporal de agua (figura 1). Para esto, se utilizaron ambas imágenes y se definió la presencia de agua anterior al evento, posterior al evento y por último en ambas imágenes. La aplicación del MNDWI a las imágenes Sentinel-2 permitió detectar las áreas afectadas por el evento de inundación, siendo estas clasificadas como agua después del evento.

El análisis espacial mostró que las áreas más afectadas correspondieron a las planicies de inundación adyacentes al cauce principal del río y a depresiones topográficas en áreas agrícolas y periurbanas. También se identificaron zonas de anegamiento en sectores vinculados a infraestructura crítica. Los resultados obtenidos confirman la utilidad del MNDWI, en combinación con imágenes Sentinel-2, como herramienta eficaz para el monitoreo y la evaluación post-evento de inundaciones. El uso de umbrales fijos puede inducir limitaciones en zonas con alta humedad edáfica o vegetación flotante.

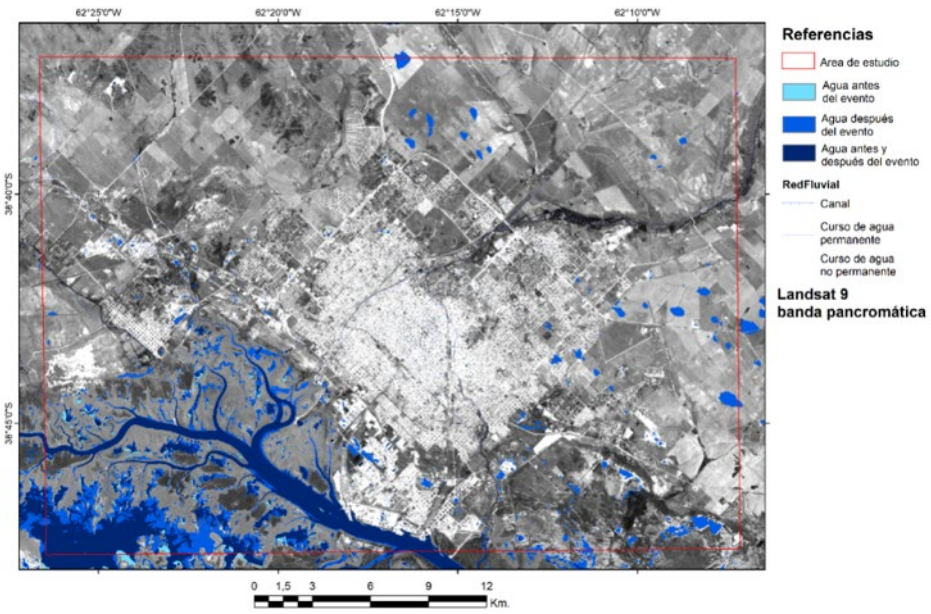


Figura 1. Reclasificación temporal de agua a partir de MNDWI de imágenes posterior y anterior al evento, de fondo imagen Landsat 9 banda pancromática.

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS

Diferentes autores han estudiado distintos aspectos de las inundaciones en la región, destacando, entre otros, Fernández et al., (2020), Zapperi y Campo (2011); González et al., (2017) y Mastandrea y Angeles (2021). En el presente trabajo se ha realizado un mapeo de la traza fluvial del Arroyo Napostá a escala 1:25.000 utilizando imágenes satelitales Airbus de 2025 provistas por Google Earth y las cartas topogáficas a escala 1:100.000 del I.G.N. El objetivo fue el de analizar las variaciones en las pendientes, en el perfil longitudinal del río y los cambios en la sinuosidad. Estos estudios fueron realizados con el objetivo de plantear posibles sitios de localización de pequeñas represas y embalses. Teniendo en cuenta que la localización de la ciudad y sus áreas aledañas implican un alto peligro de inundaciones, el intento de solucionar la problemática solamente a partir de la realización de medidas estructurales que busquen evacuar los excedentes hídricos directamente no sería exitoso para el caso de eventos extremos. Consecuentemente, debe pensarse en retener aguas arriba los picos de crecida como medida más apropiada de mitigación de los efectos de las inundaciones en la ciudad. Al menos en una primera etapa estas acciones deberían encararse para el Arroyo Napostá Grande. Ya en la década del ´40 se analizó esta posibilidad, planteándose la posibilidad de realizar un represamiento en la zona de Puente Canesa. Más recientemente, diferentes estudios han analizado esta posibilidad, entre otros Fernández et al., (2020). El arroyo Napostá Grande presenta un perfil longitudinal típico, cóncavo hacia arriba. Sin embargo, la sinuosidad y sus variaciones no responden directamente a las variaciones en la pendiente (figura 2).

Esta situación debe estar relacionada con el marcado control estructural que presenta toda la zona pedemontana sur de las Sierras Australes, sumadas a los efectos de las variaciones del nivel del mar. En este último caso, el descenso del nivel del mar, tras el máximo ingresivo del Holoceno inferior a medio, provocó en el ¨encajonamiento¨ de todos los cursos en la zona, sumado a la formación de los pequeños abanicos en sus desembocaduras. Consecuentemente, se plantea como posibilidad la realización de dos pequeños cierres en las zonas cercanas a los Puentes García del Río y Mirasoles (en vez del lugar señalado previamente en Pte. Canesa). El objetivo es aumentar la posible zona de almacenamiento afectando la menor superficie posible. La planicie aluvial y

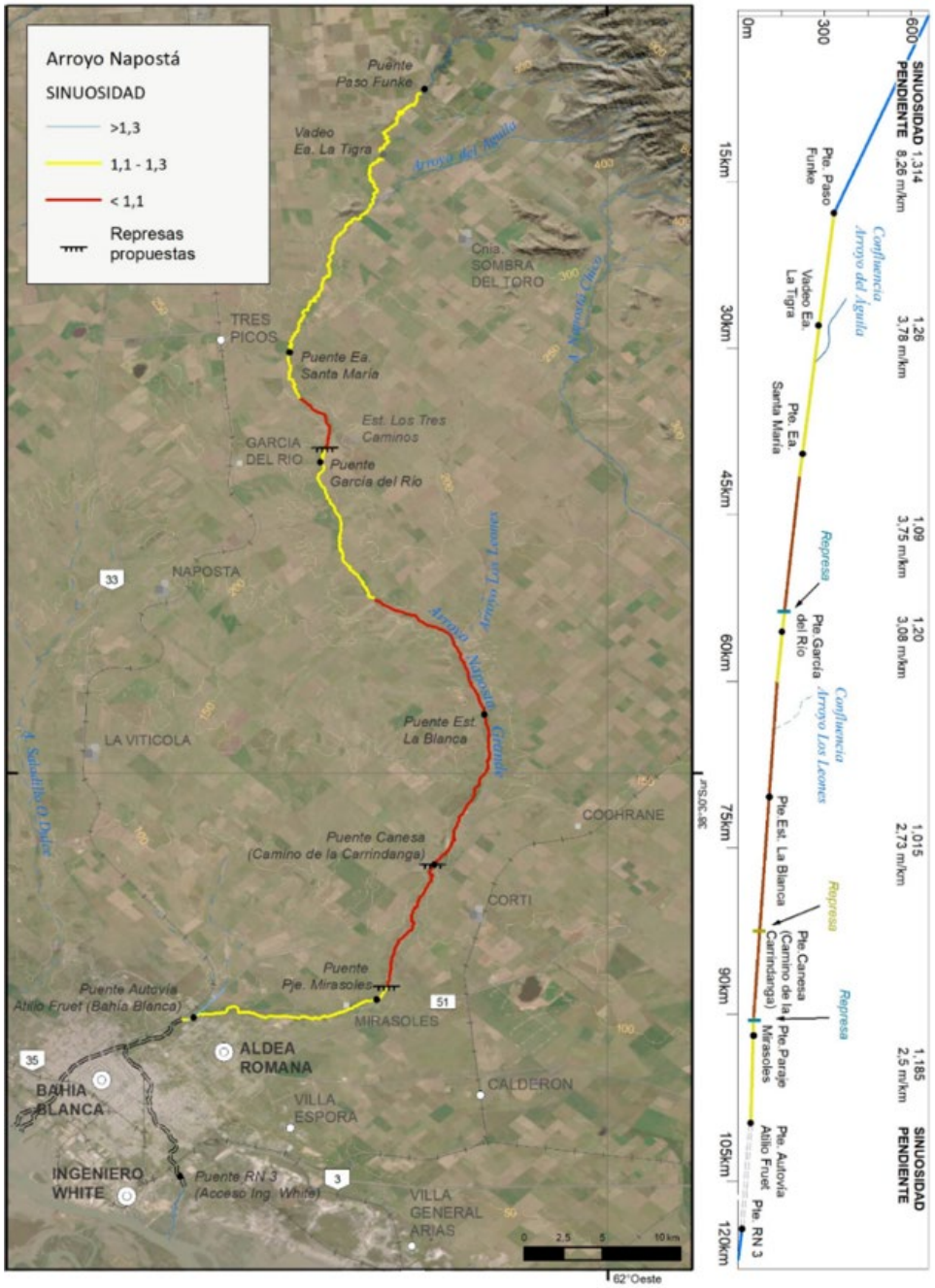


Figura 2. Cuenca del arroyo Napostá Grande. Pendientes, sinuosidad y propuesta de represas.

terraza inferior actuarían como zona de potencial embalse, solo en los momentos de emergencia. La/las represas deben permanecer abiertas todo el tiempo y lo potenciales embalses deben estar vacíos para ser efectivos. Solo en el caso de grandes lluvias, deberían cerrarse y comenzar la acumulación del agua durante el tiempo que sea necesario en función de los datos precisos hidrometeorológicos que se fueran obteniendo. Además de las medidas planteadas, deben mejorarse obviamente las obras de infraestructura hídrica en la zona urbana. Estas acciones deben incluir: 1) Aumento del ancho del Canal Maldonado en forma significativa (al menos al doble); 2) Aumento del ancho de las zonas canalizadas y entubadas del río Napostá Grande en toda la zona urbanizada; 3) Analizar adecuadamente la red pluvial de la ciudad en especial en las zonas aledañas a Ing. White; 4) Evaluar la luz de puentes ferroviarios, rutas, calles y caminos en los arroyos y canales de la zona; 5) Mediante acciones y normativas de ordenamiento territorial debe controlarse de ahora en más los loteos y la expansión en general de la ciudad; en tal sentido deben generarse mapas de peligrosidad geológica detallados; 6) Debe densificarse la red de estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas en toda la zona, al presente, la información disponible es notoriamente deficiente; 7) Ambos aspectos son centrales para poder dar respuesta temprana, siendo fundamental monitoreo y 8) Debe generarse un plan general de contingencia que contemple diferentes conjuntos de acciones concretas y de defensa civil según distintos escenarios potenciales. Esto incluiría el manejo de las represas, sus potenciales cierres y aperturas.

CONCLUSIONES

En la presente contribución se han analizado las características de las inundaciones en la zona de Bahía Blanca observándose que las mismas son múltiples, complejas y sinérgicas. En principio se establece que la zona urbana se localiza en una zona de alta peligrosidad natural, lo cual, sumado a los múltiples usos de la tierra, resultan en la región de alto riesgo. Se han evaluado potenciales acciones de mitigación sobre la base de análisis digitales y trabajos de campo. En tal sentido se plantea que la principal obra estructural tendiente a mitigar los efectos de las inundaciones mayores, debe estar en regular el flujo del arroyo Napostá Grande aguas arriba de la zona urbanizada, realizando una serie de pequeñas represas y embalses. Los posibles escenarios del C.C. pueden generar un aumento en la peligrosidad natural, ya alta. En especial, deberán estudiarse los efectos del aumento en la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, como intensas precipitaciones y tormentas en el mar, así como el posible asenso del nivel de mar en la zona del estuario y su impacto en la dinámica fluvial en la región.

REFERENCIAS

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. https://doi.org/10.3390/rs8040354

Fernández, S., M. Serralunga, C. Weis, M. Flores y P. Abato (2020). Estudios preliminares sobre construcción de un dique en el Ao. Naposta Grande. Revista de Ingeniería Consejo federal de Decanos de Ingeniería. RADI 77-84.

Folguera, A., M. Etcheverría, M. Zárate y L. Escosteguy. (2017). Hoja geológica 3963-II Bahía Blanca. SEGEMAR, Boletín 425, 96 pags.

Zapperi et al., (2016);

Mastandrea, A. y G. Angeles (2021). Evaluación del riesgo hídrico en la cuenca del arroyo napostá Grande (prov. De buenos Aires. Cuadernos Geográficos 63(1):199-219.

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Zapperi, P. y A. Campo (2011) Efectos de precipitaciones intensas y su relación con las las características geomorfológicas de Bahía Blanca. Párrafos Geográficos Vol. 10, N°1:593-614

HORMIGÓN DRENANTE: INNOVACIÓN PARA UNA URBANIZACIÓN RESILIENTE Y EFICIENTE EN LA GESTIÓN DEL AGUA

Dayana P. Rautenberg[1], Gonzalo Aiassa Martínez[2], María J. Positieri[1]
[1]Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC) – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC), Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina - Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina
[2]Centro de Investigación y Transferencia en Geotecnia Estructuras y Fundaciones (CIGEF) – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC), Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina - Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: dprautenberg@gmail.com

RESUMEN
Entre las diversas estrategias actualmente empleadas para la gestión de aguas pluviales, el hormigón drenante resulta de gran interés debido a su alta porosidad, que además favorece la regeneración de las aguas subterráneas. Sin embargo, a pesar de su creciente popularidad en el mundo, el hormigón drenante no se utiliza ni se investiga de manera significativa en Argentina. Para evaluar el comportamiento in situ de una superficie de hormigón drenante, se desarrollaron mezclas optimizadas para su aplicación en estacionamientos vehiculares. El proyecto contempló la construcción de parcelas experimentales comparativas que incluyen hormigón convencional, hormigón drenante elaborado, hormigón drenante premoldeado (adoquines) y terreno natural. Este trabajo presenta la etapa de diseño y ejecución así como la instrumentación necesaria para determinar los parámetros mecánicos e hidráulicos y que se monitorearon in situ. Los resultados obtenidos in-situ se comparan entre sí y con los resultados obtenidos en laboratorio. A través de las conclusiones obtenidas se resalta el potencial del empleo de los pavimentos de hormigón drenante como una alternativa sostenible para el drenaje urbano en Córdoba, Argentina.

Palabras clave: pavimento de hormigón drenante, gestión de aguas pluviales, regeneración de aguas subterráneas.

ABSTRACT
Among the various strategies currently employed for stormwater management, draining concrete is of great interest due to its high porosity, which also favors groundwater regeneration. However, despite its growing popularity worldwide, draining concrete is neither used nor significantly re-searched in Argentina. To evaluate the in-situ behavior of a draining concrete surface, optimized mixtures were developed for use in vehicle parking lots. The project included the construction of comparative experimental plots including conventional concrete, precast draining concrete, pre-cast draining concrete (paving stones), and natural terrain. This work presents the design and exe-cution stages, as well as the instrumentation necessary to determine the mechanical and hydrau-lic parameters, which were monitored in situ. The in-situ results are compared with each other and with laboratory results. The conclusions obtained highlight the potential of using draining concrete pavements as a sustainable alternative for urban drainage in Córdoba, Argentina.

Keywords: Draining concrete pavement, stormwater management, groundwater regeneration.

INTRODUCCIÓN

La gestión de aguas pluviales se ha convertido en una preocupación para los municipios debido al aumento de la urbanización. En un entorno construido con una cantidad significativa de superficies impermeables y la integración de sistemas de cunetas en los pavimentos con hormigón convencional, las aguas pluviales llegan a los cuerpos de agua receptores mucho más rápido, en mayor volumen y transportan más contaminantes. Ingenieros, investigadores y desarrolladores están explorando diferentes formas de reducir las superficies impermeables y abordar la gestión de aguas pluviales de una manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El hormigón drenante se usa para muchas aplicaciones, incluido el uso como material de pavimentación para estacionamientos, paredes estructurales livianas, canchas de tenis y pisos de invernaderos. Este hormigón reduce la contaminación de las aguas pluviales en la fuente, controla la escorrentía de las aguas pluviales y elimina o reduce el tamaño de las alcantarillas pluviales (Schokker, 2010). Sin embargo, hay algunos problemas relacionados con el hormigón drenante que aún deben investigarse más a fondo para mejorar su vida útil y su rendimiento durante el servicio

Antecedentes monitoreo in-situ

En el uso de los hormigones drenantes existen antecedentes de monitoreo in-situ en los que se han reportado casos de beneficios

ambientales en general y del manejo del drenaje superficial en particular durante su vida útil.

Beaudry y Lim (2014) realizaron mediciones de capacidad de infiltración de un área de estacionamiento construido con hormigón drenante en Dakota del Norte (EE. UU.) utilizando un infiltrómetro de doble anillo. Utilizaron las altas tasas de infiltración observadas (4378 mm/h en promedio) para simular la reducción de la escorrentía ante lluvias de diseño de 2 a 100 años de periodo de retorno.

Crookes et al. (2015) monitorearon, durante un mes, el desempeño de un pavimento de hormigón drenante de 3 años de antigüedad, en Ontario (Canadá). Este pavimento, sin un sistema de drenaje, presentó una importante reducción tanto del volumen de escorrentía (entre el 19 % y el 100%, esto último en la mitad de los eventos observados, con láminas por debajo de 4,5 mm) como del caudal pico escurrido (entre el 73% y el 100%).

Braswell et al. (2018) observaron el comportamiento hidrológico de cuatro áreas reacondicionadas de estacionamiento (50 m² de área total) en EE. UU. construidas sobre un suelo arcilloso de baja conductividad hidráulica. El diseño incorporó una zona de almacenamiento interno de agua de 150 mm para aumentar la exfiltración, diseñada para capturar y extraer más del 70% del volumen de escorrentía de eventos de precipitación de menos de 8 mm. Observaron que, a lo largo de un año, el 22% del volumen infiltrado se redujo mediante exfiltración y evaporación.

En definitiva, los estudios sobre de pavimentos de hormigón drenante tanto in situ como en ensayos de laboratorio indican un significativo impacto positivo de este material en el control de los escurrimientos pluviales, tanto en su volumen como en los caudales producidos, destacando la importancia del mantenimiento de este tipo de estructuras.

PLAN EXPERIMENTAL - MATERIALES Y MÉTODOS

Para validar las propiedades hidrológicas-mecánicas de los hormigones drenantes estudiados se construyeron parcelas experimentales comparativas que incluyen hormigón convencional, hormigón drenante elaborado, hormigón drenante premoldeado (adoquines) y terreno natural.

Mezclas optimizadas

Para ello, se estudiaron a escala laboratorio e industrial las dosificaciones de hormigón drenante que mejor prestación hidrológica-mecánica presentaban.

Materiales componentes: tanto para la dosificación de hormigón convencional como las dosificaciones de hormigón drenante elaborado y premoldeado se usaron los mismos materiales componentes. Se detallan resumidamente en Tabla 1.

Cemento y adiciones minerales	Cemento portland con filler calcáreo (CPF40) (Norma IRAM 50000)
Agregado fino (Norma IRAM 1512)	Arena gruesa 0-6 (fracción 0 – 4,75 mm) – Anisacate, Córdoba
Agregado grueso (Norma IRAM 1531)	Triturado 6-12 (fracción 4,75 – 13,2 mm) - Malagueño, Córdoba Triturado 20-30 (fracción 19 – 31,5 mm) - Malagueño, Córdoba
Aditivo	Plastificante (Norma IRAM 1663)
Agua	Potable (Norma IRAM 1601)

Tabla 1. Materiales componentes para las mezclas optimizadas.

Dosificaciones:

- Hormigón convencional elaborado. La parcela de pavimento con hormigón convencional se materializó con una mezcla dosificada según método propio de la empresa proveedora de hormigón elaborado y cuya composición es periódicamente ajustada en función de la información de los controles de calidad. La dosificación fue elaborada para alcanzar los requerimientos que se in forman en Tabla 2.
- Hormigón drenante elaborado. La parcela de pavimento con hormigón drenante elaborado se materializó con una mezcla optimizada a escala de laboratorio en el Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), dosificada según método ACI 522, informada a la empresa de hormigón elaborado y cuya composición se ajustó al día del colado en función de la información de los controles de calidad provista por la misma. En la Tabla 2 se detallan especificaciones del hormigón drenante elaborado.
- Hormigón drenante premoldeado (adoquines). La parcela de pavimento con hormigón drenante premoldeado se materializó con una mezcla optimizada a escala industrial, dosificada según método propio de la empresa de hormigón premoldeado. En la Tabla 2 se detallan especificaciones del hormigón drenante premoldeado. Cabe aclarar que la resistencia mecánica adoptada corresponde al método de diseño de mezclas de consistencia seca destinada a la fabricación de adoquines.

Construcción de parcelas comparativas (modelo simplificado)

El objetivo del plan experimental es representar de manera reducida varios sistemas de pavimento de hormigón drenante para compararlo con un pavimento de hormigón convencional y la presencia de un terreno natural sin pavimentar. Esto facilita el análisis,

comprensión y la resolución del problema que hoy presentan los pavimentos convencionales. A continuación, se detallan las características principales de este modelo simplificado:

- Ubicación: Las parcelas experimentales comparativas se construyeron en el estacionamiento Oeste de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba, Argentina (Figura 1).
- Área: 60 m², equivalente a 4 espacios de estacionamientos: Terreno natural - Pavimento de hormigón drenante elaborado - Pavimento de hormigón drenante premoldeado - Pavimento hormigón convencional elaborado. Cada espacio cuenta con un sector para ensayos in-situ y extracción de testigos para ensayos mecánicos y durabilidad. Los 4 espacios de estacionamiento están señalizados y monitoreados 24hs mediante una red de sensores de nivel. La Figura 2 presenta imágenes de la evolución de la construcción del modelo simplificado, de izquierda a derecha de 10/2023 a la actualidad.

	HORMIGÓN CONVENCIONAL ELABORADO	HORMIGÓN DRENANTE ELABORADO	HORMIGÓN DRENANTE PREMOLDEADO
Información General			
Resistencia a compresión a 28 días	25 MPa	21,0	
Módulo de rotura a 28 días [MPa]			2,0
Asentamiento de diseño [cm]	10 +/-2		
Relación agua/cemento	0,52	0,33	
Humedad [%]			6,5
Tipo de descarga admitida	Directa, vibrado	Directa, comprimido	Directa, vibro-comprimido
Composición	kg/m³	kg/m³	
Cemento	330	305	375
Agua	170	101	1.500
Agregado fino arena gruesa 0-6	900		
Agregados grueso triturado 20-30	1.005	1.200	
Aditivo	2,64	1,95	1,12

Tabla 2. Especificaciones de hormigón convencional

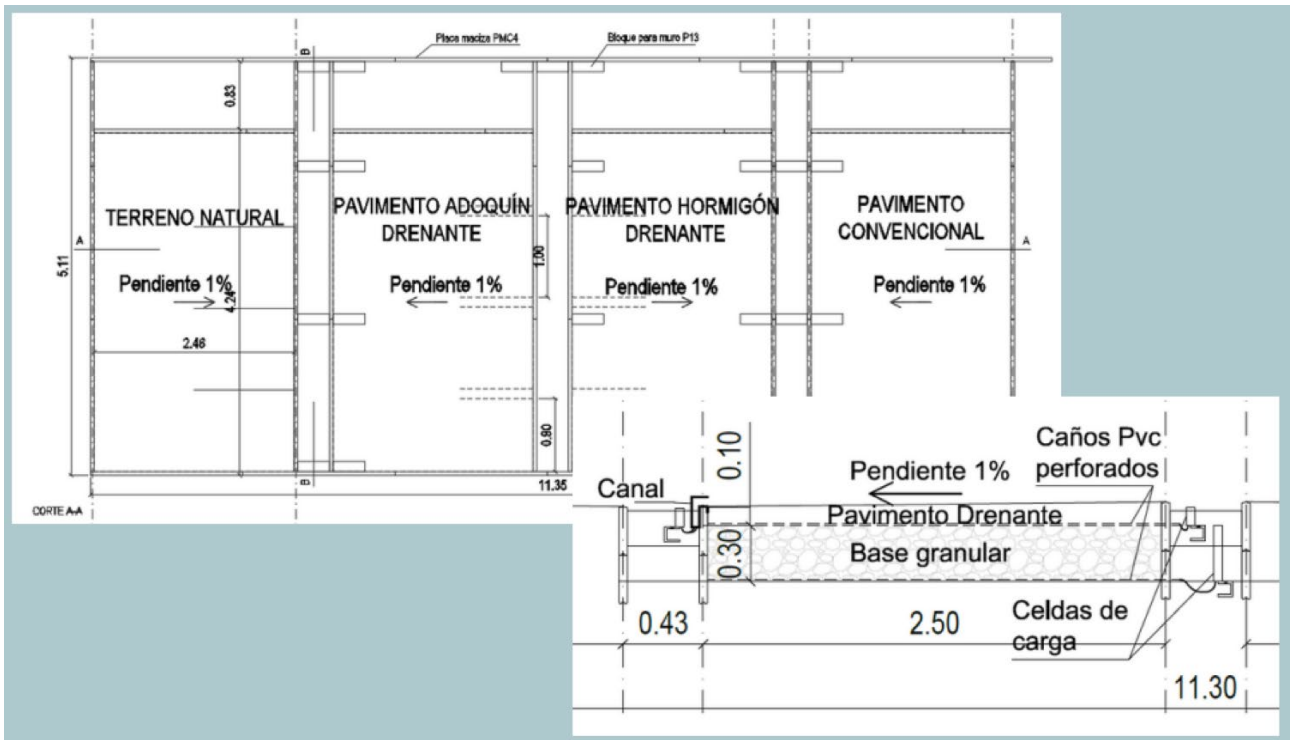


Fig.1 Esquema modelo simplificado in-situ



TERRENO NATURAL | PAVIMENTO DE H° DRENANTE ELABORADO | PAVIMENTO DE H° DRENANTE PREMOLDEADO | PAVIMENTO DE H° CONVENCIONAL

Fig. 2. De izquierda a derecha, evolución construcción modelo simplificado (10/2023 - actualidad).

- Condiciones de restitución: el área restituida quedará con los pavimentos comparativos, a nivel del estacionamiento existente y libre acceso (sin desnivel para acceder a los espacios de estacionamiento). Posterior a la restitución: se continuará con el monitoreo de los parámetros en el plan experimental de la esta tesis doctoral y los que surjan por el estado en servicio de los pavimentos. Dicho estudio no afectará el uso y funcionalidad de los espacios de estacionamiento.
- Estructura: en la Figura 3 se presenta la sección general de los pavimentos permeables.
  - Subrasante. El suelo es limo arcilloso de granulometría fina. A los fines de generar estabilidad y durabilidad de la estructura se llevaron a cabo las siguientes etapas: limpieza exhaustiva de la superficie, eliminando residuos, vegetación y escombros; nivelado preliminar; verificación y corrección de las pendientes para prevenir acumulación de agua que pueda comprometer la integridad de la subrasante; compactación mediante rodillo vibratorio para alcanzar la densidad requerida y asegurando que el suelo tenga las propiedades mecánicas apropiadas para soportar la carga del pavimento; control de humedad y densidad durante el proceso para cumplir con las especificaciones técnicas del diseño.
  - Base. En caso de los pavimentos permeables, 30cm de material granular triturado de 30 a 50 centímetros acomodado y compactado mediante rodillo.
  - Geotextil. Se coloca debajo de la base para actuar como un medio filtrante y estabilizar el suelo. También se coloca (opcional) entre la capa de hormigón drenante y el lecho de agregados drenantes.
  - Capa de rodamiento: 10 cm de hormigón H-25 para el pavimento de convencional, 12cm para pavimento de hormigón drenante elaborado y adoquines de 8cm para el pavimento de hormigón drenante premoldeado.

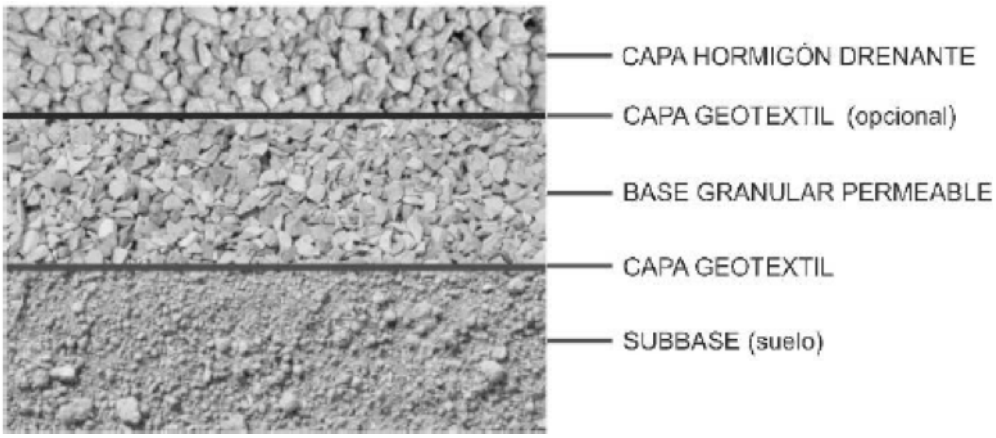


Fig. 3. Sección típica de un pavimento permeable.

- Sistema de adquisición de datos: es un dispositivo que recolecta datos al activarse mediante un sensor "reed switch" ubicado en el cangilón. Se compone de: Alimentación (fuente switching de 12 Voltios 3 Ampere de corriente continua + fuente step down que reducirá el voltaje a 5 voltios en la placa principal) – Control (ESP32, encargado de procesar la información) - Adquisición de datos (17 sensores: 12 medirán filtración y 4 escurrimiento, ambos de manera indirecta a través de unidad de peso y 1 medirá la lluvia precipitada mediante impulsos del cangilón) – Almacenamiento (tarjeta SD). En la Figura 4 se detalla el esquema de arquitectura de hardware.
- Monitoreo de variables estructurales e hidrológicas sobre modelo simplificado (cuencas independientes) a escala real. Se determinarán:
  - Precipitaciones - Hidrogramas de descarga en función del Escurrimiento y Caudales Picos registrados para determinar Coe-

ficientes de escorrentía, Tiempos de Concentración, etc - Niveles piezométricos en el paquete estructural
- Resistencia a compresión: se extrajo testigos sobre los que se realizaron ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días en los hormigones elaborados y módulo de flexión a 7 y 28 días en el hormigón premoldeado
- Temperatura superficial
- Capacidad de infiltración: se midieron mensualmente las tasas de filtración in situ de acuerdo con ASTM C1701/C1701M: Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de hormigón drenante in situ.

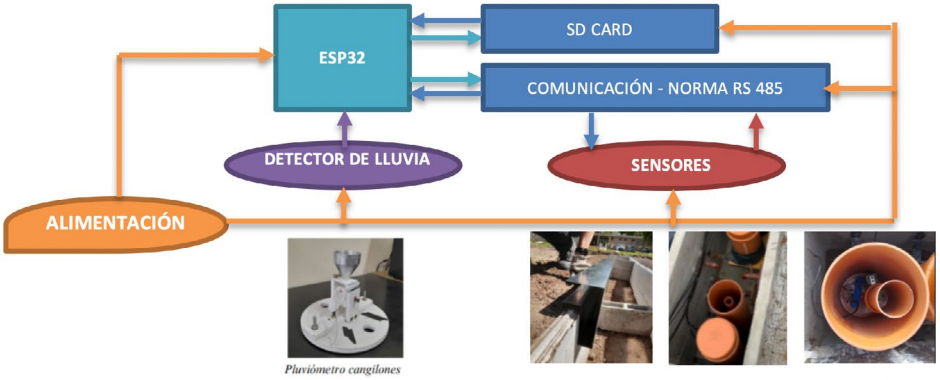


Fig. 4. Esquema de arquitectura de hardware

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 5 se resumen los resultados promedios de módulo de rotura del hormigón drenante premoldeado (adoquines) y la resistencia a compresión de la extracción de testigos versus probetas coladas a pie de obra del hormigón drenante elaborado y hormigón convencional.

En la Figura 5 se muestran los resultados de capacidad de infiltración hasta el momento sobre el modelo simplificado de pavimentos permeables.

		VALORES PROMEDIOS				MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPA)
		7		28		
		probeta testigo	probeta in-situ	probeta testigo	probeta in-situ	
Resistencia a compresión [MPa]	Hormigón drenante elaborado	17	21	15	21	17,43
	Hormigón convencional elaborado	23	25	25	28	23,75
Módulo de flexión [MPa]	Hormigón drenante premoldeado	-	2,0	-	2,3	-

Tabla 5. Resumen resultados promedios de ensayos mecánicos en cada hormigón

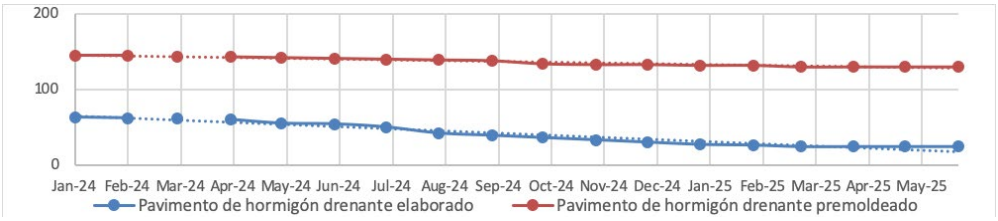


Fig. 5. Capacidad de infiltración en el tiempo en pavimentos permeables

CONCLUSIONES

Según los resultados preliminares obtenidos hasta el momento el pavimento de hormigón premoldeado mostró una capacidad de infiltración aproximadamente 3 veces superior en comparación con el elaborado, debido a la virtud de poder filtrar el agua también por la junta entre las piezas. Esto mismo se pudo confirmar cualitativamente observando los comportamientos de los paños durante

un evento de lluvia por lo cual se estima que el tiempo de escurrimiento será reducido. Se pudo apreciar la capacidad de almacenamiento intersticial en los pavimentos permeables demostrando una capacidad de retención temporal de agua en sus vacíos conectados, lo que puede beneficiar procesos de recarga subterránea y atenuación de caudales pico.

Respecto a las variables mecánicas indicaron que el pavimento hormigón drenante elaborado presenta una resistencia mecánica 20% menor respecto al convencional, principalmente debido a su mayor porcentaje de vacíos. En consecuencia, su módulo de elasticidad más bajo en el hormigón drenante elaborado, sugiere una menor capacidad de recuperación ante cargas repetidas, aunque con adecuada respuesta para aplicaciones de baja carga. Respecto al módulo de rotura del hormigón drenante premoldeado está dentro del requisito mínimo sugerido según norma IRAM 11662 para este tipo de adoquines de uso de bajo tránsito.

En síntesis, los pavimentos permeables serían adecuados para aplicaciones en condiciones donde la capacidad de infiltración y sostenibilidad urbana sean prioritarias y no se requiera una alta resistencia mecánica.

REFERENCIAS

Beaudry A, Lim YH (2014) Performance of Pervious Concrete on Runoff Reduction in Grand Forks, ND. World Environmental and Water Resources Congress 2014. https://doi.org/10.1061/9780784413548.016

Braswell AS, Winston RJ, Hunt, WF (2018) Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. Journal of Environmental Management 224:277–287. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.040

Crookes A, Drake J, Lotfy A (2015) Performance of Hydromedia-Pervious Concrete Pavement in Ontario Subjected to Urban Traffic Loads. International Low Impact Development Conference 2015. https://doi.org/10.1061/9780784479025.025

Schokker AJ. The sustainable concrete guide – strategies and examples. U.S. Green Concrete Council; 2010.

AVALIAÇÃO DO FATOR DE RETARDAMENTO DE COBRE E AMÔNIO EM ENSAIO DE COLUNA COM CALCÁRIO PARA APLICAÇÃO EM BARREIRAS REATIVAS PERMEÁ-VEIS

Liana C. C. Rocha[1], Lázaro V. Zuquette[1]
[1]Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 13566-590, São Carlos, Brasil.
Mail de contacto: lianaccr@usp.br

RESUMEN

A contaminação de águas subterrâneas por metais pesados e compostos nitrogenados é uma preocupação crescente. Barreiras reativas permeáveis (BRPs) com materiais de baixo custo, como o calcário, surgem como alternativa viável para tratamento in situ. Este estudo avalia a eficiência do calcário na remoção de íons Cu^{2+} e NH_4^+ por meio de ensaios em coluna com concentração inicial de 50. As curvas de ruptura mostraram que foram necessários cerca de 140 volumes de vazios (Vv) para o cobre atingir $C=C_0$, e 90 Vv para o amônio. O fator de retardamento, estimado pelo método do trapézio, foi de 30,8 (Cu^{2+}) e 22,5 (NH_4^+) para 50 mg/L, enquanto para o método de concentração relativa igual a 0,5, os valores determinados foram de 24 para o cobre e 15,5 para o amônio. Os valores de Rd indicaram uma clara preferência do calcário pela retenção do Cu^{2+} em comparação ao NH_4^+. Os valores de pH variaram entre 5,69 a 8,31, indicando que o calcário foi capaz de atuar na alcalinização do meio, enquanto a condutividade elétrica (CE), variou de 0,23 a 2,78 mS/cm, representando uma elevada concentração de íons dissolvidos. Os resultados evidenciam maior afinidade do cobre pelo meio reativo em comparação ao amônio e demonstram que o calcário é uma opção eficiente e econômica para aplicação em BRPs destinadas ao tratamento de plumas contaminadas por metais pesados e compostos nitrogenados.

Palabras clave: Calcário; barreira reativa permeável; fator de retardamento.

ABSTRACT

La contaminación de aguas subterráneas por metales pesados y compuestos nitrogenados es una preocupación creciente. Las barreras reactivas permeables (BRPs) con materiales de bajo costo, como la caliza, surgen como una alternativa viable para el tratamiento in situ. Este estudio evalúa la eficiencia de la caliza en la remoción de los iones Cu^{2+} y NH_4^+ mediante ensayos en columna con una concentración inicial de 50 mg/L. Las curvas de ruptura mostraron que fueron necesarios aproximadamente 140 volúmenes de vacíos (Vv) para que el cobre alcanzara $C=C_0$, y 90 Vv para el amonio. El factor de retardo, estimado por el método del trapecio, fue de 30,8 para el Cu^{2+} y 22,5 para el NH_4^+, mientras que por el método de concentración relativa igual a 0,5, los valores determinados fueron de 24 para el cobre y 15,5 para el amonio. Los valores de Rd indicaron una clara preferencia de la caliza por la retención de Cu^{2+} en comparación con NH_4^+. Los valores de pH variaron entre 5,69 y 8,31, lo que indica que la caliza fue capaz de actuar en la alcalinización del medio, mientras que la conductividad eléctrica (CE) varió de 0,23 a 2,78 mS/cm, representando una alta concentración de iones disueltos. Los resultados evidencian una mayor afinidad del cobre por el medio reactivo en comparación con el amonio y demuestran que la caliza es una opción eficiente y económica para su aplicación en BRPs destinadas al tratamiento de plumas contami-nadas por metales pesados y compuestos nitrogenados.

Keywords: Caliza; barrera reactiva permeable; factor de retardo.

INTRODUCCIÓN

A contaminação de águas subterrâneas por metais pesados e compostos nitrogenados tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada principalmente por atividades industriais, agropecuárias e disposição inadequada de resíduos. Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e economicamente viáveis para remediação dessas águas, especialmente em áreas onde o acesso a métodos convencionais de tratamento é limitado.

De acordo com Rocha e Zuquette (2020), as barreiras reativas permeáveis (BRPs) representam uma alternativa promissora para o tratamento in situ de plumas contaminadas, ao permitirem o fluxo natural da água subterrânea por meio de um meio reativo capa.z de remover ou imobilizar os poluentes presentes. Segundo Gavaskar (1999), a seleção adequada do material reativo é crucial para o desempenho das BRPs, sendo desejável que este possua baixo custo, disponibilidade local, compatibilidade hidráulica com o meio geológico e seja reativo o suficiente para promover a remoção para os contaminantes-alvo.

Nesse contexto, o calcário tem se destacado como uma opção atrativa devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo e propriedades que favorecem processos de precipitação e adsorção. Além disso, sua capacidade de elevar o pH das soluções contaminadas

pode potencializar a remoção de certos metais, como o cobre (Al-Falahi et al., 2023). Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do calcário na remoção de íons cobre (Cu^{2+}) e amônio (NH_4^+) por meio de ensaios em coluna, simulando o comportamento de uma BRP sob diferentes concentrações iniciais dos con-taminantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

O material geológico a ser considerado como núcleo da barreira reativa permeável é o calcário dolomítico, em sua forma natural, proveniente de jazidas localizadas na região de Rio Claro – SP/Brasil. Após a coleta, o calcário foi seco, triturado e peneirado em laboratório com a obtenção de partículas no intervalo de 0,07 a 2mm, resultando em condutividade hidráulica saturada da ordem de 8,79x10-7 a 4,87x10-6 cm/s, peso específico aparente seco variando de 15,74 a 18,12 kN/m^3, peso específico dos sólidos de 26,39 kN/m3 e CTC de 5,6 cmolc/kg.

Após a caracterização básica, colunas de PVC (de 15 cm de altura com diâmetro de 10 cm), foram preenchidas com amostras de calcário e utilizadas em ensaios de coluna com o objetivo de avaliar o fator de retardamento e a eficiência do material na remoção dos íons Cu^{2+} e NH_4^+. As soluções sintéticas utilizadas foram preparadas pela dissolução de sais de cloreto de cobre e cloreto de amônio em água destilada, com concentração inicial de 50 mg/L, e aplicadas nas colunas em fluxo descendente.

Durante os ensaios, amostras dos efluentes foram coletadas a cada volume de vazios para análise da concentração residual dos íons, e monitoramento do pH e condutividade elétrica. Ao final do ensaio, elaborou-se as *breakthrough curves,* a partir das quais foram obtidos os fatores de retardamento do calcário para cada um dos íons em análise (cobre a amônio), pelos métodos da con-centração relativa igual a 0,5 e da área acima da curva de chegada (trapézio), considerando o des-locamento da curva de ruptura em relação ao fluxo ideal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

As breakthrough curves obtidas para o cobre e amônio no ensaio de coluna com calcário são apre-sentadas na Figura 1. Conforme pode ser observado, foram necessários aproximadamente 140 volumes de vazios (Vv) para a solução do efluente de cobre igualar-se a concentração inicial, ou seja, C=C0, enquanto o amônio atingiu essa condição em 90 Vv. O fator de retardamento, Rd, determinado pelo método da concentração relativa igual a 0,5 também é apresentado na mesma Figura. Observa-se que o cobre o valor de Rd é igual a 24, enquanto para o amônio o valor de Rd é cerca de 15,5, evidenciando que o cobre sofre maior retardamento no calcário, possivelmente devido à sua maior afinidade com a matriz calcária por processos de adsorção ou precipitação.

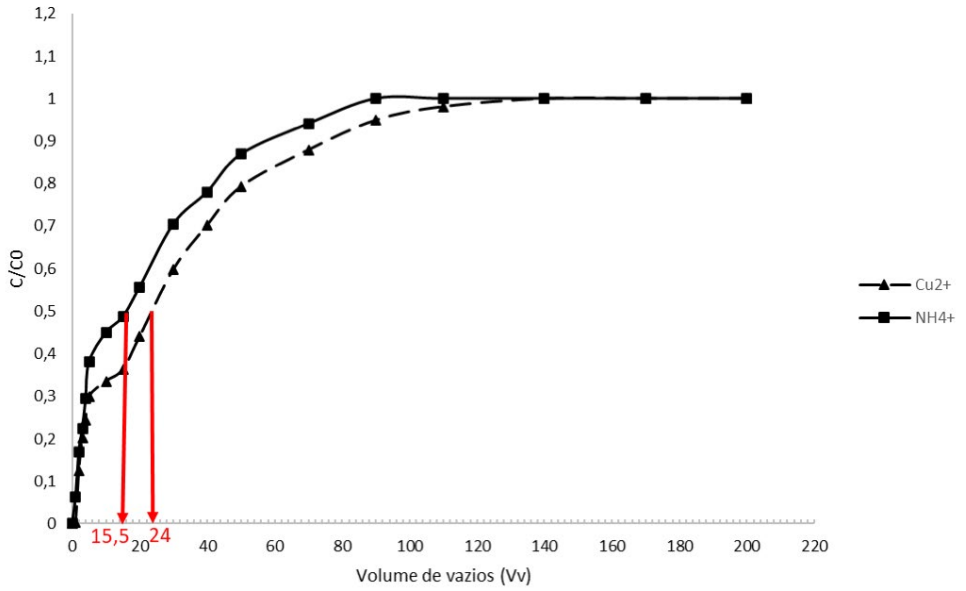


Fig. 1. Breakthrough curves para o cobre e amônio com os respectivos valores do fator de retardamento, Rd = C/C0 = 0,5

No entanto, quando se considera o cálculo de Rd a partir da área acima da curva de chegada (método que leva em conta o balanço de massa da concentração relativa ao longo do tempo) os valores de Rd obtidos foram superiores para ambos os íons, sendo 30,8 para o cobre (considerando a soma das áreas amarela e cinza) e 22,5 para o amônio (representado apenas pela área amarela). Essa diferença possivelmente está relacionada ao fato que o valor de Rd pelo método de C/C0=0,5 não considera o balanço de massa total, mas apenas um valor pontual dentro do ensaio, o que não reflete todos os processos que ocorrem ao longo do ensaio de coluna, especialmente ao se tratar de materiais como o calcário que atuam na remoção de contaminantes não apenas pelo processo de adsorção, mas também por fenômenos de precipitação. Dessa forma, optou-se por considerar o valor de Rd obtido a

partir da área acima da curva, já que este representa o balanço de massa real ocorrido no ensaio de coluna (SHACKELFORD, 1993).

Da mesma forma que observado no método de Rd=C/C0=0,5, o valor de Rd obtido para o cobre é maior do que o valor de Rd do amônio, indicando uma preferência de adsorção e maior afinidade do calcário pelo cobre do que para o amônio, como também relatado por Song et al. (2021), Hus-sain et al. (2007) e Peng et al. (2019)

Em relação aos valores de pH, o ensaio com solução de cobre apresentou valores de pH variando de 8,15 a 5,69, e para a solução de amônio o intervalo de pH ficou entre 8,31 e 6,05, indicando que em ambos os ensaios o calcário foi capaz de atuar na alcalinização do pH do meio, criando um ambiente propício para a ocorrência de precipitação, especialmente no caso de metais como o cobre. O aumento do pH causado pelo calcário favoreceu a remoção de Cu^{2+} por precipitação de hidróxidos e adsorção, enquanto o NH_4^+ foi removido por troca iônica.

Tratando-se da condutividade elétrica (CE), os valores obtidos foram bastante similares em si. No ensaio com calcário os valores de CE foram da ordem de 0,23 a 2,71 mS/cm, e para o amônio de 0,35 a 2,78 mS/cm, indicando uma elevada concentração de íons dissolvidos, condizente para o calcário.

CONCLUSIONES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o calcário apresenta desempenho signifi-cativo na remoção dos íons Cu^{2+} e NH_4^+ em ensaio de coluna, evidenciado pelas *breakthrough curves* e pelos respectivos valores de Rd. O cobre demonstrou maior tempo de permanência em solução, atingindo $C/C_0 = 1$ após cerca de 140 volumes de vazios (Vv), enquanto o amônio atingiu essa mesma condição em 90 Vv. Os valores de Rd determinados com base em $C/C_0 = 0,5$ foram de 24 para o cobre e 15,5 para o amônio. Em relação ao método da área acima da curva de chegada, os valores de Rd foram ainda mais elevados: 30,8 para o cobre e 22,5 para o amônio. Essa abordagem é considerada mais representativa, pois considera de forma mais precisa todo o ba-lanço de massa ocorrido no ensaio de coluna.

A tendência de maior Rd para o cobre se manteve em ambos os métodos, indicando uma clara preferência do calcário pela retenção deste íon em comparação ao amônio. Essa maior afinidade pode estar associada à natureza química do cobre e à capacidade do calcário de promover reações de precipitação em meio alcalino.

Em relação aos valores de pH e condutividade elétrica, observou-se que o calcário também atuou na neutralização da solução, promovendo um ambiente levemente alcalino, com valores variando entre 5,69 a 8,31, favorecendo a ocorrência de processos de remoção por precipitação, especialmente no caso de metais como o cobre. Os valores de condutividade elétrica (CE), por sua vez, variaram de 0,23 a 2,78 mS/cm, indicando uma elevada concentração de íons dissolvidos. Esses resultados são compatíveis com o comportamento esperado para ensaios com calcário, que naturalmente contribui com íons ao meio em função da sua solubilidade e reatividade.

Em suma, os dados obtidos demonstram que o calcário é um material viável para aplicação em barreiras reativas permeáveis (PRBs), com desempenho mais expressivo na remoção de cobre do que de amônio, atuando tanto por adsorção quanto por mecanismos de precipitação, com influên-cia positiva na estabilização do pH e comportamento compatível com sistemas de alta carga iônica.

AGRADECIMIENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro que permitiu o desenvolvimento deste trabalho por meio da concessão de bolsa de estudo nº 142156/2019-1.

REFERENCIAS

Al-Falahi, Hamid A.; Jabir, Ferdous A.; Al-Dahhan, Muthanna H. (2023). Soil Adsorption of Heavy Metals to Protect Groundwater Near Refinery Wastewater Discharge Points. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 18, no. 5, 1255-1260.

Gavaskar, A. R. Design and construction techniques for permeable reactive barriers. *Journal of Hazardous Materials*, v. 68, n. 1, pp. 41-71, 1999.

Hussain, Sabir et al. Physico-chemical method for ammonia removal from synthetic wastewater using limestone and GAC in batch and column studies. Bioresource technology, v. 98, n. 4, p. 874-880, 2007.

Rocha, L. C. C., Zuquette, L. V. (2020). Estudo de meio reativo para barreiras reativas permeáveis (brp): Ensaios laboratoriais. *Geociências*, v. 39, n. 4, 1025-1040.

Peng, Xilong et al. Removal of Cu (II) from wastewater using doped HAP-coated-limestone. Journal of Molecular Liquids, v. 293, p. 111502, 2019.

Shackelford, Charles D. Contaminant transport. In: Geotechnical practice for waste disposal. Boston, MA: Springer US, 1993. p. 33-65.

Song, Xuewen et al. Porous vaterite and cubic calcite aggregated calcium carbonate obtained from steamed ammonia liquid waste for Cu^{2+} heavy metal ions removal by adsorption process. Applied Surface Science, v. 536, p. 147958, 2021.

PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS EN LA PAMPA LOÉSSICA ALTA, CÓRDOBA, ARGENTINA. CASO DE ESTUDIO: CÁRCAVA DE HERNANDO

Gabriela A. Sacchi[1], Santiago M. Frulla[1,2], Matías Forno[1], Juan M. Casañas[3]
[1]Escuela de Geología, Facultad de Ciencias de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Ismael Bordabehere s/n, Córdoba, Argentina.
[2]GEO SUD, Av. Belgrano 673, Monte Buey, Córdoba, Argentina.
[3]Centro-Leibniz de Investigación del Paisaje Agrícola (ZALF), Grupo de Erosión de Suelo, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Alemania.
Mail de contacto: gsacchi@unc.edu.ar

RESUMEN
En este trabajo se propone analizar los procesos de erosión hídrica y determinar su impacto como fuente de sedimentos y degradación de suelos. El área de estudio se sitúa al oeste de la localidad de Hernando (Córdoba, Argentina), coordenadas 32°17' - 32°27' S y 63°43' - 64°18' O. El ambiente geomorfológico es definido como Pampa Loéssica Alta, estructuralmente corresponde a un bloque elevado o basculado, de la Plataforma Basculada, hacia el este por fallas geológicas del basamento profundo, cubiertos por depósitos de piedemonte y luego por una potente sedimentación eólica. Para cumplir tal fin, se analizó una serie temporal de datos satelitales, realizando composiciones color real de imágenes Landsat 8 OLI (período 2014-2022). Se calculó el Índice NDVI sobre el promedio de todas las imágenes para analizar la cobertura vegetal del terreno. Se identificaron unidades con procesos de erosión hídrica (loma a media loma alta) y unidades con procesos de sedimentación (media loma a bajo). Estos depósitos son definidos como un manto superficial de material de suelo nuevo sobre el epipedón existente del suelo enterrado, siendo indicadores de eventos recientes en el tiempo que afectan la productividad de los suelos. Estos procesos de degradación se intensificaron en el área por intervención antrópica, evidenciada por cambio en el uso del suelo, construcción de caminos a favor de la dirección regional de los escurrimientos y de obras de canalizaciones de excesos hídricos sin diagramación. Estos, sumados a eventos naturales de precipitaciones concentradas en el tiempo.

Palabras clave: degradación, suelos, datos satelitales.

ABSTRACT
This paper aims to analyze water erosion processes and determine their impact as a source of sediment and soil degradation. The study area is located west of the town of Hernando (Córdoba, Argentina), 32°17' - 32°27'S and 63°43' - 64°18'W. The geomorphological environment is defined as Pampa Loéssica Alta, structurally corresponding to an elevated or tilted block of the Plataforma Basculada, towards the east by geological faults of the deep basement, covered by piedmont deposits and then by eolian sedimentation. For this, a time series of satellite data was analyzed, creating true-color composites of Landsat 8 OLI images (2014-2022 period). The NDVI index was calculated on the average of all images to analyze the vegetation cover of the terrain. Units with water erosion processes (shoulder to upper backslope) and units with sedimentation processes (middle backslope to toeslope) were identified. These deposits are defined as a surface layer of new soil material over the existing epipedon of buried soil, indicating recent events that affect soil productivity. These degradation processes were intensified in the area by anthropic intervention, evidenced by changes in land use, road construction to downslope runoff and unplanned channels of excess water. These, in addition to natural precipitation events, are concentrated in time.

Keywords: degradation, soils, satellite data.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica constituye una fuerza geomorfológica fundamental que modifica significativamente los entornos terrestres e influye profundamente en la estabilidad y fertilidad del suelo en diversos paisajes ecológicos. Este proceso, impulsado por fuerzas hidrodinámicas, se inicia cuando el agua se desplaza o se infiltra en el suelo, transportando partículas y alterando el paisaje mediante diversos mecanismos, cada uno de los cuales contribuye de forma única a la degradación del suelo y la pérdida de tierras cultivables (Firoozi y Firoozi, 2024). Según Londoño Arango (2001), la degradación por el uso inadecuado de las tierras constituye uno de los grandes problemas que enfrenta la agricultura en el mundo. Eswaran et al. (2001) afirman que la degradación del suelo

continuará siendo una problemática mundial del siglo XXI debido a sus efectos adversos en la producción agrícola, medio ambiente, seguridad alimentaria y calidad de vida.

En Argentina, el área comprometida por procesos erosivos varió de 18 millones de hectáreas en 1956, a más de 64 millones en 2015, lo cual se manifiesta como uno de los principales impactos negativos en las regiones dedicadas a la explotación agrícola, como es el caso de la Región Pampeana (Somoza y Vázquez, 2023). En la región centro-sur de la provincia de Córdoba se han observado incrementos en las tasas de erosión, a pesar de la adopción generalizada del sistema de siembra directa. Esta práctica agrícola no ha logrado mitigar por completo los impactos resultantes de los cambios de uso del suelo, específicamente de ganaderos o mixtos a agrícolas puros. La erosión en cárcavas, junto a la de ríos y arroyos, es la principal fuente de generación de sedimentos en las cuencas del oeste de la provincia de Córdoba. Además, es el tipo de erosión hídrica más reconocido por los productores agropecuarios, ya que implica daños muy visibles en sus tierras y especialmente en los caminos rurales (Cisneros et al. 2014).

El objetivo del trabajo es contribuir al conocimiento de cómo los procesos de degradación, en particular la erosión hídrica y sedimentación, afectan a suelos de la provincia de Córdoba. Para tal fin se seleccionó un área con dicha problemática, donde se identificaron los factores controladores e intensificadores de estos procesos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se sitúa al oeste de la localidad de Hernando (Tercero Arriba, Córdoba, Argentina), coordenadas 32°17' - 32°27' S y 63°43' - 64°18' O. El ambiente geomorfológico es definido como Pampa Loéssica Alta, estructuralmente corresponde a un bloque elevado o basculado, de la Plataforma Basculada (Fig. 1). Para la caracterización de patrones de degradación y evaluación de procesos de degradación de suelo, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 OLI (período 2014-2022). Para visualizar, analizar y procesar las imágenes satelitales se utilizaron diferentes programas con licencia de software libre, se incluyen Qgis, Grass GIS, Google Earth Pro y la plataforma Google Earth Engine. Para analizar la condición de la cobertura vegetal del terreno y poder identificar cambios significativos que indiquen degradación, se calculó el Índice Normalizado de Vegetación Diferencial (NDVI) sobre el promedio de todas las imágenes analizadas. Los valores de NDVI varían entre -1 y 1, los valores más altos indican mayor densidad de vegetación y/o vegetación sana, y los más bajos menor densidad de vegetación y/o vegetación enferma. Para establecer una línea base del área de estudio, se utilizaron fotografías aéreas del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:20.000, del año 1972 y la Carta de Suelos de Hernando Hoja 3363-8 (INTA y MAGyRR, 1988).

El reconocimiento y la caracterización de suelos se realizó siguiendo las Normas de Reconocimiento de Suelo de Etchevehere (1976). Los suelos fueron clasificados según el sistema americano Soil Taxonomy (USDA 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sanabria, et al. (2004) describen la Plataforma Basculada diferenciada en dos subunidades: Plataforma Basculada Ondulada y Plataforma Basculada Plana. Jarsún et al. (2006) nombran esta área como Pampa Loéssica Alta. La primera subunidad incluye un

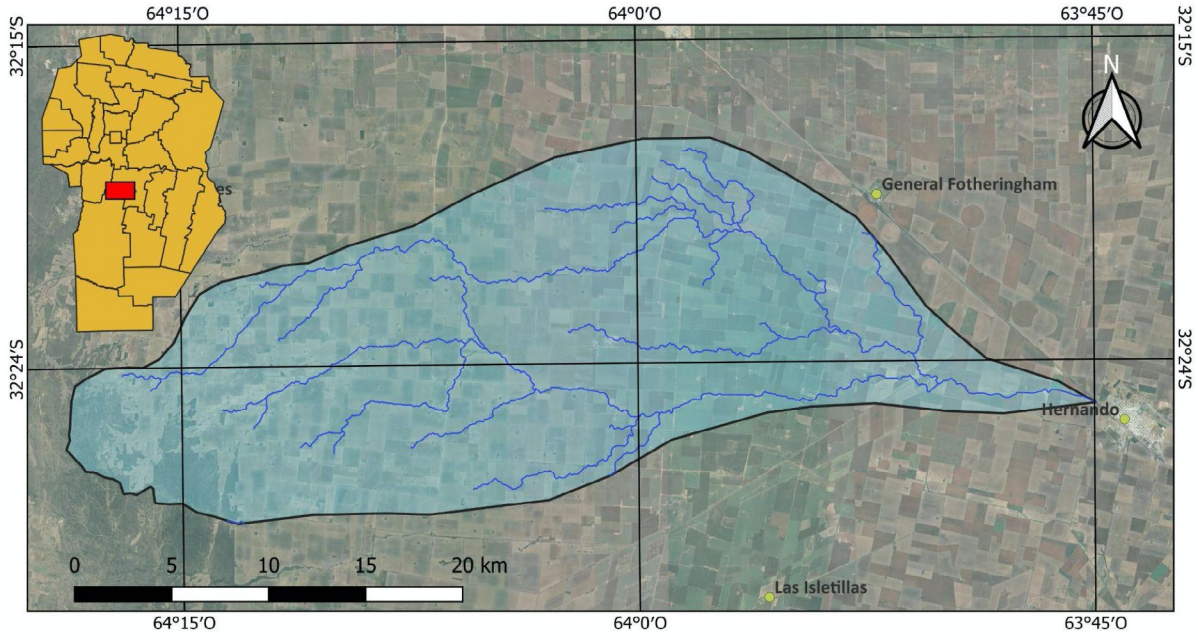


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

paisaje de lomas onduladas, alargadas en dirección oeste-este, que corresponden a conos aluviales diseccionados, probablemente del Plioceno-Pleistoceno, cubiertos por un manto de loess y loess retransportado de edad Pleistocene-Holoceno?. En este ambiente de Plataforma Basculada Ondulada, Sanabria y Argüello (2011), destacan un área (entre las localidades de Corralito y Oncativo, Córdoba, Argentina) afectada por procesos de erosión-sedimentación, en donde los suelos han visto disminuido su potencial agrícola, con el consiguiente perjuicio económico. Tal situación ambiental fue reconocida también en el área de estudio propuesta.

En el área de estudio, el análisis de imágenes satelitales generadas a partir del procesamiento digital (Stacking 2014-2022), permitió observar un patrón de tonalidades que se localiza principalmente alrededor del canal de desagüe (que atraviesa el área de estudio con dirección general oeste-este) y en ciertas partes de algunos caminos rurales. Dicho patrón también se identificó en la imagen NDVI generada (2014-2022), permitiendo delimitar tres unidades. En estas, se caracterizaron los suelos mediante una transecta, donde se identificaron tres situaciones de degradación asociadas al perfil típico de la serie Monte Alto definida en la carta de suelos (INTA y MAGyRR, 1988). En la unidad 1, (loma-media loma alta, valores de NDVI cercanos a 0,24), el perfil típico representativo regionalmente corresponde al Haplustol éntico, franca gruesa, Monte Alto (MA1), con epipedón mólico, espesor mayor a 18 cm, value y chroma de 3 o menos, en húmedo, y de 5 o menos, en seco; y COx (carbono orgánico oxidable) mayor a 0,6 %. En la unidad 2 (media loma, valores de NDVI entre 0,2 - 0,18) y unidad 3 (pie de loma hacia el bajo, valores de NDVI entre 0,18 - 0,16). En estas dos últimas unidades, los suelos fueron clasificados taxonómicamente como Ustorthent thapto mólico. En las unidades 2 y 3 respectivamente, la serie Monte Alto, se encuentra enterrada por una capa de sedimentos identificada como horizonte A, con un espesor de 52 cm (MA2) y 78 cm (MA3). Las características edáficas, corresponden a un epipedón ócrico, con espesor mayor a 18 cm, value y chroma de más de 3 en húmedo, y de más de 5, en seco; y COx mayor a 0,6 %. Desde el punto de vista taxonómico, es factible definir esta capa como un "manto superficial de material de suelo nuevo", que conserva una estratificación fina producto del episodio de sedimentación. De acuerdo al USDA (2022), cuando una secuencia de horizontes genéticos se encuentra cubierta por un manto superficial de material de suelo nuevo con un espesor mayor a 50 cm, se considera un suelo enterrado. La incorporación del subgrupo taxonómico "thapto", indica la presencia de una discontinuidad pedológica en el perfil, diferenciando así dos entidades: el suelo actual y el suelo enterrado (suelos complejos). Estos suelos no pueden considerarse como paleosuelos, sino como indicadores de actividades y perturbaciones antropogénicas ocurridas en épocas mucho más recientes generados con condiciones climáticas y ambientales que no son distintas a las actuales (Sanabria y Argüello, 2011). Desde el punto de vista pedológico, se puede inferir que la sedimentación ocurrió de manera repentina, ocasionando un impacto negativo al cubrir las tierras fértiles con material de baja calidad y provocar daños por el enterramiento repentino de cultivos (Zachar, 1982). La erosión del suelo representa la etapa inicial dentro del proceso de sedimentación, que abarca los sucesos secuenciales de erosión, transporte y deposición (Shekar y Mathew, 2024). Este proceso constituye una de las formas más comunes de degradación de suelos originada por una combinación de factores naturales y antrópicos.

Las imágenes de fotografías aéreas de la zona de estudio del año 1972, presentan las características físicas del entorno definida como línea base. En las mismas, el diseño de drenaje original es de tipo radial, concéntrico y no se identifica ninguna obra de infraestructura para la concentración de excedentes hídricos (canal de desagüe). En la descripción de perfiles de suelos de la Hoja 3363-8 Hernando publicada en el año 1988, tampoco se mencionan los procesos de degradación identificados en este estudio. En imágenes disponibles en Google Earth Pro, recién a partir del año 2004 se comienzan a identificar estos procesos.

En el área de estudio, se ha experimentado un cambio significativo en el uso del suelo en los últimos cien años. A principios del siglo XX, la superficie agrícola del departamento Tercero Arriba representaba solo el 12% de la superficie total. Actualmente esta superficie agrícola aumentó significativamente, alcanzando el 95% de la superficie total del departamento. Este cambio en el uso del suelo puede estar relacionado con la introducción de tecnologías agrícolas más modernas y con políticas de incentivo para la producción de granos.

Del análisis de precipitaciones medias para un registro de los años 1920-2022 y del valor de la media histórica del área de estudio (770,6 mm). Se concluye que, en las décadas de 1920, 1930, 1950, 1990 y 2010 las medias se posicionaron por encima de la media histórica. Por otro lado, en las décadas de 1940, 1960, 1970, 1980, 2000 las medias se encontraron por debajo de la media histórica. Los eventos de inundación que se han registrado en la localidad de Hernando fueron en los años 1960, 1976 y 1978 a pesar de que las precipitaciones se encuentran por debajo de la media. Estos eventos podrían ser atribuidos a fenómenos de gran intensidad, los cuales, junto con los cambios en el uso del suelo modificaron los escurrimientos superficiales de la cuenca, desencadenando fenómenos difíciles de predecir. Durante la década de los noventa, se registró una media superior a la media histórica, siendo el año 1993 particularmente problemático, debido a que se produjeron tres inundaciones consecutivas, en un lapso de 15 días, que cubrieron casi la totalidad de la ciudad de Hernando con agua y barro. Por esta razón, en 1994 se construyó el canal derivador pluvioaluvional sur, diseñado para capturar los excedentes hídricos de las zonas rurales y transportarlos hacia el arroyo Tegua al sur de la localidad de Hernando. Para la década de 2010, en el año 2013 se registró otra gran inundación. En noviembre de 2017 la municipalidad de Hernando, junto a la Secretaría de Recursos Hídricos del gobierno de la provincia de Córdoba, el Consorcio Caminero N° 38 Hernando y empresas privadas, llevaron a cabo una importante obra de profundización y ensanchamiento del canal derivador sur.

De los factores analizados, se puede concluir que los procesos de degradación fueron desencadenados por la eliminación de la vegetación nativa, uso y manejo de tierras. Estos favorecieron el incremento de los escurrimientos superficiales y junto con la canalización de los excedentes hídricos modificaron la dinámica de los flujos superficiales. Los escurrimientos provenientes de los sectores altos de la cuenca disminuyen su velocidad al llegar al área de estudio, debido a cambios en la pendiente regional y/o

factores como microrelieve, vegetación y presencia de obstáculos (ej.: infraestructuras, alambrados, cruce de caminos, límites entre lotes, alcantarillas, molinos, etc.).

Esta situación favorece la iniciación de los procesos de sedimentación. Las grandes cantidades de sedimentos que aportan los sistemas de cárcavas ubicados en las partes altas de la cuenca se encuentran colmatando los sectores topográficamente más bajos del área de estudio, ejemplo son las unidades donde fueron definidos los suelos MA2 y MA3. En consecuencia, la hidrología superficial está sufriendo una transformación significativa, donde los caminos y canales diseñados por el hombre, se han convertido en las principales vías de escurrimiento. Esta situación tiene un impacto notable en el proceso de sedimentación, especialmente cuando el flujo concentrado que circula por el interior del canal supera su capacidad de transporte. La falta de mantenimiento de los mismos contribuye a los desbordes y al depósito de material en las áreas adyacentes.

CONCLUSIONES

La metodología de stacking o apilamiento de imágenes satelitales, junto con el tratamiento de imágenes, permitió identificar unidades ambientales con diferentes niveles de degradación, en función de la intensidad de procesos de erosión hídrica y sedimentación. Estos procesos tienen como consecuencia la afectación de obras de infraestructura y la capacidad productiva de los suelos. La clasificación taxonómica de los suelos refleja estos procesos de degradación diferenciados mediante el uso del calificativo thapto, el cual indica la existencia de una discontinuidad pedológica causada por el enterramiento del suelo típico.

REFERENCIAS

Cisneros, J., C. Cholaky, A. Gutierrez, J. Gonzalez, M. Reynero, A. Diez y L. Bergesio. (2012).

Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo. UniRío Editora.

Etchevehere, P. (1976). Normas de reconocimiento de suelos. Castelar, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Dpto. de Suelos. Publicación N° 152.

Eswaran, H., R. Lal y P. Reich. (2001). Land degradation: An overview. Bridges, E., Hannam, I., Oldeman, L., Pening de Vries, F., Scherr, S. y Sompatpanit, S. (Eds) (2001). Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification. Khon Kaen, Thailand: Oxford Press.

Firoozi, A. y Firoozi, A. (2024). Water erosion processes: Mechanisms, impact, and management strategies. Results in Engineering 24, 1-22. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103237

INTA y MAGyRR. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, MA; Ministerio de Agricultura, Ganaderia y Recursos Renovables. (1988). Cartas de Suelos de Córdoba Hoja 3363-8 Hernando. https://suelos.cba.gov.ar/HERNANDO/index.html

Londoño Arango, C. (2001). Cuencas Hidrográficas: Bases Conceptuales. Caracterización, Planificación, Administración. Facultad de Ingeniería Forestal Departamento De Ingeniería. Universidad Del Tolima, Ibagué. Material didáctico.

Sanabria, J. y Argüello, G. (2011). Buried Soils at the Plataforma Basculada Ondulada (undulated tilted platform) in Central Region of Córdoba Province, Argentina. Geociências 30, 23-29. https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/30_1/Art%2003_Sanabria.pdf

Shekar, P. y Mathew, A. (2024). Assessment of soil erosion and sediment yield in the Peddavagu watershed, India, using a revised universal soil loss equation model (RUSLE) and GIS techniques. Journal of Water and Climate Change 15, 31-38. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.010

Somoza, A. y Vázquez, P. (2023). Erosión hídrica e intensificación agrícola considerando unidades ambientales. El caso de Tandil, Región Pampeana Argentina. Cuadernos Geográficos 62, 273-299. http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v62i1.24561

USDA. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th ed. Washington, DC: USDA Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf

Zachar, D. (1982). Soil Erosion. Developments in Soil Science 10. Elsevier.

CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS NATURALES EN LA LOCALIDAD DE LA PUNTA (PROVINCIA DE SAN LUIS) PARA EL DISEÑO DE PROPUESTAS DE ORDENAMIENTO URBANO

Daniel A. Sales[1], Carlos E. Gardini[1], Hernán Garro[1], Luciano Chiarotto[1]
[1]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: sales@unsl.edu.ar

RESUMEN
La ciudad de La Punta se sitúa sobre el piedemonte occidental del extremo sur de la sierra de San Luis, conformada principalmente por complejos habitacionales desarrollados por el gobierno de la provincia de San Luis. Esta localidad desde su fundación en el año 2003, desarrolló un sostenido avance demográfico, invadiendo áreas de drenaje natural, con la consecuente eliminación de cauces secundarios y, la obstaculización y desvíos de algunos de los cauces principales.
Los eventos pluviales son los disparadores principales de los problemas que afectan a la población, generando inundación, erosión y procesos de inestabilidad en las márgenes de los principales arroyos.
En este trabajo se presenta el diseño de la red hidrográfica y su relación con las construcciones actuales, el análisis de pendiente de la zona, a fin de analizar posibles inconvenientes para esta comunidad, por las futuras precipitaciones torrenciales.
Lo expuesto, es una propuesta para confeccionar un nuevo diagrama de ordenamiento territorial, respetando las áreas de drenaje natural. La falta de mantenimiento y limpieza en los cauces por debajo de alcantarillas y puentes, complican la normal evacuación y conducción del agua.

Palabras clave: procesos naturales - inundación – erosión – La Punta

ABSTRACT
The city of La Punta is located on the western piedmont of the south of the San Luis mountain range, formed of housing complexes developed by the government of the province of San Luis. Since its founding in 2003, this town has experienced sustained demographic growth, resulting in a decrease in natural drainage areas, due to the elimination of secondary causes and the obstruction and detours of some the main channels.
Rainfall events are the main triggers of the problems affecting the population, generating flooding, erosion, and instability along the margins of the main channels.
This paper presents the design of the hydrographic network and its relationship with current construction, which requires analyzing possible inconveniences for this community due to torrential rainfall due to the local slope.
The above is a proposal for creating a new land use plan, respecting natural drainage areas. The lack of maintenance and cleaning of drainage beneath culverts and bridges complicates the normal evacuation and conduction of water.

Keywords: Natural processes – flood – erosion – La Punta

INTRODUCCIÓN

El área de estudio se localiza sobre el piedemonte occidental del extremo sur de la sierra de San Luis, aproximadamente a 20 km al norte de la Ciudad capital, en el Departamento Juan Martín de Pueyrredón (Prov. de San Luis), siendo sus vías de accesos desde la Ciudad de San Luis por la Ruta Nacional (RN) N° 146 y la Autopista 25 de Mayo (Fig. 1).

Según el último censo poblacional (INDEC, 2022), esta localidad alberga a 21.873 habitantes, que habitan núcleos habitacionales construidos por el gobierno provincial desde su fundación en el año 2003. Esta región en el año 2001, fue afectada por lluvias torrenciales en un período corto de tiempo, típicas de un período de retorno de 500 años. Los testimonios de los trabajadores de la construcción de las viviendas sociales describieron los problemas ocasionados por las escorrentías pluviales generando inundación en sectores de construcción de las viviendas y en calles, generando procesos erosivos y su posterior carcavamiento, registrados hasta la actualidad en zonas no pavimentadas (Sales et al., 2017).

Posteriormente, Tobarez et al. (2018), analizaron las cuencas del arroyo Suyuque Viejo y Paso de la Muerte, donde describieron la



Fig. 1. Imagen ubicación de la localidad de La Punta respecto de la Ciudad de San Luis (Imagen modificada del Google Earth)

relación de ambas cuencas en relación con el riesgo de inundabilidad en la localidad de La Punta.

En esta contribución, se destaca la conformación de la red de drenaje, tanto de orden secundarios como los principales cauces representados por los arroyos Paso de la Muerte, Suyuque Viejo y Cañada (Fig. 2). Se identificaron en terreno los procesos erosivos provocados por las avenidas de agua en calles y cauces, además de constatar la falta de mantenimiento en zonas de alcantarillas y puentes, con la amenaza de desbordes de los mismos.

A fin de interpretar el sistema de escorrentías naturales que tenía la zona de estudio previo al inicio de la urbanización y posterior (Fig. 2), donde fueron desviados e interrumpidos de sus áreas de aporte.

El desarrollo de los procesos de erosión como consecuencia de las avenidas de aguas pluviales, sin lugar a duda estaban directamente vinculadas a la pendiente del piedemonte con promedio de 2° hacia el oeste, que generaba un aumento en la velocidad del

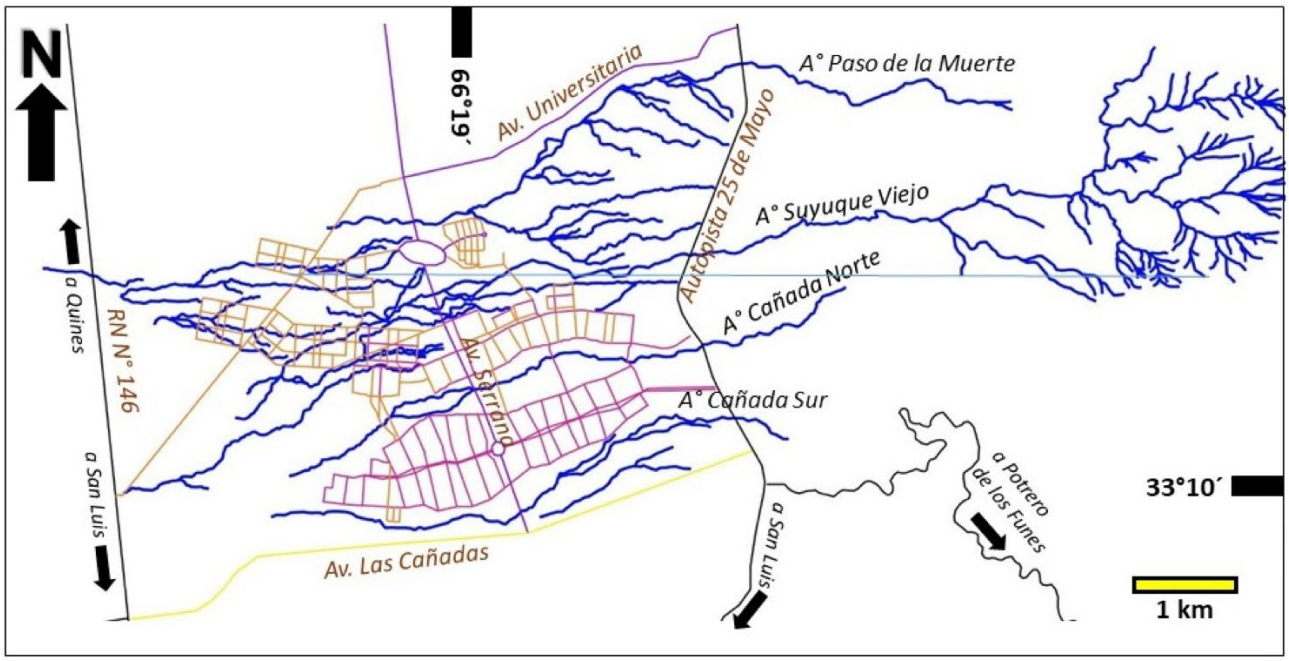


Fig. 2. Croquis ubicación de la urbanización de la localidad de La Punta con respecto al drenaje natural, con la interrupción de cauces secundarios

flujo de agua y desarrollaban cárcavas en los tramos paralelos a la pendiente. Esto tiene su causa también en el retiro del bosque y la carpeta vegetal que ayudaba a mantener controlada la erosión.

A fin de analizar la pendiente de la zona de estudio, se realizaron tres perfiles a lo largo de la pendiente que involucra el frente serrano y el piedemonte, con la finalidad de determinar las características topográficas generales de la localidad (Fig. 3). De los datos obtenidos se confeccionaron los parámetros topográficos de la Tabla 1.

	PARÁMETROS	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3
Longitud (Km)	Perfil A-A´	12,7	11,8	8,4
	Perfil A-i (piedemonte)	8,25	7,3	6,75
	Perfil i-A´(ladera)	4,45	4,5	1,65
Cota (m s.n.m.)	Pto. A	732	729	719
	Pto. A´	2.050	1.883	1.260
	Sector quiebre de pendiente	976	950	902
Pendiente (grados)	Ladera	14°	12°	12°
	Piedemonte	2°	2°	2°

Tabla 1. Parámetros utilizados para la determinación de la pendiente

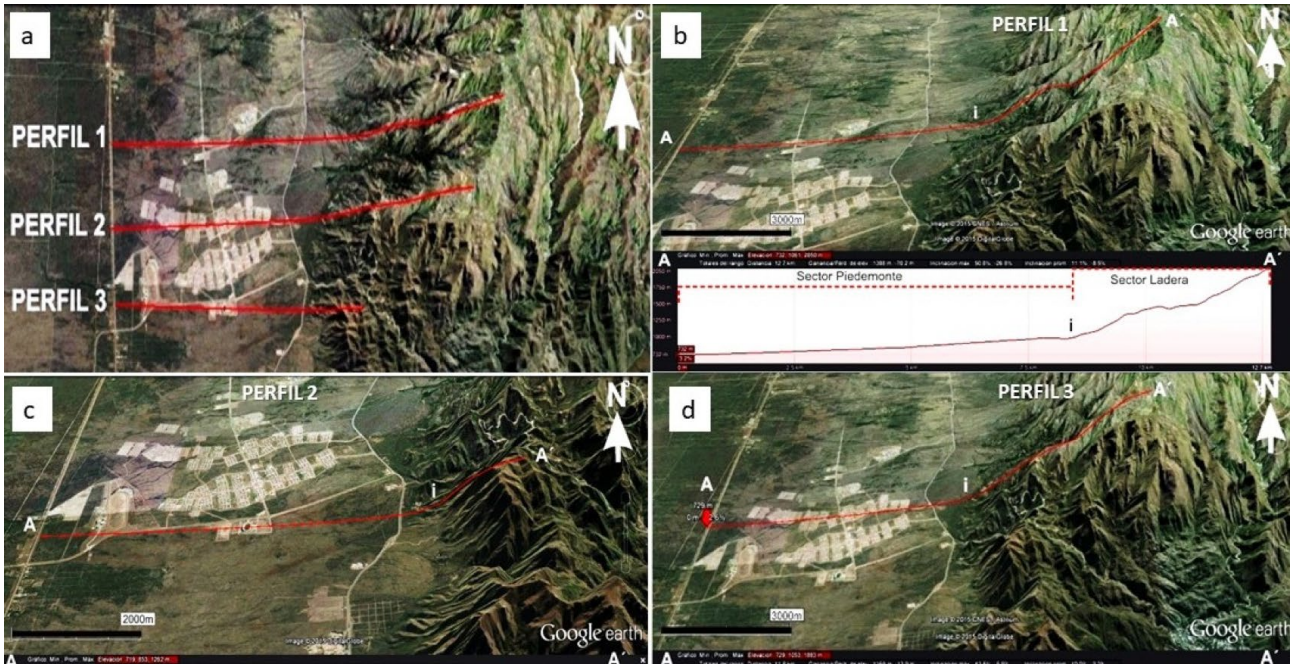


Fig. 3. Perfiles topográficos este – oeste que muestra la relación del frente serrano y el piedemonte

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la interpretación de los procesos naturales analizados en diferentes oportunidades en la localidad, como consecuencia de las avenidas de agua a posteriori de lluvias mayores a 30 ml, se utilizaron imágenes del programa Google Earth y DEM (Digital Elevation Model), que con ayuda del software QGIS, se desarrollaron las imágenes del presente informe.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de pendientes se infiere que el piedemonte occidental en el sector de quiebre de pendiente hasta la ruta nacional N° 147, presenta 2° de inclinación promedio.

Se interpreta que las condiciones geotécnicas del material sedimentario del nivel superficial, es afectado por la velocidad de las escorrentías pluviales siguiendo la pendiente natural, lo que hace suponer, que en momentos de lluvias torrenciales, el proceso erosivo de las calles de tierra y cauces principales, seguirán desarrollando procesos de carcavamiento.



Fig. 4. Vista hacia el sur de un sector del cauce A° Cañada, donde se observa la inestabilidad de las márgenes y su ensachamiento por erosión retrocedente

Se observó en los cauces principales, el retroceso de sus márgenes por erosión pluvial, producto del caudal de agua que recoge de las zonas de calles, donde antes de la urbanización drenaban en la zona en forma de manto y por los cauces secundarios a lo ancho de la localidad de La Punta, no solo por desborde de los arroyos principales sino la distribución areal de las precipitaciones.

Los datos obtenidos en la medición de las principales alcantarillas y puentes de la localidad, éstas se encuentran sin tratamiento de limpieza del material depositado (Fig. 5), lo que disminuye el espacio de canalización de las aguas y su posible desborde en ocasiones de lluvias torrenciales.

La pregunta que surge es: ¿está preparada esta localidad para una lluvia extraordinaria con período de retorno mayor a 50 años?

CONCLUSIONES

La pendiente de la zona y la escasa área de drenaje de las avenidas de agua, concentran los flujos en los escasos canales naturales que atraviesan la localidad provocando mayor concentración de material sedimentario en puentes y alcantarillas y desarrollando procesos erosivos, en un ambiente de recarga de la sierra con cuencas que tienen importantes pendientes en sus nacientes por la altitud del frente de levantamiento occidental de la sierra de San Luis.



Fig. 5. Falta de mantenimiento por debajo de obras de canalización, por relleno de sedimentos y bloques, reduciendo el espacio de escurrimiento. a) Puente sobre el arroyo Suyuque viejo en la autopista 25 de Mayo, b) Alcantarilla sobre la Av. Serrana, en el sector norte de la localidad

REFERENCIAS

Sales, D., Espinosa, C., Tobarez, M.A., Sales, G., Cisnero, H., Denaro, J., Garro, H., Chiarotto, L., Villegas, J. y Herrera Sánchez, F. (2017). Caracterización de riesgos naturales en el piedemonte occidental de la sierra de San Luis, a los 33°08´ S - 33°14´S. 12° Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra (E-ICES 12). Actas Resúmenes, ISBN 978-987-1323-61-6, pág. 429 – 434. Mendoza.

Tobarez, M.A., Morla, P. y Sales,D. (2018). Las cuencas del arroyo Suyuque Viejo y Paso de la Muerte: su relación con el riesgo de inundabilidad en la localidad de La Punta, Provincia de San Luis. 1° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Actas (Tema 9), en CD, ISBN N° 978-987-21766-5-5, 3 pág. Ciudad de San Luis.

CARACTERIZACIÓN EN TIEMPO REAL BASADA EN GEOLOCALIZACIÓN WEB DEL TERREMOTO DE CALAFATE DEL 13 DE OCTUBRE DE 2021

Horacio Sanchez[1,2], Nicolás Varese[1], Daniel Gallardo[1], Alberto Domínguez[1]
[1]Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), Roger Balet Norte 47, San Juan, San Juan, Argentina
[2]Dpto. de Informática, FCEFyN, UNSJ, Av. Ignacio de la Roza Oeste 590, Rivadavia, San Juan, Argentina.
Mail de contacto: hsanchez@inpres.gob.ar

RESUMEN

En el marco del Programa de Investigación IntenSA (Intensidad Sismológica Argentina), el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) facilita a los usuarios de su sitio web oficial la posibilidad de reportar, mediante tecnología de geolocalización basada en HTML5, sus percepciones sobre movimientos sísmicos. Estos reportes, tras un análisis exhaustivo y en tiempo real, permiten inferir la ocurrencia de eventos sísmicos y de otros posibles orígenes.

Desde 2016, el INPRES ha desarrollado herramientas computacionales simples, pero eficaces, y algoritmos ágiles de registro y análisis para complementar la caracterización de eventos sísmicos.

Un caso destacado de esta metodología tuvo lugar a las 04:55 (hora local, UTC−3) del 13 de octubre de 2021, con el terremoto ocurrido en El Calafate, provincia de Santa Cruz. Algunos minutos después del evento, y gracias a los 1.487 reportes registrados, se inició su determinación manual. Este logro fue particularmente significativo dada la limitada cobertura de la Red Nacional de Mo-ni-toreo Sísmico en esa región en la fecha de ocurrencia. El análisis detallado de los reportes permitió estimar el alcance del evento en términos de población afectada y áreas de percepción, además de proporcionar datos adicionales cruciales para la caracterización complementaria en tiempo real del terremoto. Este acontecimiento marcó un hito en el uso de técnicas de geolocalización para el estudio sismológico, especialmente en zonas de escasa cobertura de monitoreo.

En julio de 2021, el INPRES, en colaboración con la Dirección de Protección Civil de la Provincia de Santa Cruz, impartió una capacitación innovadora a nivel provincial. Durante esta formación, se abordaron conceptos teóricos y aplicaciones prácticas de geolocalización en el ámbito sismológico. La capacitación permitió verificar la eficacia del proceso integral de caracterización, que abarca desde la difusión hasta la generación de reportes y análisis originados por el estímulo que representa un evento sísmico en la población.

Palabras clave: Geolocalización web, Percepción Ciudadana, Caracterización de sismos.

ABSTRACT

As part of the IntenSA Research Program (Argentine Seismic Intensity), the National Institute for Seismic Prevention (INPRES) provides users of its official website with the ability to report their perceptions of seismic events through HTML5-based geolocation technology. These reports, after thorough and real-time analysis, allow for the inference of seismic events and others of potential non-seismic origin.

Since 2016, INPRES has developed simple yet effective computational tools and agile algorithms for data collection and analysis, designed to complement the characterization of seismic events.

A noteworthy application of this methodology took place at 04:55 (local time, UTC−3) on October 13, 2021, during the earthquake that occurred in El Calafate, Santa Cruz Province. Just minutes after the event, and thanks to the 1,487 reports submitted, manual determination of the event began. This achievement was particularly significant given the limited coverage of the National Seismic Monitoring Network in that region at the time. A detailed analysis of the reports made it possible to estimate the impact of the event in terms of affected population and perception areas, and to provide critical complementary data for the real-time characterization of the earthquake. This event marked a milestone in the use of geolocation techniques in seismological studies, es-pecially in regions with low monitoring coverage.

In July 2021, INPRES, in collaboration with the Civil Protection Directorate of the Province of Santa Cruz, delivered an innovative training course at the provincial level. The training addressed both theoretical concepts and practical applications of geolocation in the field of seismology. It allowed for the verification of the effectiveness of an integrated characterization process, encompassing all stages — from outreach to the generation of reports and analyses triggered by the stimulus that a seismic event represents for the population.

Keywords: Web geolocation, Citizen perception, Earthquake characterization

INTRODUCCIÓN

El monitoreo sísmico en Argentina plantea un desafío técnico y logístico de alta complejidad, dada la extensión territorial del país, su heterogeneidad geológica y la existencia de múltiples zonas sismogénicas activas. Frente a este escenario, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) cumple una función estratégica en el diseño, operación y mantenimiento de redes instrumentales sismológicas, destinadas a la detección, registro y análisis de eventos sísmicos, en tiempo cuasi real.

Desde una perspectiva sismológica, estas redes constituyen la base operativa para la localización hipocentral precisa, la estimación de parámetros fuente y la modelización de la propagación de ondas sísmicas en medios geológicos complejos. Además del monitoreo instrumental clásico, en los últimos años el INPRES ha promovido algunas líneas de investigación orientadas a la incorporación de tecnologías emergentes, con el objetivo de optimizar la respuesta operativa ante eventos sísmicos y mejorar la resiliencia de la sociedad frente al riesgo sísmico.

En este marco, la labor de la Unidad de Tecnologías Informáticas (Unidad TI) ha sido fundamental para la modernización de los sistemas de información sísmica, particularmente mediante el desarrollo de una plataforma digital basada en los principios de la Web 2.0, que permite interactividad, comunicación bidireccional y participación del usuario. Desde el punto de vista científico y tecnológico, esta iniciativa implica evaluar la viabilidad técnica y el impacto funcional de integrar tecnologías web interactivas con sistemas de procesamiento sísmico, en busca de una mayor eficiencia en la comunicación de datos sísmicos y la gestión de alertas y notificaciones.

Uno de los ejes centrales de esta estrategia es el fortalecimiento del acceso abierto a datos sísmicos y la promoción de herramientas digitales que faciliten la alfabetización sísmica de la población, incluyendo módulos de visualización interactiva, mapas en tiempo real y formularios ciudadanos para reportes de percepción sísmica (macrodatos). Este enfoque promueve una sinergia entre el conocimiento científico, la tecnología y la sociedad, ampliando el alcance del monitoreo sísmico desde un plano exclusivamente técnico hacia una dimensión más participativa e inclusiva.

La incorporación de tecnologías Web 2.0 en los sistemas institucionales de monitoreo sísmico representa una innovación regional que fortalece el vínculo entre ciencia y sociedad, promueve la concientización sobre el riesgo sísmico y contribuye a la gestión del riesgo mediante una mayor accesibilidad, transparencia y eficacia comunicacional. Esta estrategia favorece la apropiación social del conocimiento sismológico y el desarrollo de comunidades más resilientes.

El INPRES lleva adelante dentro de programa de investigación IntenSA (Intensidad Sismológica Argentina), el Proyecto GeoLoc (fase de geolocalización web) iniciado en el año 2016. Este proyecto viene desarrollando y evolucionando un conjunto de interfaces, algoritmos y procesos automatizados que permiten a los sismólogos obtener nuevas series de análisis y caracterizaciones complementarias de sismos a partir de la aplicación de geolocalización web en el ámbito de la sismología. Uno de los aportes principales de este proyecto es el desarrollo del Sistema IntenSA, el cual se presentará parcialmente en el presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La vigilancia permanente de la amenaza sísmica en la República Argentina constituye un pilar estratégico del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). Con el propósito de registrar, analizar y comprender la actividad tectónica del país, se ha desplegado la Red Nacional de Monitoreo Sísmico (RNMS), una infraestructura instrumental de amplia cobertura que integra ~150 estaciones equipadas con acelerómetros y sismómetros distribuidos en todo el territorio nacional.

Cada estación opera como nodo de adquisición de datos y, en su mayoría, transmite la información en tiempo real al Centro Nacional de Datos Sismológicos (CNDS), emplazado en la sede central del INPRES en la provincia de San Juan. En dicho centro se implementan algoritmos automáticos de detección, localización hipocentral y estimación preliminar de magnitud, lo que permite publicar un reporte sísmico en línea dentro de los 6 min desde el origen del evento. El procesamiento automatizado determina el tiempo de origen, las coordenadas epicentrales, la profundidad y la magnitud local (ML). Estos parámetros son posteriormente validados y de ser necesario, ajustados mediante técnicas manuales y semiautomáticas por sismólogos especializados.

La disponibilidad de información sismológica en tiempo cuasi real, respaldada por validación experta, ha consolidado al portal oficial del INPRES (https://www.inpres.gob.ar) como fuente confiable para la comunidad científica y la sociedad. Este prestigio se refleja en el aumento sostenido del tráfico web tras eventos significativos a lo largo de los años. Así, hoy un sismo moderado de 4,4 ML (a 15 km de profundidad aprox.; epicentro a 60 km al E de San Juan) generó aprox. 17.000 accesos en los 10 min posteriores al evento (véase Fig. 1).

Desde el año 2016, el INPRES desarrolla e integra herramientas computacionales destinadas a complementar la caracterización sísmica en tiempo cuasi real. Una innovación destacada es la utilización en su sitio web oficial de la API Geolocation de HTML5 mediante el método navigator.geolocation empleando el lenguaje JavaScript, que permite obtener la posición (latitud y longitud, y eventualmente altitud) de los usuarios - previo consentimiento explícito - empleando GPS/AGPS, redes Wi Fi, radiobases de telefonía móvil o direcciones IP. Al registrarse la ubicación y la marca horaria UTC asociada de cada acceso al sitio web oficial del INPRES, se dispone de un conjunto de datos georreferenciados que almacena Sistema IntenSA en su BD espacial. Cada uno de estos accesos al sitio web del INPRES se registra con un identificador [ID], las coordenadas [LATITUD, LONGITUD], la marca horaria UTC [UTCDATETIME] y la geometría puntual [GEOMETRÍA] (Tabla 1).

ID	LATITUD	LONGITUD	UTCDATETIME	GEOMETRÍA
10351783	-34.4867552	-58.4989226	13/10/2021 07:52	0101000020E61000001E1E1DB2DC3F4DC-0379490FE4D3E41C0
10351784	-27.8003712	-64.2646016	13/10/2021 07:52	0101000020E6100000099E8C3BEF-1050C008A98020E5CC3BC0
10351785	-32.9446565	-68.8344805	13/10/2021 07:52	0101000020E61000009529E620683551C-017BA1281EA7840C0
10351786	-24.7649465	-65.400767	13/10/2021 07:52	0101000020E61000003A94A12AA-65950C08EB0A888D3C338C0
10351787	-32.8881433	-68.6932352	13/10/2021 07:53	0101000020E6100000E81B2CF75D2C-51C0ADD4FDADAE7140C0
10351788	-27.8003712	-64.2646016	13/10/2021 07:54	0101000020E6100000099E8C3BEF-1050C008A98020E5CC3BC0
10351789	-32.9446564	-68.8344793	13/10/2021 07:55	0101000020E610000018ACDD1B683551C-082FA3B80EA7840C0
10351790	-32.9446564	-68.8344793	13/10/2021 07:55	0101000020E610000018ACDD1B683551C-082FA3B80EA7840C0
10351791	-31.5872957	-68.5591829	13/10/2021 07:55	0101000020E6100000E0FE12A7C92351C-0D894D00259963FC0
10351792	-32.9446565	-68.8344805	13/10/2021 07:55	0101000020E61000009529E620683551C-017BA1281EA7840C0
10351793	-31.4275473	-68.5449377	13/10/2021 07:55	0101000020E6100000E-1F65F42E02251C03CFE66BD736D3FC0
10351794	-50.3399988	-72.2698567	13/10/2021 07:56	0101000020E6100000641896498C1152C-006055FB7422B49C0
10351795	-50.3423206	-72.2450609	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000D0C1E913AF0F-52C0A1DF5229D12B49C0
10351796	-49.3304043	-72.8897794	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000E3E94B25F-23852C0987A27B04AAA48C0
10351797	-50.3554705	-72.2543774	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000DB7525B-8471052C0AD18AE0E802D49C0
10351798	-31.5490304	-68.5801472	13/10/2021 07:57	0101000020E61000006C-B7B821212551C082829C418D8C3FC0
10351799	-51.5809898	-72.2160252	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000029475C5BD30D-52C0A027AFDF5DCA49C0
10351800	-51.5794476	-72.2155464	13/10/2021 07:57	0101000020E610000050B12083CB0D52C-073DFC5562BCA49C0
10351801	-50.3423206	-72.2450609	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000D0C1E913AF0F-52C0A1DF5229D12B49C0
10351802	-50.3409752	-72.2451436	13/10/2021 07:57	0101000020E6100000B834C86EB00F-52C024624A24D12B49C0

Tabla 1. Ejemplos de registros geolocalizados de accesos al sitio web del INPRES. La columna UTCDATETIME está expresada en horario UTC. Este subconjunto de datos corresponde al set de registros reales asociados al terremoto de El Calafate en estudio en este trabajo.

Al efectuar análisis continuos de las series de registros mencionados, se identifican claramente "pulsos" - incrementos abruptos seguidos de descensos más lentos - en la secuencia inmediatamente posterior a la ocurrencia de sismos sentidos. La distribución resultante exhibe una asimetría con sesgo positivo, reflejando una respuesta casi instantánea de los usuarios. Estos patrones han sido analizados en cientos de sismos sentidos de diversas magnitudes y a variadas profundidades.

La Figura 1 representa esta dinámica mediante un plano cartesiano en el que se grafica el tiempo (eje X) en relación con la cantidad de accesos geolocalizados por minuto (eje Y). La aparición de pulsos bien definidos en esta serie temporal constituye un indicador indirecto pero robusto de percepción sísmica por parte de la población. En este contexto, dichos pulsos pueden ser interpretados como una forma de evidencia empírica percibida: es decir, datos de origen subjetivo que, al ser recolectados y analizados de manera sistemática, adquieren valor científico.

En el año 2006, Cita Howe J., en su artículo The Rise of Crowdsourcing publicado en la revista WIRED Magazine presenta el termino crowd-sourced proviene del inglés derivado de la expresión "crowdsourcing" (Crowd = multitud, gente y Source/d = proveniente de, generado por). En español puede traducirse como "colaboración colectiva" o "fuente colectiva". Este refiere a datos, ideas o servicios que son generados o aportados por un gran número de personas, generalmente de forma descentralizada y a través de plataformas

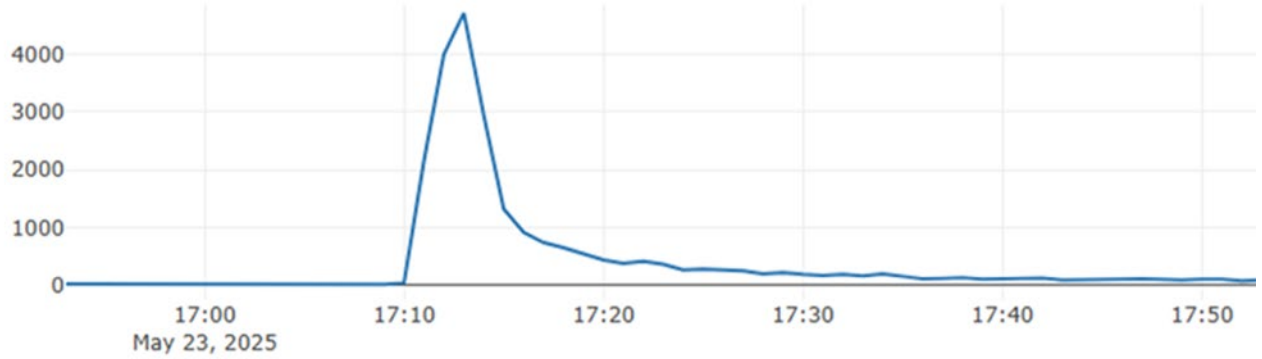


Figura 1. Distribución característica producto de la geolocalización de registros de accesos al sitio web del INPRES posteriores a la ocurrencia de un sismo percibido por la población.

digitales. Aplicado en el contexto sismológico, podemos entender que la identificación de un posible evento sísmico se basa en las acciones espontáneas de muchas personas ("la multitud"), que acceden simultáneamente a una página web tras sentir un sismo o un suceso disparador. Aunque estas personas no estén informando conscientemente sobre un evento, su comportamiento digital colectivo genera un patrón detectable, eventualmente sistematizable y medible.

Para la detección automatizada de estos fenómenos, el INPRES ha desarrollado un conjunto de algoritmos que operan en tiempo real, los cuales analizan continuamente la evolución de los accesos. Ante la identificación de un pulso compatible con un evento percibido, y tras un conjunto de verificaciones complementarias orientadas a garantizar la calidad y la fiabilidad del dato, el sistema habilita la emisión automática de alertas internas denominadas "Posible Sismo Sentido" (PSS), dirigidas al equipo de sismólogos para su evaluación e integración con la información instrumental.

El sistema IntenSA integra visualizadores web GIS interactivos que consultan la Base de Datos Espacial del INPRES. Estas interfaces facilitan la creación de mapas dinámicos de percepción y la superposición con capas de información sismológicas instrumentales, lo que optimiza la respuesta institucional y amplía el espectro de análisis científico en tiempo real.

Entre las técnicas de visualización empleadas, se destacan los mapas de calor (en inglés heatmaps), que constituyen una herramienta cartográfica eficaz para representar la distribución espacial de accesos geolocalizados al sitio web en ventanas de tiempo continuo. Mediante gradientes de color que indican la densidad de accesos, estos mapas permiten inferir de forma indirecta los niveles relativos de percepción sísmica, siendo las zonas de mayor concentración —en tonalidades rojas— indicativas de una percepción más intensa por parte de la población (ver Fig. 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A las 04:55 hora local (UTC − 3) del 13 de octubre de 2021 se registró un terremoto en la provincia de Santa Cruz, con epicentro localizado 4 km al noroeste de la ciudad de El Calafate (50,313° S; 72,310° O). El foco se situó a 14 km de profundidad y la magnitud fue 5,5 ML. La escasa densidad de estaciones de la Red Nacional de Monitoreo Sísmico (RNMS) en esta región impidió la localización automática, de modo que la determinación hipocentral debió ser completada manualmente por los sismólogos de turno a partir de la recepción de la alerta emitida por el Sistema IntenSA.

Durante los primeros 20 min posteriores al origen (t_0 = 04:55), el Sistema IntenSA registró 1.478 accesos a la página principal del INPRES, lo que activó de inmediato las alertas internas de "posible sismo sentido" (PSS). El Mapa de Calor (Fig. 2) mostró en tiempo real la distribución espacial de dichos accesos, con un degradé rojo-verde que resalta las zonas de mayor densidad. El marcador rojo en el mapa indica la localización del epicentro una vez que fue determinado. Es claro observar en este mapa que las zonas donde se percibió el sismo son hacia el sur y especialmente el oeste de la provincia de Santa Cruz.

La interfaz de "Visitas Georreferenciadas" de Sistema IntenSA, Fig. 3, permitió filtrar los accesos procedentes del entorno cercano de la ciudad de El Calafate; zona cercana al epicentro. Esta figura muestra los accesos durante los 40 min posteriores a t_0. Esta densidad de accesos, en un período de tiempo corto, es claramente atípica para una región con actividad sísmica reducida.

En la parte superior se observa la serie temporal del tráfico web, caracterizada por un pulso que se inicia inmediatamente después de t_0 y alcanza su máximo a las 05:04. En el presente caso, se observa que el pulso inicial de accesos geolocalizados no presenta un carácter abrupto, sino que exhibe una dilatación temporal pronunciada. Este comportamiento sugiere una respuesta gradual de la población ante la percepción del evento sísmico, posiblemente asociada a factores como la hora de ocurrencia o quizás el nivel de difusión y conocimiento de la página web del INPRES. A partir de la ocurrencia de este terremoto, los sucesivos sismos que fueron percibidos en la región cercana a El Calafate presentaron pulsos más agresivos, similares al resto de las regiones de mayor sismicidad.

Siguiendo con el análisis de la Fig. 3, en el marco derecho se presenta la geolocalización de los accesos segmentados en tres

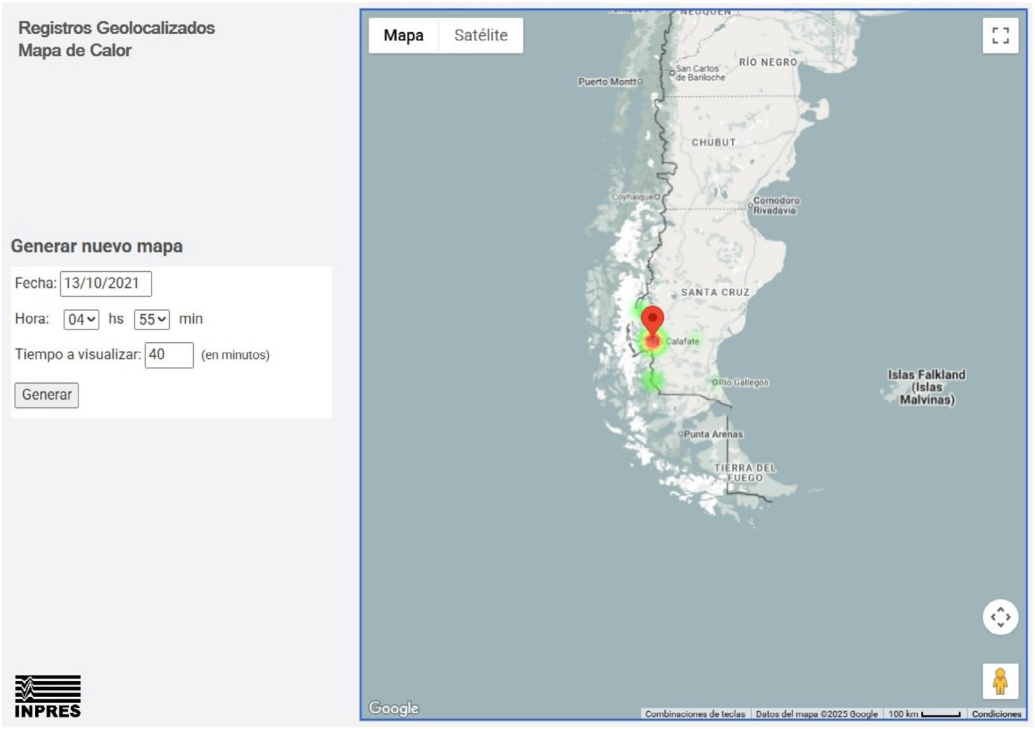


Figura 2. Terremoto de El Calafate - Mapa de Calor de accesos georreferenciados. La visualización corresponde a los registros obtenidos durante los 40 minutos posteriores al evento. Los degradé de rojo a verde identifican las zonas con mayor concentración de accesos.

ventanas temporales: 0–5 min (rojo), 5–10 min (verde) y > 10 min (azul). Esta codificación cromática brinda un criterio de calidad: los accesos tempranos (rojo) reflejan reacciones espontáneas de usuarios que percibieron el sismo, mientras que los tardíos (azul) muestran mayor probabilidad de estar mediados por la difusión social (redes sociales, medios de comunicación, etc.). Esto determina que las geolocalizaciones representadas con el color rojo deben ser consideradas de mejor calidad que las verdes y en menor medida las representadas en color azul.

Las dos figuras presentadas son capturas de las interfaces del Sistema IntenSA, y se actualizan en tiempo real, a medida que la población va accediendo al sitio web. En el caso del terremoto de El Calafate, en la ventana de 5 minutos a partir de t0 se obtuvieron 93 registros (Fig. 3), algo inusual para la provincia de Santa Cruz hasta ese momento.

CONCLUSIONES

La incorporación de tecnologías de geolocalización web representa una herramienta emergente en la sismología moderna, que permite vincular datos instrumentales con evidencia percibida, enriquecer la base de datos de eventos mejorando su caracterización y avanzar hacia una mayor integración entre tecnología, ciencia y sociedad en el contexto del monitoreo y gestión del riesgo sísmico en Argentina.

Adicionalmente, a partir del enfoque *crowd-sourced*, emergen beneficios significativos que fortalecen las capacidades del Sistema IntenSA:

- Posee cobertura nacional al operar sobre la infraestructura de telecomunicaciones existente - sin requerir equipamiento geofísico especializado - el sistema logra una cobertura territorial amplia, incluyendo regiones donde la densidad de instrumentación sísmica es limitada o inexistente.
- El procesamiento es completamente automático, ya que la detección de pulsos es gestionada por algoritmos especializados que operan en tiempo real, los cuales aplican criterios de filtrado-espacio temporal para discriminar aumentos significativos en la tasa de accesos frente a las fluctuaciones naturales del comportamiento digital de la población.
- El valor científico-técnico es elevado, ya que la integración de datos instrumentales con información no instrumental de origen social aporta una visión complementaria y enriquecida del fenómeno sísmico. En particular, mejora la capacidad de detección y caracterización de eventos de magnitud moderada a baja, que pueden ser ampliamente percibidos por la población sin alcanzar niveles de registro confiables en la red sismológica convencional.

También se evidencia la necesidad de fortalecer la difusión ordenada del Sistema IntenSA a escala nacional, dado que una mayor proporción de la población informada sobre su existencia incrementaría tanto la cantidad como la calidad de los registros de accesos geolocalizados ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Esta relación fue particularmente manifiesta en los sismos registrados con posterioridad al terremoto de El Calafate, donde se observó un aumento significativo en la agresividad y definición del pulso. Dicho comportamiento sugiere un mayor involucramiento social y un uso más extendido del sistema, lo que refuerza la importancia

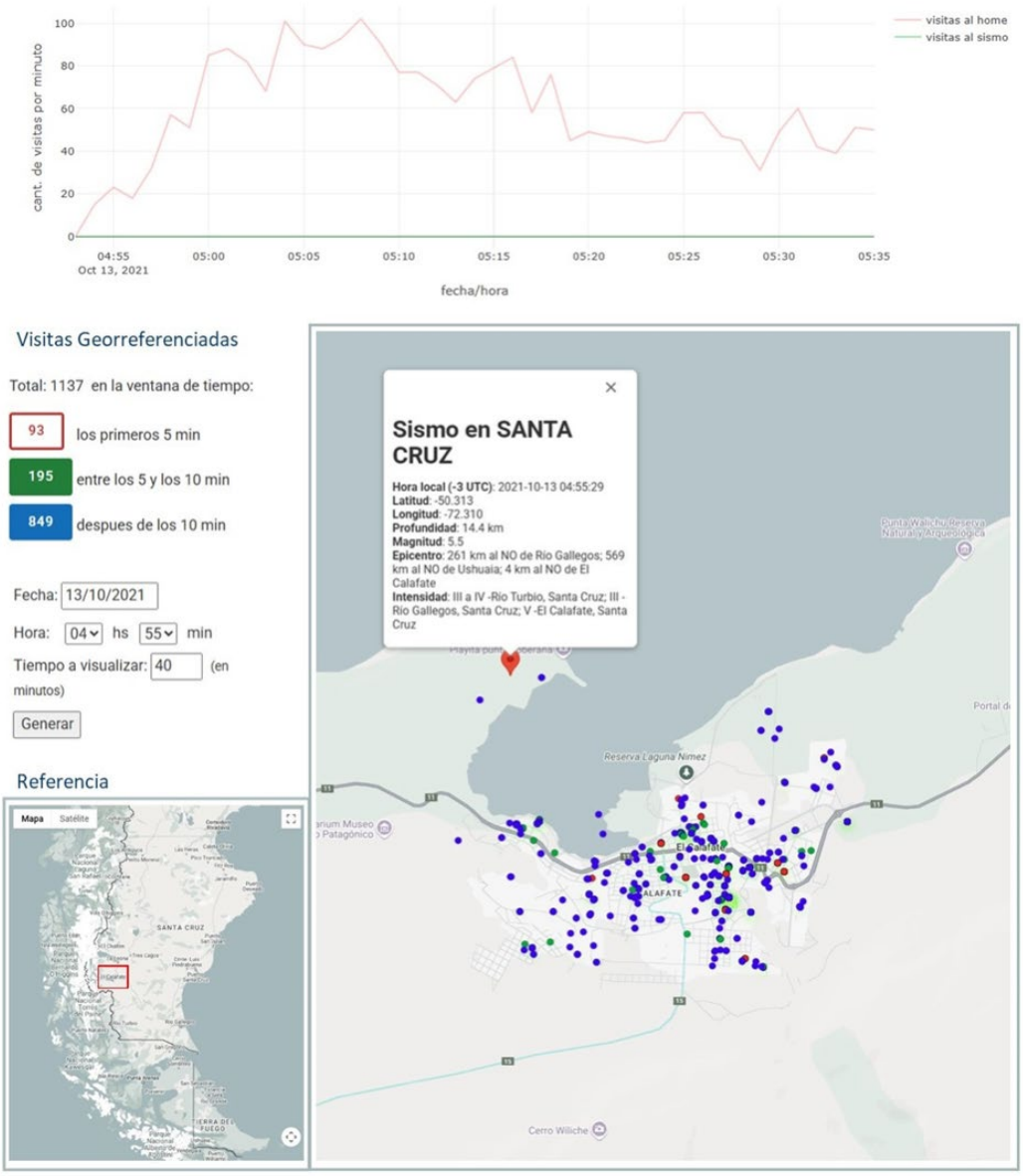


Figura 3. Análisis de visitas georreferenciadas asociadas al terremoto de El Calafate, en la ventana de tiempo de 40 minutos posteriores a la marca horaria del epicentro.

de promover su conocimiento como herramienta complementaria para la detección y análisis temprano de la percepción humana ante un sismo.

El subsistema de Alertas de PSSs introduce una modalidad innovadora de vigilancia sísmica que potencia la cobertura y rapidez de respuesta institucional, colaborando con la gestión del riesgo sísmico en un país de compleja geodinámica y amplia extensión geográfica. Así en un contexto sismológico, en un subsistema como este, el término *crowd-sourced* indica que la detección del evento sísmico se basa en las acciones espontáneas de muchas personas ("la multitud"), que acceden simultáneamente a una página web tras percibir un sismo. Aunque estas personas no estén informando conscientemente sobre un evento, su comportamiento digital colectivo genera un patrón detectable y sistematizable.

El terremoto de El Calafate de 2021, por los diversos temas enunciados en el presente trabajo marcó un hito de consolidación, a nivel interno del Instituto, en la gestión de la geolocalización de accesos web sobre el sitio oficial del INPRES.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento enorme a todo el equipo de trabajo por su perseverancia ante los inicios pocos auspiciosos del proyecto. Y un reconocimiento especial a nuestras familias por su apoyo incondicional.

REFERENCIAS

Gersón Beltrán López, (2016) Geolocalización online: la importancia del dónde. Editorial UOC.
Gersón Beltrán López, (2012) Geolocalización y Redes Sociales. Un mundo social, local y móvil. Editorial Bubok.
Cita Howe, J. (2006) The Rise of Crowdsourcing. Wired Magazine.

ANÁLISIS DEL PAISAJE LOCAL PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA LOCALIDAD DE LA CUMBRE, VALLE DE PUNILLA, CÓRDOBA

María Selva Torriglia[1], Diego Winocur [2,3]
[1]Universidad de Buenos Aires, FCEyN, Departamento de Ciencias Geológicas, Ciudad Universitaria, Intendente Güiraldes, 1460. CP 1428, CABA; Argentina; email: profesoratorrigliamaselva@gmail.com
[2]Universidad de Buenos Aires, FCEyN, Departamento de Ciencias Geológicas, Ciudad Universitaria, Intendente Güiraldes, 1460. CP 1428, CABA; Argentina; email: winocur@gl.fcen.uba.ar
[3]Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber – IDEAN (Universidad de Buenos Aires-CONICET)
Mail de contacto: profesoratorrigliamaselva@gmail.com

RESUMEN
En el marco del proceso participativo por el plan de ordenamiento ambiental y territorial de La Cumbre, Córdoba, se pone a disposición la presente contribución científico-técnica para aportar a la toma de decisiones en el desarrollo urbano futuro. A partir del presente, sumado a estudios previos realizados, se tabularon las características del medio físico, se correlacionaron los paisajes en torno a los cursos principales diferenciando su grado de urbanización, se identificaron los riesgos socio-naturales y se definieron cuatro unidades ambientales (UA) que fueron cartografiadas en el sector norte de la localidad para su zonificación en las áreas de menor grado de antropización. Este aporte permitirá contar con herramientas para determinar intervenciones tanto públicas como privadas que minimicen la afectación al territorio y a la vez, prevenir riesgos para la comunidad.

Palabras clave: ordenamiento territorial, valle de Punilla, riesgo.

ABSTRACT
As part of the participatory process for the environmental and territorial planning of La Cumbre, Córdoba, this scientific-technical report is made available to inform evidence-based decision-making for sustainable urban development. Building upon prior studies, the analysis systematizes the biophysical characteristics of the area, establishes correlations between landscape features and the main watercourses based on varying degrees of urbanization, and identifies prevailing socio-environmental risks. Furthermore, four Environmental Units (EUs) were delineated and spatially mapped in the northern area, prioritizing zones with low anthropogenic disturbance for land-use planning. This work contributes strategic planning tools to guide both public and private interventions, aiming to reduce environmental degradation and mitigate potential risks to local communities.

Keywords: territorial planning, Punilla valley , risks.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proceso participativo por el plan de ordenamiento ambiental y territorial de La Cumbre, Córdoba, se pone a disposición el siguiente trabajo de análisis geomorfológico, diagnóstico del paisaje y evaluación ambiental de zonas menos urbanizadas del ejido municipal con el objetivo de aportar criterios de uso del territorio de cara al desarrollo urbano creciente que experimenta la localidad. En ese sentido se determinó un polígono de análisis que incluye los barrios de Cruz Chica y Cruz Grande en torno al cauce del arroyo Cruz Grande y, que, por sus características litológicas alcanzan una transmisividad hidráulica de 382 m2/día (E.N.O.H.Sa., 2003) por lo que actúan como zonas de recarga hídrica al acuífero libre que provee del recurso a una parte de la población desde las perforaciones del barrio Malvinas y de Las Mesillas.

La zona de estudio se enmarca en los valles intermontanos de la provincia geológica de Sierras Pampeanas (Dávila et al, 2005) y las características climáticas muestran un dominio de clima semi-húmedo con tendencia a semi-seco de montaña. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger (1953), presenta un régimen pluviométrico influenciado por el efecto orográfico y las precipitaciones se concentran en verano y son escasas en invierno. Según Bonino et al (2012) la flora está condicionada por el gradiente altitudinal y la orientación donde domina el bosque serrano chaqueño. Las características hidrográficas muestran una red de drenaje de diseño dendrítico (Torriglia, 2023) donde los cursos de régimen permanente más importantes son el río San Jerónimo y el arroyo Cruz Grande. Ambos confluyen en el río Dolores y reciben el aporte de numerosos afluentes de gran incisión vertical y escasa longitud, que socavan las rocas del basamento expuestas al este de la falla de Sierra Chica, aumentando la densidad de la red. Por el contrario, en el bloque bajo de esta falla, las unidades geomorfológicas muestran depósitos de erosión y acumulación

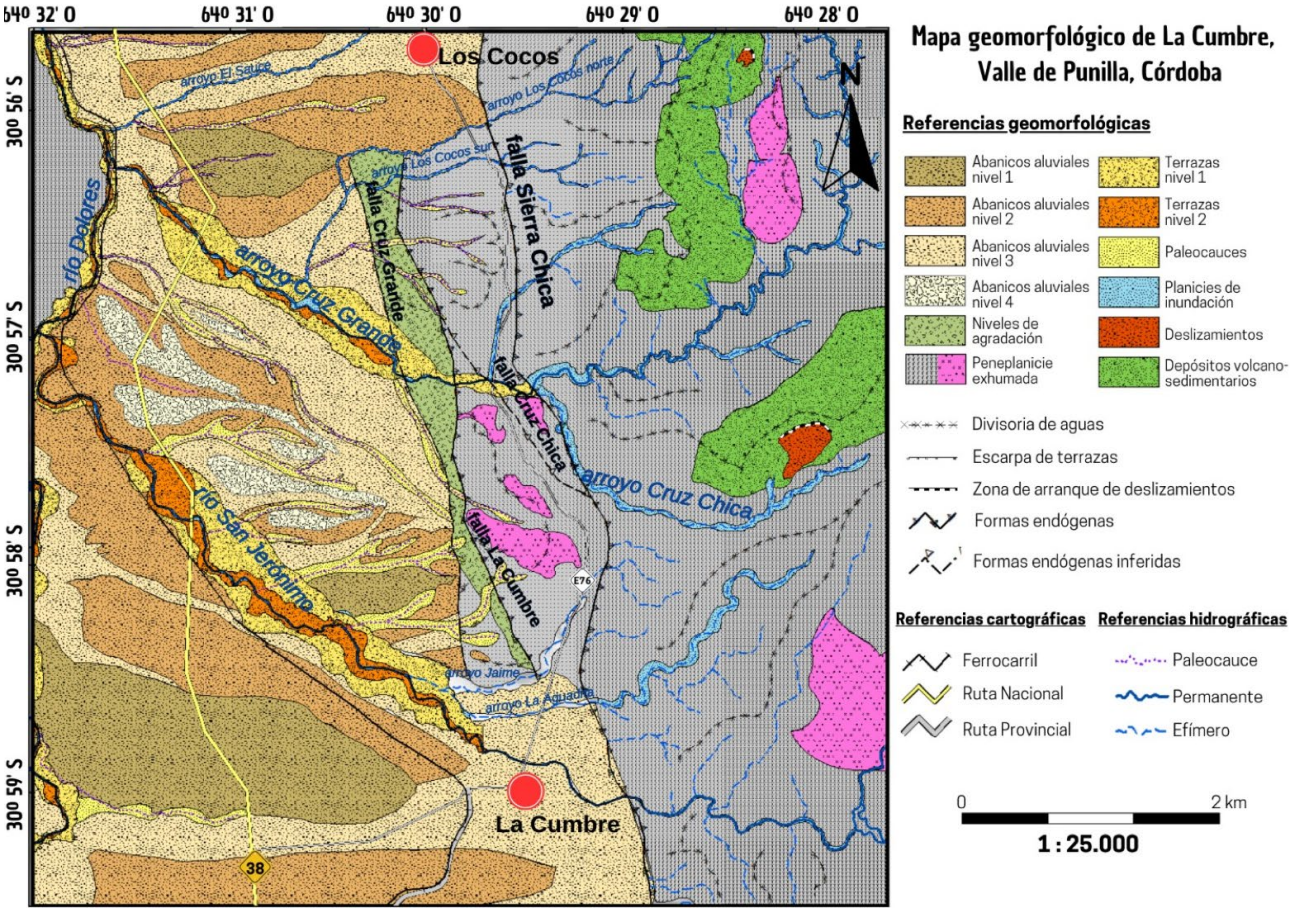


Fig. 1. Relevamiento geomorfológico tomado de Torriglia y Winocur, 2024.

fluvial afectados por actividad tectónica reciente que modelan el paisaje (Torriglia y Winocur, 2024), (Figura 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación ambiental se utilizó el relevamiento geomorfológico (Torriglia, 2023) junto con las evidencias de procesos endógenos (Torriglia y Winocur, 2024) de la zona y se complementaron con imágenes satelitales, modelos de elevación digital y reconocimiento de campo para la identificación de características significativas de la dinámica de paisajes. A partir de allí se tabularon diferentes aspectos de las unidades cartografiadas para determinar las características del medio físico y los riesgos asociados. Para ello se correlacionaron depósitos fluviales del arroyo Cruz Grande con las unidades geomorfológicas del curso del río San Jerónimo que posee un grado mayor de antropización. Esta información se utilizó para determinar unidades ambientales (UA) tomando las sobrecargas territoriales (Grígolo et al, 2024), se realizó una valoración ambiental relacionada con actividades que permitan contemplar lineamientos en el marco del ordenamiento territorial en curso de cara al cambio de uso de suelo de un sector de menor urbanización. Para finalizar, se confeccionó un mapa zonificando dichas UA con softwares cartográficos como ArcGIS, Globbal Mapper y Google Earth.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la tabulación propuesta para la evaluación ambiental (Tabla 1) se delimitó un polígono de aproximadamente 10 km^2 de extensión ubicado al norte de La Cumbre donde se realizó la cartografía de cuatro unidades ambientales (Figura 2).

Unidad Ambiental 1 (UA1): corresponde a depósitos de abanicos aluviales inactivos que presentan bancos de conglomerados en matriz arenosa de escasa cementación que se muestra en el paisaje como zonas elevadas respecto a las terrazas fluviales y los paleocauces. Las características litológicas permiten un nivel de infiltración moderado a alto por lo que resulta un suelo de bajo flujo de escorrentía con menor erosión y poco inundable favoreciendo la infiltración. Si bien hoy es considerada y categorizada como zona residencial debe contemplarse la importancia del tratamiento de efluentes para evitar la contaminación del agua subterránea.

Unidad Ambiental 2 (UA2): contempla depósitos fluviales de diferentes categorías. En primer lugar se diferencian dos niveles de

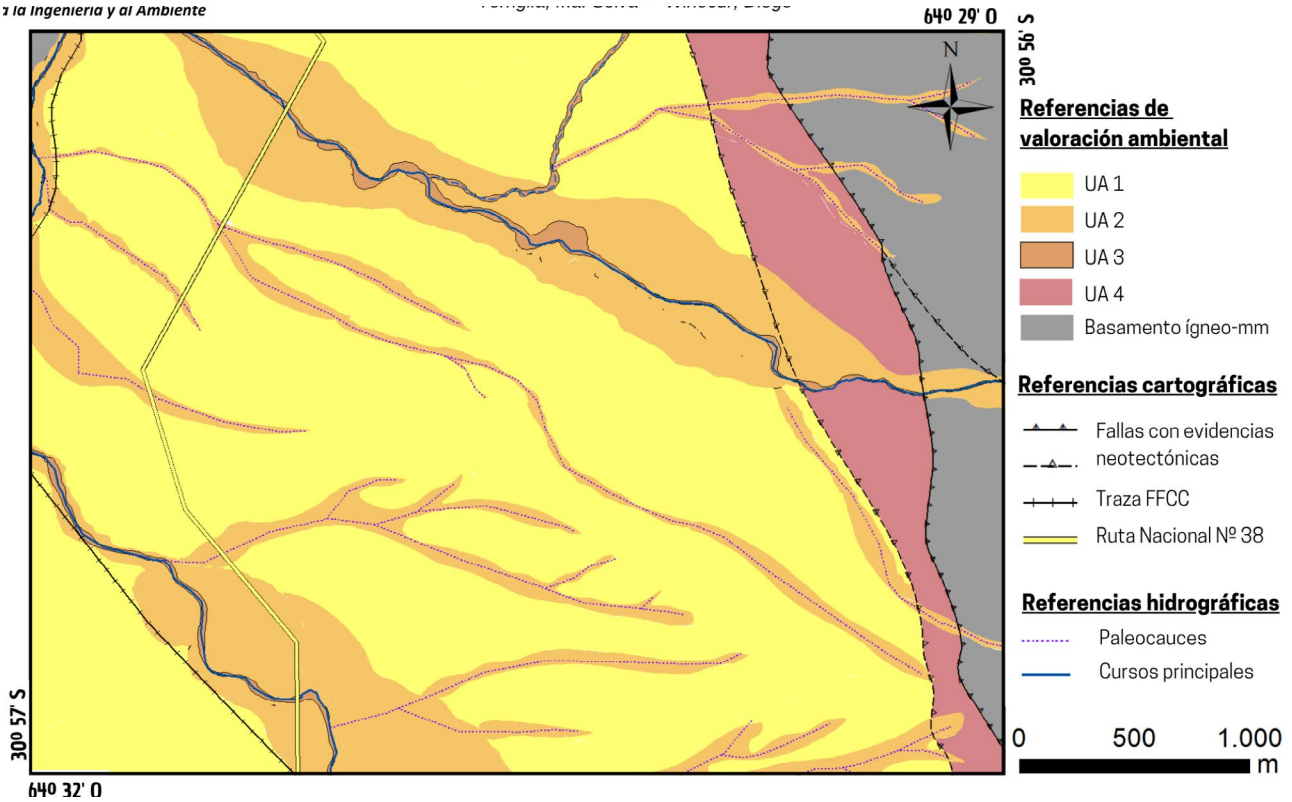


Fig. 2. Zonificación de unidades ambientales (AU).

terrazas con depósitos aluviales de clastos subredondeados que varían su granulometría cuya porosidad eficaz permite una mayor infiltración (E.N.O.H.Sa., 2003). Para el nivel de terrazas más reciente, se evidencian escarpas que superan el metro de altura y se ven afectadas directamente por migración lateral del arroyo Cruz Grande, sufriendo erosión, abandono de meandros y riesgo de inundación ante crecidas. Por otro lado, el nivel de terrazas más antiguo muestra escarpas que alcanzan los 7 metros y no hay evidencias de erosión significativa. En esta unidad, se incluyen los paleocauces correspondientes a los antiguos canales de distribución de los abanicos aluviales. Si bien esta geoforma se presenta inactiva, estos antiguos cauces actúan como canales de escorrentía que en los de menor extensión y mayor pendiente se evidencian carcavamientos que alcanzan los 10 metros de profundidad. Son depósitos de grava fina en matriz limo-arenosa lo que reduce su infiltración con coeficientes de permeabilidad k de 10-4 a 10-6 cm/s. En el paisaje se presentan como bajos topográficos que alcanzan una diferencia de altura con los depósitos de abanicos aluviales de entre 5 a 10 metros, por lo que resultan zonas con riesgo de inundación. En ese sentido se sugiere priorizar estas unidades para el uso recreativo o el uso agrícola a baja escala.

Unidad Ambiental 3 (UA3): refiere a la planicie de inundación del curso permanente del arroyo Cruz Grande. Se observan en el lecho del arroyo gravas subredondeadas con bloques aislados que superan los 50 cm y se encuentra 20 metros por debajo los altos topográficos correspondiente a la UA 1. Si bien su caudal presenta tramos en los cuales se insume debido a su carácter estacional, su hábito meandroso evidencia una dinámica activa con migración lateral producto de la pérdida abrupta de su pendiente longitudinal con antecedentes de daños en la zona.

Unidad Ambiental 4 (UA4): contempla las áreas ubicadas entre fallas con evidencias de neotectónica que se extienden de norte a sur en el polígono estudiado. Este levantamiento marca un resalto topográfico de aproximadamente 100 m. Si bien se prevé como normativa vigente la construcción de viviendas antisísmicas a partir de la clasificación definida por el INPRES para esta región, resulta importante evidenciar este rasgo como una dinámica activa y recientemente estudiada del paisaje.

CONCLUSIONES

A partir de la evaluación ambiental del sector norte de La Cumbre junto con su correlación con el paisaje del área de mayor urbanización, se concluye que la zonificación de unidades ambientales de acuerdo a las características del medio físico y sus peligros asociados resulta necesaria para el proceso de ordenamiento territorial que desarrolla la localidad. Colaborará en la determinación de los espacios tanto públicos como privados desde un objetivo común: la menor afectación posible al territorio intervenido, el cuidado del recurso hídrico que abastece a la población local y la prevención ante posibles eventos que generen riesgo a la población que haga uso de dicho espacio.

AU	UNIDAD GEOLÓGICA	LITOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS	INFILTRACIÓN DEL SUELO	DINÁMICA DEL PAISAJE	PROCESOS EROSIVOS	INUNDACIONES
UA 1	Depósitos de abanicos aluviales	Conglomerados de granulometría variada en matriz arenosa - baja cementación	Altos topográficos con cotas entre 1.000 y 1.200 metros.	Moderado a alto	Abanicos aluviales inactivos	Bajo	Baja
UA 2	Terrazas fluviales más recientes	Depósitos aluviales con clastos subredondeados que van desde la grava a bloques.	Escarpas de terrazas: 1,5m de altura.	Alto: Porosidad eficaz promedio del 27% (1)	Arroyo estacional meandro con evidencias de migración lateral	Alto a Medio	Alto a Medio
	Terrazas fluviales más antiguas		Terraza ubicada entre 5 y 7 m por encima del cauce.			Medio	Medio
	Paleocauces	Depósitos aluviales de grava fina en matriz limo-arenosa. mayor compactación.	Bajos topográficos con una diferencia de altura con UA 1 entre 5 y 10 m.	Medio a bajo de acuerdo a la extensión	Sectores de menor extensión y mayor pendiente muestran carcavamientos de hasta 10 m.	Alto en sectores	Alto
UA 3	Planicies de inundación	Clastos gravosos subredondeados con bloques aislados de 50 cm.	Disminución abrupta de la pendiente longitudinal. 20 m por debajo de AU 1.	Alto: Porosidad eficaz promedio del 27% (1)	Arroyo estacional meandro con evidencias de migración lateral	Alto	Alto
UA 4	Sistema de fallas cuaternarias	Contacto tectónico: Basamento altamente meteorizado sobre conglomerados matriz arenosa (2)	Resaltos topográficos significativos con diferencia de cotas de hasta 100m	Bajo	Peligrosidad sísmica moderada: Probabilidad de excedencia 0,15·g (3)	Moderado a alto	Bajo

Tabla 1. Características de unidades ambientales (UA). (1) Tomado del E.N.O.H.Sa. (2003). (2) Tomado de Torriglia y Winocur(2024)(3) Tomado de INPRES.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Municipalidad de La Cumbre, en especial a la Dirección de Ambiente y Agua que lleva adelante el proceso participativo de ordenamiento territorial y ambiental con miradas interdisciplinarias donde vecinos y profesionales podemos aportar en el futuro de la localidad.

REFERENCIAS

Bonino, E. E., Leynaud, G., Pelegrin, N., Rosati, V., Cardozo, G., Bruno, G. y Lascano, E. 2012.

La Conservación de la Fauna en Córdoba [CD Rom] 1ª. Ed. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. ISBN e-book 978-950-33-0996-4

Dávila, F.M, Astini, R.A. y Jordan T.E. 2005. Cargas subcorticales en el antepaís andino y la planicie pampeana: evidencias estratigráficas, topográficas y geofísicas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60: 775–786.

Ente Nacional de Obras Hídricas y de Saneamiento - E.N.O.H.Sa. (2003) Estudio integral del ente prestatario de servicios sanitarios y elaboración de los diseños de las obras para la localidad de La Cumbre, provincia de Córdoba. Informe Final. Gago Tonin S.A.

Grígolo, María Agostina; Rodríguez, Aixa Inés; Sottile, Antonella Laura; Pittaluga, Maria Alejandra; González, Marcelo; et al.; Identificación de Unidades Ambientales para la construcción de territorios sustentables a partir de estudios geológicos; Asociación Geológica Argentina; Revista de la Asociación Geológica Argentina; 81; 2; 3-2024; 1-44

Instituto Nacional de Prevención Sísmica - INPRES (2018). Mapa de zonificación sísmica de la República Argentina: Según el nuevo código de construcciones sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103 – Parte III. Min. del Interior, Ob. Públicas y Vivienda. Recuperado 04/07/2025 de http://contenidos.inpres.gob.ar/acelerografos/Reglamentos#Zonificaci%C3%B3n%20S%C3%ADsmica.

Instituto Nacional de Prevención Sísmica. (2022). Actualización del mapa de peligrosidad sísmica de la República Argentina. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado 04 de julio de 2025 de http://contenidos.inpres.gob.ar/actualizacion_mapa.

Köppen-Geiger W. R. 1953. Klima der erde(mapa), Justus Perthes, Darmstadt, Germany; American distributor, A. J. Nystrom and Co, Chicago.

Torriglia, María Selva (2023). Geomorfología Tectónica de La Cumbre, Valle de Punilla, Córdoba. Tesis de grado. Universidad de Buenos Aires.

Torriglia, M.S. y Winocur, D. (2024). Evidencias de actividad tectónica cuaternaria en la Sierra Chica, La Cumbre, Punilla, Córdoba. XXII Cong. Geológico Argentino. San Luis. pp 1218/1219.

LÍNEA DE BASE AMBIENTAL EN UN EMPRENDIMIENTO MINERO INSTALADO EN UN ÁREA NATURAL PROTEGIDA

Camila Zipilivan[1], Gerardo C. Leynaud[2], Lautaro Leynaud[1]
[1]Geotellus S.R.L, Castilla N° 2242, ciudad de Córdoba, Argentina.
[2]Centro de Zoología Aplicada FCEFYN Univ. Nacional de Córdoba, Rondeau 798, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: tecnica@geotellus.com

RESUMEN

Se realizó un estudio multidisciplinario de la afectación que presentan las actividades desarrolladas por una empresa minera localizada en las Salinas Grandes de Córdoba con el objetivo de es-tablecer una Línea de Base Ambiental (LBA). Esta firma, cuya actividad data del año 1987, realiza la extracción de sal de las minas concesionadas ubicadas en el interior de las Salinas (declaradas aproximadamente en el 1900), como así también mediante el bombeo de salmuera hacia piletas de cristalización ubicadas en la costa, garantizando un suministro anual para su producción. Posterior a su instalación, se produjeron modificaciones legislativas y la declaración de un Área Natural Protegida de la provincia de Córdoba en la zona de influencia (cuya reglamentación no está finalizada por parte del Estado provincial) y las correspondientes medidas de protección y remediación.

Para este trabajo se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica acompañada de relevamientos en el campo donde se pudieron aplicar y combinar diferentes técnicas de muestreo para conocer las condiciones ambientales existentes en materia de calidad de aire, ruidos, biodiversidad, geo-morfología, calidad de salmuera, y ambiente sociocultural. En este estudio se contó con profesionales de geología, biología, agronomía, sociología, y comunicadores sociales, obteniéndose resultados positivos y novedosos los que constituyeron un desafío para el diseño de nuevos planes que consideren la protección, el cuidado y la menor afectación del ambiente, pudiéndose definir una LBA objetiva y medidas de protección y remediación en un emprendimiento minero emplazado en un Área Natural Protegida (ANP).

Palabras clave: minería, LBA, ANP, estudio multidisciplinario.

ABSTRACT

A multidisciplinary study was conducted on the impact of the activities carried out by a mining company located in the Salinas Grandes mines of Córdoba with the aim of establishing an Environmental Baseline (EBL). This company, which has been operating since 1987, extracts salt from the concessioned mines located within the Salinas (declared around 1900), as well as pumping brine to crystallization ponds located on the coast, ensuring an annual supply for its production. Following its establishment, legislative changes were made, and the provincial government declared a Protected Natural Area around influence (whose regulations have not yet been finalized), along with the corresponding protection and remediation measures. For this study, a comprehensive literature review was conducted, accompanied by field surveys that allowed the application and combination of different sampling techniques to understand the environmental conditions in terms of air quality, noise, biodiversity, geomorphology, brine quality, and sociocultural environment. This study involved professionals in geology, biology, agronomy, sociology, and social communications, yielding positive and innovative results that challenged the design of new plans that consider environmental protection, care, and minimal impact. This allowed the definition of an objective LBA and protection and remediation measures for a mining project located in a Protected Natural Area (PNA).

Keywords: mining, EBL, PNA, multidisciplinary study.

INTRODUCCIÓN

Dado que la industria minera desarrollada por la empresa La Industrial Salinera S.A. (LISAL) se encuentra instalada en el sector con anterioridad a la incorporación del Título XIII, Sección Segunda del Código de Minería (Ley N° 24.585, año 1995), a que en el año 2003 la provincia de Córdoba ha decretado a las Salinas Grandes de Córdoba como Área Natural Protegida “Reserva de Usos Múltiples” que aún no se encuentra reglamentada, a la sanción de la Ley N° 9814, “Ordenamiento territorial de bosques nativos de la provincia de Córdoba” en agosto del año 2010, a la fecha de sanción de la Ley de Política Ambiental de Córdoba (Ley N° 10.208, sancionada en junio del año 2014), y a que no existe en el área de influencia del proyecto estudios que otorguen parámetros para considerarlos como “base cero”, se realizó un estudio de Línea de Base Ambiental (LBA), con el objetivo de definir un punto inicial o de base del conocimiento de la zona y establecer medidas de mitigación y protección ambientales de aquellos impactos negativos que pudiere generar el desarrollo de la actividad en el sector.

LISAL realiza la extracción de Sal (halita), mineral de "Segunda Categoría" (según Ley 1919, Art. 4) desde las Salinas Grandes de Córdoba, cuya actividad data del año 1987. La empresa evoluciona al ritmo de la sociedad y en pos de una mejora socioambiental, modificó las formas de producción, cambiando los métodos de producción tradicional, considerados en la actualidad riesgosos e insalubres y con mayores posibilidades de contaminación ambiental. Se reemplazo el uso de vías y vagonetas mediante el uso de terraplén y de maquinaria pesada (fresadora, tractor con acoplado volcador, motoniveladora, maquinaria recolectora con sistema sin fin, discos de arado, etc.) y la extracción del mineral en su fase líquida, mediante el bombeo de salmuera existente en el Lago Lucio V. Mansilla, desde las minas bajo su titularidad, a piletas de evaporación construidos en terreno privado, en la costa de las Salinas.

El sitio en estudio se encuentra ubicado en el bolsón de las Salinas Grandes de Córdoba que es una extensa depresión intermontana de origen tectónica originada a partir de la tectónica de bloques Andina y forma uno de los sistemas hipersalinos más grandes del mundo formado por los salares de Salinas Grandes, Ambargasta, La Antigua y San Bernardo (Dargám, 1994, 1995; Dar-gám y Depetris., 1995,1996). Esta región está limitada al Norte por las sierras de Velazco, Ambato, Ancasti y Guasayán, al Este por la Sierra Norte de Córdoba y Sierra de Ambargasta, al Sur por la sierra Grande de San Luis, sierras de Pocho-Guasapampa y sierra Grande de Córdoba, y al Oeste por las sierras de Ulapes, Las Minas, Chepes, Malanzán, de Los Llanos y Brava. La cuenca de las Salinas Grandes es una gran cuenca endorreica donde el clima es semidesértico, acentuándose hacia el Oeste y Norte, disminuyendo progresivamente las precipitaciones, lo que dificulta la formación de cursos de agua superficiales; estos cursos, tienen sus nacientes en las partes altas de las sierras. Los ríos, a poco de ingresar en la llanura, se insumen en los depósitos sedimentarios transformándose en aguas subterráneas. El acceso al emprendimiento minero se encuentra pasando la localidad de San José de las Salinas; desde la ciudad de Córdoba se realiza por la Ruta Nacional N° 9 (N) por la que se recorre hasta el cruce con la Ruta Nacional Nº 60 y se dirige hacia San José de las Salinas y Lucio V. Mansilla. Se toma esta última y se recorren aproximadamente 115 Km donde, en el Km. Nº 890 y a mano izquierda se encuentra un camino consolidado que dirige hacia el portón de ingreso al terreno por el que se ingresa a las pertenecías mineras; por este último se debe recorrer aproximadamente 2,1 Km. Para llegar a la zona de explotación se toma por un camino interno existente en el terreno, con rumbo NO, y se recorren aproximadamente 2,0 Km (Fig. 1).

De acuerdo con estudios realizados por Marcelo Dargám y Javier Elortegui Palacios, "Hidrogeoquimica y modelo de sedimentación evaporítica en lagos salinos poco profundos: Lucio V. Mansilla, Salinas Grandes, Córdoba, Argentina (2021)", en el lago salino intermitente Lucio V. Masilla, la variación anual del volumen de salmuera superficial presenta tres etapas distintivas: a] Una etapa expansiva (noviembre-marzo) en donde domina la disolución parcial de yeso y total de halita; b] Le sigue una etapa de volumen estacionario (abril-junio) caracterizada por mayor influencia de aportes subterráneos, aumento de la salinidad de la salmuera y sobresaturación de yeso, el cual cristaliza en el fondo del lago y en el fango intersticial y c] finalmente la etapa recesiva (julio-octubre) donde los aportes disminuyen y domina la cristalización de yeso en la interfase salmuera-fango/sedimento y la halita en la salmuera superficial. El mismo estudio establece que el sector de playa de la cuenca de las Salinas Grandes, es ocupado ocasionalmente por pequeñas lagunas efímeras (Handford 1982, Dargám 1995), las que no superan la hectárea de extensión, revisten un carácter ocasional, debido a que son formados por lluvias localizadas en el sector conocido como "playa capilar" y por las escorrentías superficiales (su formación es frecuente durante las estaciones de verano y primavera), y a que se evaporan rápidamente, dejando una delgada película de eflorescencias salinas constituidas principalmente por halita, una vez finalizadas las lluvias, es decir que sólo permaneces unos pocos días. También en el sector de playa se encuentran lagos salinos someros temporarios o intermitentes (Dargám 1995) los que, se ubican en los sectores topográficamente más bajos de la cuenca, como es el caso del Lago San José y Lucio V. Mansilla, y su ubicación responde a un control estructural que limita el drenaje de las escorrentías superficiales. La superficie ocupada por estos lagos es muy variable, pudiendo pasar de la evaporación total hasta una superficie que, en conjunto, pueden cubrir los 95 Km^2.

Este trabajo se realizó en el lago salino Lucio V. Mansilla, ya que el grupo de minas de interés (Campaña, Del Socorro, El Bósforo, Gloria, La Dulce, Manuel Belgrano, Nena, Princesa, Salteña, Wilson, entre otras) ocupa aproximadamente un 36 % de la superficie total del lago. Según Dargám y Elortegui Palacios, 2021, el lago Lucio V. Mansilla tiene una superficie próxima a los 25 Km^2, y profundidad promedio de 0,30 metros, alcanzando en forma ocasional los 0,70 metros (Fig. 2).

La captación de salmuera por parte de LISAL se realiza por medio de un canal que inicia en la mina "Nena" de aproximadamente 1,5 Kilómetros de longitud, 4 metros de ancho y una profundidad de 1,5 metros. En el canal se encuentran las bombas que captan la salmuera y las bombea hacia los piletones. Existen en el terreno un total de 18 piletas, de diferentes superficies, de las cuales 17 son destinadas a la producción propiamente dicha: son cargadas hasta una profundidad de 0,5 metros. El volumen total de la carga de la pileta está compuesto por salmuera bombeada de la laguna y agua de menor salinidad proveniente de perforaciones, que se utiliza para que la salmuera no precipite en las cañerías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder realizar la LBA se conformó un equipo interdisciplinario integrado por profesionales geólogos, biólogos, ingenieros agrónomos, ingenieros ambientales y comunicadores sociales. Se realizó un exhaustivo estudio y documentación de la bibliografía existente para determinar la magnitud de los trabajos a realizar respecto al medio físico, los ecosistemas, la biodiversidad, situación socioeconómica de las comunidades próximas, etc. Además, se realizó la evaluación de imágenes satelitales donde se definieron estaciones o puntos de muestreos donde, de ser posible, se concentrarían los trabajos.

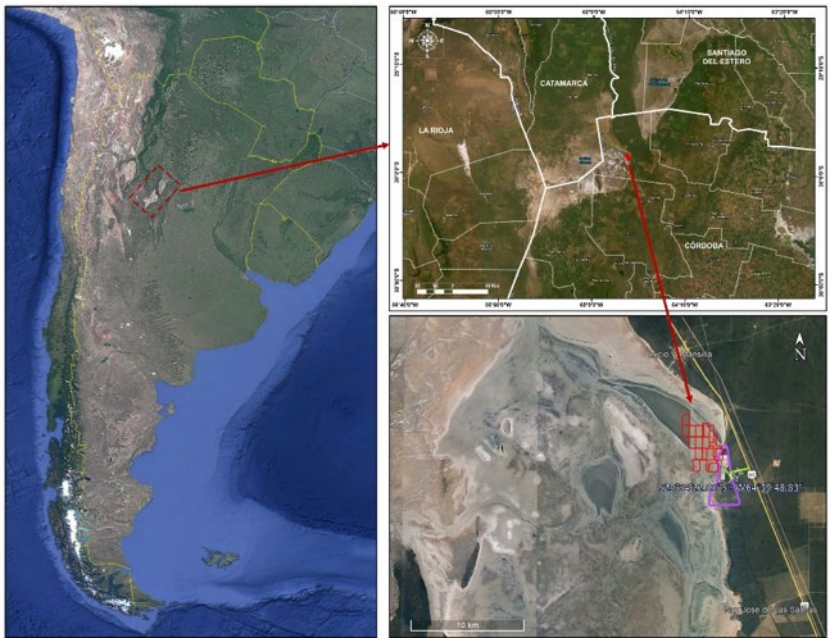


Fig. 1. Ubicación geográfica del sitio en estudio

El trabajo de gabinete se combinó con campañas de campo a la zona de estudio en donde se relevaron todos los puntos considerados como de interés para el desarrollo de la LBA como lo son las características de producción de la empresa LISAL, sus instalaciones, las minas que forman parte del proyecto minero, las condiciones de las Salinas tanto en periodo húmedo como en periodo seco, la condición en que se encuentra la vegetación en el terreno privado como en las Salinas propiamente dicha, la confirmación y el establecimiento de los puntos de muestreo y de relevamiento para la fauna y para la toma de salmuera y sedimento, etc. Asimismo, se interactuó mediante la técnica "focus group" con algunos pobladores de la localidad de San José de las Salinas y de Lucio V. Mansilla a fin de relevar opiniones y percepciones acerca de la evolución de la industria minera en la zona, temas relacionados con el acceso a los servicios públicos y a las nuevas actividades económicas en el sector como lo es la actividad turística, permitiendo realizar un informe documental de la opinión pública representativa del sector.

Una vez reconocido el sitio y el establecimiento de los parámetros a evaluar, se repitieron campañas de campo donde, en el caso del estudio de la fauna, se colocaron 4 cámaras trampas para la obtención de fotografías de fauna que pudiere encontrarse allí pero que no puede observarse de manera directa, la realización de censos de aves y reptiles mediante el recorrido de transectas previamente definidas de largo y ancho fijo y el registro de todo tipo de rastros (huellas, cuevas, heces, entre otros) que pudieran dar cuenta de la presencia especies animales en las transectas. Además, la toma de salmuera y sedimento para establecer la presencia y el estado de Artemia salina en el sector.

En el caso de la flora, además del análisis mediante la interpretación de imágenes satelitales, se realizó el reconocimiento de los individuos arbóreos y arbustivos existentes en el terreno, como así también la evaluación del estado de estos y su proliferación.

Para el análisis del medio físico se realizó la evaluación de la afectación que tiene la actividad de bombeo de salmuera desde el Lago hacia las piletas, considerando la capacidad de las bombas, la cantidad de horas y de días de bombeo, etc. También se realizó

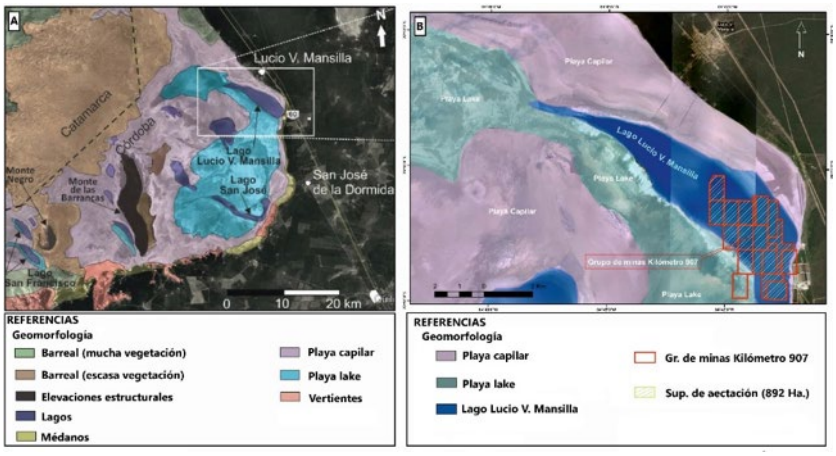


Fig. 2. A) Imagen tomada y modificada de Dargám y Elortegui Palacios, 2021. Mapa de ubicación del lago de Lucio V. Mansilla e identificación de los diferentes ambientes geomorfológicos reconocidos en el complejo evaporítico. Fig. B) Elaboración propia. Ubicación del proyecto y superficie de afectación.



Fig. 3. Flora en el terreno y en la playa salina A) Fotografía tomada con drone; se evidencia el gradiente de vegetación desde las Salinas al terreno B) Cardón (Stetsonia coryne) C) Chañar (Geoffroea decorticans) D) Jume Negro (Allenrolfea vaginata) E) Jumecillo (Heterostachys ritteriana)

la toma de muestras de salmuera en el Lago Lucio V. Mansilla para determinar los parámetros físicos y químicos en laboratorios en el periodo húmedo y periodo seco, y la toma de muestra de agua de perforaciones existentes, para evaluar el contenido de sal en las mismas y las condiciones de uso, entre otras cosas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del trabajo interdisciplinario realizado se pudieron conocer las características ambientales existentes en el sector y establecer la "base cero" y medidas de mitigación y/o recom-posición del sitio afectado por la actividad minera.

En el caso de la flora, mediante el análisis predial se reconoció vegetación típica de un ambiente salino, pudiéndose establecer desde las Salinas, que constituye un verdadero desierto salino, un gradiente de comunidades vegetales dominado por especies como el jumecillo (*Heterostachys ritteriana*), Jume Negro (*Allenrolfea vaginata*), Carne gorda (*Maytenus vitis-idaea*), entre las principales, y matorrales xerófilos facultativos dominados por el cachiyuyo (*Atriplex spp.*) y el palo azul (*Cyclolepis genistoides*). Alejándonos de la playa salina, elevaciones de pocos centí-metros determinan condiciones favorables para el establecimiento de comunidades arbustivas o arbóreas, tal es el caso de la presencia de rodales de chañar (*Geoffroea decorticans*), cardones como *Trichocereus candicans, Stetsonia coryne*, o comunidades dominadas por el mistol (*Ziziphus mistol*) y elementos propios de los matorrales halófitos que tienen un buen estado de conservación (fig.3).

Mediante la técnica de Evaluación Ecologica Rápida (EER) utilizada para el estudio de la fauna vertebrada e invertebrada presente en el terreno y en el Lago Lucio V. Mansilla, se estableció un listado de especies que se espera esté presente en el área, tanto de mamíferos, aves, y reptiles como así también una descripción de la abundancia y la dinámica de la población de la *Artemia franciscana*, invertebrado clave en el sistema acuático de las lagunas salobres de la región- en todos sus estadios (Fig. 4).

Con relevamientos realizados en las dos temporadas de muestreo (octubre - noviembre de 2024 y enero - febrero de 2025), se pudo confirmar la presencia de 104 especies representativas de la fauna local (14 mamíferos, 79 aves y 11 reptiles) con un total de 1003 individuos avistados (de las cuales 258 corresponden a mamíferos, 728 aves y 16 reptiles). En relación con el Gen Artemia, Los resultados obtenidos de las muestras de sedimento registradas en ambas campañas presentan una mayor densidad de quistes, en contraste con las muestras de salmuera, donde se registran en menor proporción. Las muestras de salmuera, además de los quistes, presentan indi-viduos de Artemias sp. en estadio de vida adulta. Si bien las densidades de individuos en estadio adulto de estas muestras, no es alta en las zonas de costa y playa (sitio de los puntos de muestreo), estos resultados son esperables para este monitoreo correspondiente a la estación húmeda. En esta estación, los quistes comienzan a eclosionar para continuar con su ciclo vital en función a su hidratación, la salinidad, el oxígeno disuelto, los nutrientes y la temperatura que presente el lago. Estas

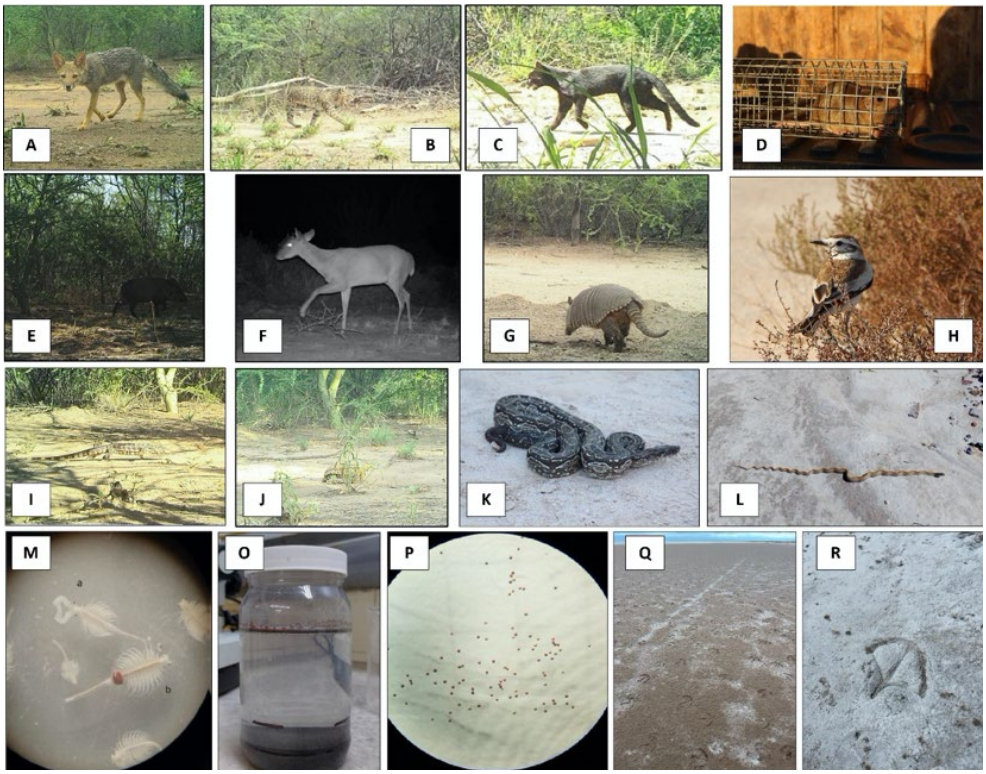


Fig. 4. Fauna vertebrada e invertebrada en el terreno y en playa salina A) Zorro B) Gato montés C) Gato montés variante melánica D) Tuco tuco E) Pecarí de collar F) Corzuela parda G) Mulita o Peludo H) Monjita Salinera I) Iguana J) Tortuga K) Boa constrictor L) Culebra M) Artemias sp. en estadio adulto bajo lupa O) Cistos/quistes en salmuera y sedimento P) Cistos/quistes bajo lupa) Q) y R) Huellas de flamencos.

variables están condicionadas por el régimen hidrológico del lago, el cual se vio condicionado por la escasez de precipitaciones y las altas temperaturas que se alcanzaron a nivel nacional durante la estación de verano 2024-2025, influyendo así en la eclosión de los quistes y posterior desarrollo de los crustáceos. En relación con la densidad de los crustáceos en cada punto de muestreo, la misma no es homogénea. Lo mismo sucede con la densidad de quistes entre los distintos puntos de muestreo.

También, mediante los trabajos realizados fue posible establecer la afectación que produce la actividad de bombeo en la totalidad del Lago somero Lucio V. Mansilla, como así también en la superficie de éste ocupada por el grupo de minas. El volumen total de la carga de la pileta está compuesto por salmuera bombeada del lago Lucio V. Mansilla y agua de menor salinidad obtenida de perforaciones. La proporción de diseño es 80% de salmuera (0,4 m) y 20 % de agua con menor salinidad (0,1 m). El total de salmuera bombeable, para llenar las piletas de producción a una altura de 0,4 metros es de 263.760 m^3. Si tomamos como referencia que en el momento en el cual se realiza el bombeo la laguna tiene una profundidad de 0,3 metros (30 centímetros), y que la superficie del Lago Lucio V. Mansilla ocupada por las minas bajo titularidad de LISAL es de 892 hectáreas, se llega a la conclusión que solo se afecta 0,0296 m (2,96 cm) de la profundidad de la laguna, lo que representa un 9,9% de su volumen. Además, si consideramos el total de la superficie del lago Lucio V. Mansilla donde se emplaza la mayor superficie de minas de interés (892 hectáreas), la cual ocupa 2.500 hectáreas, el caudal bombeado afecta 0,0106 m (1,06 cm) de la profundidad del lago, lo que representa un 3,5% de su volumen.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio realizado se puede determinar que la actividad minera instalada y en desarrollo no produce impactos ambientales significantes sobre el medio; esta afirmación se basa en los resultados sobre los muestreos de flora y fauna realizados y las evidencias que se pueden observar en el medio.

Los muestreos realizados muestran que, el predio correspondiente a la unidad de manejo de LISAL, posee una variedad de ambientes incluyendo áreas de bosque chaqueño en un buen estado de conservación, con importantes espacios y dimensiones para sostener una fauna diversa, representada por aves, mamíferos y reptiles. Se pudo detectar la presencia de especies endémicas o con problemas de conservación, en algunos casos con grado de amenaza en la Provincia (*Pecari tajacu, Mazama guazubira, Ctenomys bergi*) entre los mamíferos, (*Lophospingus pusillus* y *Neoxolmis salinarum*) entre las aves. Si bien la gran mayoría de las especies registradas, son de hábitos generalistas y se adaptan rápidamente a diferentes alteraciones (Zorros, Zorrinos), es destacable la presencia de algunas especies mencionadas anteriormente clasificadas bajo alguna categoriza de amenaza (Corzuela parda, Gato de monte). De las especies presentes, probablemente las más vulnerables sean aquellas propensas a ser cazadas por temor o daño

como los felinos pequeños, por caza deportiva, como la Corzuela y el Pecari, o para alimento como los peludos y quirquinchos, muy apetecidos en la zona. Se detectó la presencia en un importante número de individuos del Jabalí (Sus scrofa) especie exótica invasora y con capacidad de modificar y alterar el ambiente, además de competir con especies autóctonas. Es importante que se monitoree su densidad poblacional y ocasionalmente se intenten acciones de manejo para erradicarlos.

El área de bosque bien conservado funciona como un reservorio de biodiversidad que merece ser bien conservado y mantenido, evitando la caza extractiva y reducir la circulación de automotores a alta velocidad por los senderos laterales.

Respecto a la afectación que presenta la actividad minera en el Lago Lucio V. Mansilla, la presencia y/o ausencia de salmuera en el mismo y la formación del mineral en estado sólido, se encuentra limitado por el régimen hidrológico de recarga que a su vez están condicionado a las características ambientales existentes (lluvias, temperatura, velocidad y dirección del viento, etc.). Por lo que para realizar el bombeo de salmuera a las piletas es necesario el control de las condiciones del lago propiamente dicho como lo son la profundidad y salinidad.

Dado que las actividades productivas producidas por la empresa no evidencian afectación ambiental de importancia ni se observa en el sector deterioro ambiental producido por dicha explotación que ponga en riesgo el desenvolvimiento y la evolución del medio, este estudio de LBA se presenta como una oportunidad para establecer un punto de partida del conocimiento del medio y realizar un programa de manejo ambiental integral con la aplicación de medidas de prevención de impactos para garantizar la sustentabilidad ambiental de la actividad minera instalada y en desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a los organismos nacionales como la Universidad Nacional de Córdoba, a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, especialmente al equipo del Centro de Zoología Aplicada, al IDEA y CONICET.

Asimismo, al equipo de GEOTELLUS S.R.L., por su apoyo, paciencia, tiempo y revisión del trabajo, y a la empresa LA INDUSTRIAL SALINERA S.A., por estar siempre dispuesta, brindándonos las instalaciones y la información necesaria para el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

Aguiló Alonso, Miguel, Albaladejo Montoso, Juan, Aramburu Maqua, María Paz, Carrasco González, Rosa Maria, Castillo Sánchez, Victor, Ceñal González-Fierro, María Angeles, Cifuentes Morales, María, Cifuentes Vega, Pedro, Cristóbal López, María Angeles, Martín Duque, José Francisco, Escribano Bombín, Rafael, Glaría Galcerán, Germán, González Alonso, Santiago, González Barberá, Gonzalo, Iglesias Gómez, Juan, Iglesias del Pozo, Elena, López de Diego, Luís Ángel, Martín Llorente, Fernando, Martínez- Mena García, María, Milara Vilches, Roberto, Pedraza Gilsanz, Javier, Rastrollo Gonzalo, Ana, Rubio Maroto, R., Sanz Sa, José Manuel, Sanz Santos, Miguel Ángel and Valero Huete, Firma (2014). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Fundación Conde del Valle de Salazar (ETSI Montes): Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. ISBN 978-84-96442-55-9.

Almendra, C. M. (2023). *Relevamiento y caracterización de la fauna del predio de "La Industrial Salinera S.A" y sus alrededores* (Lucio V. Mansilla, Córdoba, Argentina). Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Ángel L. Cabrera (1971). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, Fitogeografía de la República Argentina.*

Argentina. (1997). Código de Minería (Texto ordenado por Decreto 456/1997).

Argentina. (1995). Ley 24.585 (Modifica el Código de Minería).

Beardmore, J. A., Pilla, E. J., & Thomas, K. M. (1996). *Genetic variation in Artemia: speciation, reproductive mode and potential for exploitation. In Improvement of the Commercial Production of Marine Aquaculture Species. Proc. of a Workshop on Fish and Mollusc Larviculture*, Santiago, Chile (pp. 157-163).

Bibby C, Burges N. & Hill D. (1993). *Bird census techniques. Academic Press*, London. Pp 257.

Clegg, J. S., & Trotman, C. N. (2002). *Physiological and biochemical aspects of Artemia ecology. In Artemia: Basic and applied biology* (pp. 129-170). Dordrecht: Springer Netherlands.

Bonino, E. E. [et al]. (2012). *La Conservación de la Fauna en Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Centro de Zoología Aplicada; Argentina.

Coirini, R. O., Karlin, M. S., & Reati, G. J. (Eds.). (2010). *Manejo sustentable del ecosistema Salinas Grandes, Chaco árido.* Marcos Sebastián Karlin.

Curto, E. D. (2006). *Artemia, el camarón de la sal. Bañados del rio Dulce y laguna Mar Chiquita* (Córdoba, Argentina), Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Argentina, 161-171.

Dargam, M., & Palacios, J. E. (2021). *Hidrogeoquímica y modelo de sedimentación evaporítica en lagos salinos poco profundos: Lucio V. Mansilla, Salinas Grandes, Córdoba, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina.*

GEOTELLUS S.R.L. (2020). *Estudio de Impacto Ambiental Grupo de Minas Kilómetro 907.*

GEOTELLUS S.R.L. (2025). *Informe Huella de Carbono Organizacional – Planta de beneficio de sal "La Industrial Salinera".*

Karlin, M. S. 2016. *Ethnoecology, Ecosemiosis and Integral Ecology in Salinas Grandes (Argentina). Revista Etnobiología* 14:24-38.

Ley Provincial N° 9.814, de *Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba*. (2010).

Ley Provincial N° 6.964, *Régimen de conservación de Áreas Naturales y creación del servicio provincial de Áreas Naturales de la Provincia de Córdoba* (Promulgada por Decreto 3442/1983)

Ley Provincial N° 6.964, *Régimen de conservación de Áreas Naturales y creación del servicio provincial de Áreas Naturales de la Provincia de Córdoba - DECRETO 464, Reserva Provincial de Usos Múltiples Salinas Grandes* (2003).

Ley Provincial N° 10.208, de la *Política Ambiental de la Provincia de Córdoba.* (2014).

coMoraga, P., Ávila, R., & Vilaxa, A. (2015). *Salinidad y temperatura óptimas para reproducción ovípara y desarrollo de Artemia franciscana*. Idesia (Arica), 33(1), 85-92.

Papeschi A G, Cohen R G, Pastorino X I, Amat F. (2000). *Cytogenetic proof that the brine shrimp Artemia franciscana (Crustacea, Branchiopoda) is found in Argentina*. Hereditas 2000;133(2):159-66.

Resolución 025/98 (1998). Autoridad Minera Concedente, y modificatorias.

Ruiz Posse, E., U. O. Karlin, E. Buffa, M. Karlin, C. Giai Levra, and G. Castro. (2007). *Ambiente de las Salinas Grandes Catamarca, Argentina.* Multequina 16:123-137.

Sato, Natalia E., Mallo, Juan C., y Fenucci, Jorge L. (2004). *Calidad de los quistes de Artemia persimilis (Piccinelli & Prosdocimi) (Crustacea: Branchiopoda) de diferentes zonas de Argentina, como alimento en acuicultura.*

Sayre, R., Roca, E., Sedaghatkish, G., Young, B., Keel, S., Roca, R., & Sheppard, S. (2000). *Nature in focus: rapid ecological assessment.* Island Press.

Sorgeloos P., Lavens P., Le P., Tackaert W. & Versichele D. (1986). *Manual para el cultivo y uso de Artemia en acuicultura.* FAO, Roma

TNC The Nature Conservancy, (2002). *Un Enfoque en la Naturaleza: Evaluaciones ecológicas rápidas. Virginia,* USA.

Torres, R., & Tamburini, D. (2018). *Mamíferos de Córdoba y su estado de conservación*. Editorial de la Universidad Nacional de Córdoba.

GEOLOGÍA COSTERA

MANEJO COSTERO EN EL SUDESTE BONAERENSE: REVISIÓN DE LAS PRINCIPALES OBRAS DE PROTECCIÓN EN COSTAS ACANTILADAS

María P. Bunicontro[1,2], Florencia López Marcomini[2], Silvia C. Marcomini[1,2] y Rubén A. López[1,2,3]
[1]CONICET – Universidad de Buenos Aires. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Argentina.
[2]Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología. Buenos Aires, Argentina.
[3]Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: paulabunicontro@hotmail.com

RESUMEN
Esta contribución pretende realizar una revisión de las principales obras de manejo costero que han sido implementadas en la costa sudeste de la provincia de Buenos Aires con el fin de minimizar o detener la erosión de la costa, favorecer el desarrollo de playa y disipar la energía de las olas. Las principales medidas de manejo costero utilizadas son las de moderación (espigones, rompeolas, montículos de bloques), las de acorazamiento (paredones verticales, montículos de bloques) y las de restauración (recarga artificial de playa). Actualmente, se estima que, entre la localidad de Miramar y Mar Chiquita, el 52% de la línea de costa está influenciada o ha sido intervenida con alguna (o más de una) obra de manejo costero. Las obras más utilizadas son las de moderación, principalmente espigones, totalizando 77% sobre la longitud de costa intervenida, seguida por acorazamiento (16%) y restauración (6%). Si bien la erosión costera se ha minimizado en algunos sectores y se ha favorecido el desarrollo de playa, el retroceso natural de la línea de costa se ha potenciado negativamente en sitios sin protección por los efectos adversos que generan dichas estructuras, particularmente debido al desbalance sedimentario y a la subsaturación de la deriva litoral desde la zona sur hacia el norte.

Palabras clave: costas, manejo, erosión.

ABSTRACT
This contribution aims to provide a review of the main coastal management works that have been implemented along the southeastern coast of Buenos Aires province to minimize or stop coastal erosion, promote beach development, and dissipate wave energy. The main coastal management measures used include moderation structures (groynes, breakwaters, block mounds), armoring defenses (vertical seawalls, block mounds), and restoration efforts (artificial beach nourishment). Currently, it is estimated that between the towns of Miramar and Mar Chiquita, 52% of the coastline is influenced or has been intervened upon with one or more types of coastal management works. The most frequently used work is moderation, mainly breakwaters, totaling 77% of the length of the coast intervened, followed by armoring (16%) and restoration (6%). Although coastal erosion has been reduced in some areas and beach development has been promoted, the natural shoreline retreat has worsened in unprotected areas due to the adverse effects caused by these structures—particularly because of sediment imbalance and the undersaturation of the longshore drift from the southern to the northern sector.

Keywords: coasts, management, erosion

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la costa sudeste bonaerense, la ciudad de Mar del Plata se constituye como un destino turístico histórico y un centro portuario estratégico de gran envergadura, cuyos cambios en el paisaje costero se remontan a principios del siglo XX, mientras que otras localidades cercanas como Miramar y Chapadmalal hacia el sur, y Camet Norte, Mar de Cobo y Mar Chiquita hacia el norte, desarrollan su economía principalmente en base al turismo estival. En este sentido, la rápida demanda por espacios litorales y la falta de planificación ambiental a nivel regional ha llevado a una gran modificación del paisaje provocando desequilibrios en la dinámica costera natural (Marcomini y López, 2014; Isla et al., 2018, Merlotto et al., 2017, Bunicontro et al., 2013, 2015; López y Marcomini, 2002, 2011, 2014; López et al. 2023). El intenso uso de las playas y el territorio costero para emprendimientos urbanos ha derivado en la toma de medidas de conservación de la línea de costa y la playa con resultados contrapuestos. Naturalmente, en el sector costero en estudio prevalecen los procesos erosivos. Sin embargo, el retroceso natural de la costa se ha potenciado negativamente en zonas sin protección por los efectos secundarios de la implementación de estructuras de acorazamiento y de moderación. Estas obras se han construido con el objetivo de minimizar y hasta detener por completo el retroceso de la línea de costa, así como para

propiciar la acumulación de arena para el desarrollo de playa. Sin embargo, en muchos casos se ha obstaculizado el aporte natural de arena proveniente de la erosión de los afloramientos a las corrientes litorales, que son -en toda la costa argentina- la principal fuente de aporte de sedimentos al sistema litoral (Isla y Cortizo, 2014). Según Bunicontro et al. (2015) el aporte de arena a la deriva litoral alcanza aproximadamente el 50% en el sector norte de estudio.

El objetivo de este trabajo es realizar un relevamiento de las principales obras de manejo costero que existen actualmente en la costa sudeste bonaerense (de acorazamiento, moderación y restauración) y estimar el grado de afectación que tiene cada una sobre la costa.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Zona de estudio, problemática erosiva y antecedentes

El área de estudio se extiende a lo largo de unos 80 km e involucra la franja costera ubicada al sudeste de la provincia de Buenos Aires, entre las localidades de Miramar, partido de General Alvarado, y Mar Chiquita, partido de Mar Chiquita (Fig. 1). La costa se caracteriza por presentar acantilados activos con litologías de variable resistencia, mostrando en general una configuración irregular de cabos y bahías con playas de arena. Particularmente afloran en la zona de Mar del Plata rocas sedimentarias silico-clásticas de edad ordovícica de alta resistencia (Formación Balcarse) y secuencias sedimentarias de edad pleistoceno-holocena en la que predominan arenas finas a muy finas con intercalaciones de niveles de origen volcánico (loess), paleosuelos y delgados niveles de material carbonático (Formación Pampeano), tanto en la zona sur desde Miramar hasta Chapadmalal como en la zona norte desde Parque Camet hasta Mar Chiquita. La zona presenta un clima templado húmedo, el régimen de mareas es micromareal semidiurno y la deriva litoral neta es en sentido S-N. Las mayores alturas de olas se alcanzan fundamentalmente en los eventos de sudestadas, las cuales aumentan el nivel del agua momentáneamente y potencian la erosión debido a los fuertes vientos provenientes desde el cuadrante S y SE.

Respecto al inicio de las obras de protección costera, el caso más relevante es el de Mar del Plata, en donde solamente entre 1920 y 1970 se instalaron más de 60 espigones de roca y hormigón de forma perpendicular a la costa. Si bien estas obras generaron retención de arena en el lado sur de cada espigón, la onda erosiva fue trasladada hacia las localidades del norte (Schnack et al., 1983; Isla y Lasta, 2006; Isla et al. 2001; Isla y Bértola, 2005, Tassara y Garcia, 2005; Bunicontro et al., 2015; Suarez Cruz, 2019). En este sentido, entre las localidades de Playa Dorada y Atlántida se ha estimado una tasa de retroceso de 0,21 m/año entre 1982 y 2001 (DPSOH, 2001), entre las localidades de Santa Clara del Mar y Camet Norte los valores han sido de 2 m/año para el periodo 1958-2012 (Bunicontro, 2012; Bunicontro et al., 2013), de entre 0,1 y 0,8 m/año para el periodo 2011-2015 (Medina et al., 2016) y entre 0,5 y 1 m/año para el periodo 1957-2009 (Isla et al., 2018), dependiendo el sector. En Mar Chiquita, las tasas de erosión varían entre 5 y 7 m/año (Isla, 1997; Merlotto y Bértola, 2009 y San Martín, 2012) mientras que en Mar de Cobo se estimaron entre 3,5 y 5 m/año (Schnack et al., 1983). Este escenario demuestra el estado crítico de algunas localidades y la necesidad de intervenir la costa para preservar los espacios litorales (rutas, viviendas, balnearios) y los recursos costeros turísticos (áreas de recreación y playa).

Estudios sobre manejo de la erosión costera, impactos antrópicos y dinámica litoral han sido realizados por Isla et al. (2001,

2015, 2018), Bértola (2006), Bértola et al. (2013), López y Marcomini (2002, 2011, 2014), Marcomini y López (1993, 2006a); Marcomini et al. (2007) y, más recientemente, por López et al. (2023), Mojica et al. (2023), Fernández y Bértola (2023), Merlotto y Bértola (2023) y Bunicontro et al. (2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se ha realizado mediante diversos relevamientos de campo que se han ido realizando desde el 2011 hasta la actualidad en la zona, una revisión bibliográfica de los antecedentes y el uso de imágenes satelitales de distintos años provistas por el software Google Earth Pro. Sobre la imagen más reciente disponible se contabilizó en forma lineal (en km) la afectación de cada una de las estructuras.

RESULTADOS

Desde la localidad de Miramar al sur hasta la localidad de Mar Chiquita al norte, se registran como principales clases funcionales (Pope, 1997) una multiplicidad de estructuras de moderación y acorazamiento (llamadas también “obras duras”, no removibles) a las cuales se suman algunas obras puntuales de restauración.

Las más extendidas son las obras de moderación (Miramar, Chapadmalal, Mar del Plata, Santa Clara del Mar, Mar de Cobo y Mar Chiquita), representadas mayormente en escolleras y espigones que, conformados por bloques de rocas cuarcíticas, restos de construcciones o de hormigón premoldeados, se presentan en forma de “T” o “J”, rectos o curvados, transversales u oblicuos a la línea de costa, e incluso con diseños combinados entre sí (Fig. 2A, 2C y 2D). Este tipo de estructuras son utilizadas en áreas donde el problema es la erosión crónica producto de una pérdida de disponibilidad de sedimentos. No son utilizados directamente con el fin de proteger la costa, sino de recuperar la playa, aunque en forma indirecta muchas estructuras de moderación protegen la línea de costa y, a su vez, la playa distal (Marcomini y López, 2014). Si bien han servido para la recuperación de volúmenes importantes de sedimentos de playa, han ocasionado efectos adversos como la subsaturación de la deriva litoral hacia el norte y cambios en el sustrato que favorecen el asentamiento de ecosistemas biológicos alóctonos, pasando de ser fondos blandos a fondos duros.



Figura 2. Espigones de diversos tipos y rompeolas desvinculados.

Dentro de las estructuras de moderación, también se encuentran los rompeolas desvinculados (Fig. 2 B) y los montículos de bloques ubicados a lo largo de la costa que se asientan ligeramente separados de la base de los acantilados (Parque Camet, Playa Dorada, Santa Helena, Frente Mar). El caso más claro de instalación de rompeolas desvinculados es en el Barrio Los Acantilados en donde actualmente existen cuatro estructuras, instaladas entre 2010 y 2012 (Isla et al., 2018) a unos 200-250 m de la línea de costa con el fin de no interrumpir completamente la deriva litoral e inducir el depósito de playa.

En el caso de los montículos de bloques, en la Fig. 3A-B se puede observar la evolución del espacio entre las estructuras y la línea de costa, entre una instancia de reciente instalación de las estructuras y un estado más avanzado, en el cual se inactiva el acantilado, disminuyendo su pendiente y desarrollando vegetación. Este tipo de montículos no favorecen la acumulación directa de sedimentos para la formación de playa como los espigones o los rompeolas, pero sí moderan la erosión costera favoreciendo la inactividad de los acantilados que se encuentran por detrás, disipando la energía del oleaje que llega al afloramiento y dando lugar a la generación de espacios de sedimentación entre los montículos y la línea de costa.



Figura 3. (A y B) Montículos de bloques en la zona de Playa Dorada, (C) Recarga artificial de playa en la costa de Playas Doradas, (D) acorazamiento con bloques y tetrápodos en Parque Camet.

Por otro lado, las obras de acorazamiento en la zona de estudio incluyen paredones verticales de hormigón y montículos de bloques que pueden ser de rocas cuarcíticas, así como de formas premoldeadas (tetrápodos o cilindros) que se encuentran directamente apoyados sobre la base de los acantilados (Fig. 3D). Han sido reconocidos en Mar del Plata, Santa Clara del Mar, Chapadmalal, Miramar, entre otros. Este tipo de obra tiene como objetivo forzar la inmovilidad de la línea de costa, estableciendo un límite físico al retroceso costero. Estas obras han tenido éxito en muchos casos, aunque impiden el aporte de sedimentos a la deriva litoral, favorecen la reflexión del oleaje aumentando así los fenómenos de erosión en las playas, y cambian la configuración de la línea de costa.

Finalmente, la obra de restauración utilizada en la zona es la recarga artificial de playa, en la cual se introducen sedimentos en un sector de playa con el fin de mitigar la erosión crónica y generar un depósito que proteja la playa distal de la erosión provocada por tormentas (Marcomini y López, 2014). Este es el único tipo de manejo que promueve la saturación de sedimentos de las corrientes litorales. El proyecto de recarga artificial de playa más grande de la provincia de Buenos Aires ha sido en las playas Varese, Bristol y Grande de Mar del Plata en 1998 (Marcomini y López, 1999, 2004, 2006b) con resultados muy buenos a largo plazo. Otros ejemplos de obras de recarga de menor envergadura han sido en el balneario Honu Beach en 2014 (Bértola et al., 2006), en Mar Chiquita y, recientemente entre 2021 y 2022, en el frente del barrio Playas Doradas (Fig. 3C) (Bunicontro et al. 2024).

Como resultado de un análisis general en la zona, se ha observado que aproximadamente el 52,7% de la costa en estudio (Tabla 1) ha sido afectada directamente o esta influenciada por alguna (o más de una) obra de manejo costero de tipo moderación, acorazamiento y restauración. Esto implica que, de un total de aproximadamente 80 km de costa, unos 42 km se encuentran intervenidos de alguna u otra manera. Del total de costa afectada por alguna obra (52,7%), la clase funcional más utilizada ha sido la moderación (77%), mayormente dada por la instalación de espigones y escolleras (62%), seguida por acorazamiento (16%) y finalmente por la restauración (6%) (Tabla 1).

MODERACIÓN			ACORAZAMIENTO		RESTAURACIÓN
Rompeolas	Espigones	Montículos de bloques separados de la línea de costa	Montículos de bloques adosados a la línea de costa	Muros	Recarga artificial de playas
1,2 %	26,2 % (espigones en "T", "J" y combinados)	6,6 %	5,3 %	3,5 %	3,3 % (solo en Mar del Plata)
	6,5 % (muelles, escolleras, emisario submarino)				
1,2 %	32,7 %	6,6 %	5,3 %	3,5 %	3,3 %
Total sobre la costa estudiada: 40,5 %			8,8 %		3,3 %

Tabla 1. Influencia de los distintos tipos de obras a lo largo de la zona de estudio, totalizando un 52,6%.

CONCLUSIONES

La implementación de obras a lo largo de la costa sudeste de Buenos Aires ha sido amplia en cuanto a sus métodos y distribución espacial. Las estructuras utilizadas para mitigar la erosión en costas acantiladas han logrado en muchos casos el objetivo final con el que fueron instaladas. Sin embargo, también han demandado grandes costos y han inducido efectos indeseados como modificaciones del perfil de playa, variación en la composición de los sedimentos, erosión diferencial en zonas no protegidas, cambios en los fenómenos de reflexión y difracción del oleaje, modificación del tipo de sustrato, modificación en las áreas de esparcimiento y uso recreativo, e impactos visuales al paisaje natural.

Pese a este escenario, se continúan planificando proyectos de acorazamiento y de moderación a lo largo de la costa, los cuales incluso también generan posiciones contrapuestas entre los mismos pobladores locales. Esto permite concluir que para alcanzar soluciones más eficientes es necesario un estudio integrado de las problemáticas, que vaya más allá de los límites municipales o locales, generando estrategias de planificación a escala regional para un uso sustentable de los recursos costeros que ofrece la provincia.

En este contexto, se recomienda considerar, por un lado, el mantenimiento requerido por las obras junto a un monitoreo periódico de los efectos generados a corto y mediano plazo; y por otro lado, la implementación de medidas de adaptación (que contemplen aspectos no solo físicos sino también biológicos, culturales, sociales y económicos) tendientes a orientar a las actividades humanas a adaptarse a las posibilidades y limitaciones del sistema costero natural, sin aumentar el deterioro provocado.

REFERENCIAS

Bértola, G. (2006). Morfodinámica de playas del Sureste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 13(1), 31–57.

Bertola, G., Merlotto, A., Cortizo, L., y Isla, F. (2013). Playas de bolsillo en Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 70(2), 267–278.

Bunicontro, M. P., Medina, R. A., Albite, J. M., Marcomini, S. C., y López, R. A. (2025). Recarga de playa en el sector costero de Playa Dorada (partido de Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires): Cambios geomorfológicos y sedimentológicos en la dinámica costera natural. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 81(4), 654–678.

Bunicontro, P. (2012). Geología, dinámica costera y ordenamiento territorial en Santa Clara del Mar, municipio de Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires [Tesis de licenciatura, Universidad de Buenos Aires].

Bunicontro, P., Marcomini, S., y López, R. (2013). Zonificación de la erosión costera en la localidad de Santa Clara del Mar, provincia de Buenos Aires. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 31, 1–15.

Bunicontro, P., Marcomini, S., y López, R. (2015). The effect of coastal defense structures (mounds) on southeast coast of Buenos Aires province, Argentine. Ocean and Coastal Management, 116, 404–413. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.011

Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas (DPSOH). (2001). Plano N° 6, Obra: "Defensa de la ruta provincial N° 11 mediante protección del acantilado entre Mar del Plata y Santa Clara del Mar" [Plano, escala 1:2.000].

Fernández, J. M., y Bértola, G. R. (2023). Shoreline evolution of an urbanized coastal dune: Médanos private neighborhood, Necochea, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 124, 104258.

Isla, F. I. (1997). Seasonal behaviour of Mar Chiquita tidal inlet in relation to adjacent beaches, Argentina. Journal of Coastal Research, 13(4), 1221–1232.

Isla, F. I., Bértola, G. R., Farenga, M. O., y Cortizo, L. C. (2001). Variaciones antropogénicas de las playas del sudeste de Buenos Aires, Argentina. Revista Pesquisas em Geociências, 28, 27–35.

Isla, F. I., Cortizo, L., Merlotto, A., Bértola, G., Pontrelli Albisetti, M., y Finocchietti, C. (2018). Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. Ocean & Coastal Management, 156, 107–116.

Isla, F. I., Taglioretti, M. L., y Dondas, A. P. (2015). Revisión y nuevos aportes sobre la estratigrafía y sedimentología de los acantilados entre Mar de Cobo y Miramar, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 72(2), 235–250.

Isla, F., y Bertola, G. (2005). Litoral Bonaerense. En Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino (Cap. XVI, pp. 265–276). La Plata.

Isla, F. I., y Cortizo, L. C. (2014). Sediment input from fluvial sources and cliff erosion to the continental shelf of Argentina. Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management, 14(4), 541–552.

Isla, F., y Lasta, C. (2006). Manual de manejo costero para la provincia de Buenos Aires (1.ª ed.). EUDEM.

López, R. A., Marcomini, S. C., Bunicontro, M. P., y López Marcomini, F. (2023). Dinámica costera, erosión y cambio climático. En E. Rovere et al. (Eds.), Importancia de las geociencias en el ámbito social (pp. 243–260). Mundo Gráfico.

Marcomini, S. C., López, R. A., y Spinoglio, A. (2007). Uso de la morfología costera como geoindicador de susceptibilidad a la erosión en costas cohesivas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 62(3), 396–404.

López, R., y Marcomini, S. (2002). Pautas para el manejo de costas acantiladas y de dunas, provincia de Buenos Aires. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 18, 59–68.

López, R., y Marcomini, S. (2011). Problemática de los ambientes costeros, sur de Brasil, Uruguay y Argentina. Ed. Croquis.

López, R. A., y Marcomini, S. C. (2014). Manejo costero. En C. Goso (Ed.), Nuevas miradas a la problemática de los ambientes costeros (pp. 355–370). Editorial DIRAC, Universidad de la República.

Marcomini, S. C., y López, R. A. (1993). Coastal protection effects at Buenos Aires, Argentina. En Proceedings of the Eighth Symposium on Coastal and Ocean Management Coastal Zone '93 (Vol. III, pp. 2724–2738). Nueva Orleans, EE. UU.

Marcomini, S. C., y López, R. A. (1999). Recarga artificial de las playas. Revista Gerencia Ambiental, 408–414.

Marcomini, S. C., y López, R. A. (2004). Evolution of a beach nourishment project in Mar del Plata. Journal of Coastal Research, SI 39, 835–838.

Marcomini, S. C., y López, R. A. (2006a). Geomorfología costera y explotación de arena de playa en la provincia de Buenos Aires y sus consecuencias ambientales. Revista Brasileira de Geomorfologia, 7(2), 61–71.

Marcomini, S. C., y López, R. A. (2006b). Evolution of a beach nourishment project in Mar del Plata. Journal of Coastal Research, 39(SI), 835–838.

Marcomini, S., y López, R. (2014). Erosión y manejo costero. Eudeba.

Medina, R. A., Martínez, A. L., Mormeneo, L., y Richiano, S. M. (2016). Cambios morfosedimentarios causados por la construcción de un espigón en Camet Norte, provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 73(2), 270–279.

Merlotto, A., Bértola, G., y Isla, F. (2017). Riesgo de erosión costera en la provincia de Buenos Aires. Revista Universitaria de Geografía, 26(2), 37–72.

Merlotto, A., y Bértola, G. (2009). Coastline evolution at Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. Ciencias Marinas, 35(3), 271–286.

Merlotto, A., y Bértola, G. (2023). Seasonal beach profile variability and short to medium-term evolution of beaches in the municipality of General Alvarado, Buenos Aires province, Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 129, 104534. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104534

Mojica, M., Anfuso, G., y Isla, F. (2023). Evolución de la costa entre 1987–2020 para la zona sur de la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires (Argentina). Quaternary and Environmental Geosciences, 14(2), 1–14.

Mojica, M., Lamarchina, S., Anfuso, G., y Isla, F. (2022). Reploblamiento de playas del sur de Mar del Plata (Argentina). Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 29(1), 23–41.

Pope, J. (1997). Responding to coastal erosion and flood damages. Journal of Coastal Research, 13, 704–710.

San Martín, L. (2012). Erosión y manejo costero en Mar Chiquita y Mar de Cobo, provincia de Buenos Aires [Tesis de licenciatura, Universidad de Buenos Aires].

Schnack, E., Álvarez, J., y Cionchi, J. (1983). El carácter erosivo de la línea de costa entre Mar Chiquita y Miramar, Provincia de Buenos Aires. En Simposio de Oscilaciones del Nivel del Mar durante el Último Hemiciclo Deglacial en la Argentina (pp. 118–130).

Suárez Cruz, M. (2019). Geomorfología y manejo costero en la localidad de Camet Norte, partido de Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires (Trabajo final de licenciatura inédito). Universidad de Buenos Aires.

Tassara, D., y García, M. (2005). Erosión marina, vulnerabilidad e impactos antrópicos en el sudeste bonaerense (municipio de Mar Chiquita, Buenos Aires, Argentina). Revista Tiempo y Espacio, 5, 1–19.

EVALUACIÓN DE LAS OBRAS DE ACORAZAMIENTO PRESENTES EN EL PARTIDO DE LA COSTA

Florencia López Marcomini[1], Rubén López[1,2,3], Silvia Marcomini[1,2] y Maria Paula Bunicontro[1,2]
[1]Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología. Buenos Aires, Argentina.
[2]CONICET – Universidad de Buenos Aires. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Argentina.
[3]Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV).
Mail de contacto: flopylmar@gmail.com

RESUMEN
Durante los últimos 50 años se han reconocido diversas problemáticas asociadas a la erosión costera en localidades litorales de la provincia de Buenos Aires. Si bien se trata de un proceso natural, el uso intensivo de los recursos costeros y la falta de planificación urbana han intensificado significativamente los procesos erosivos. Desde hace aproximadamente 30 años se comenzaron a implementar medidas para mitigar estos efectos (Lopez et al., 2018).
En este trabajo se hace hincapié en las estructuras del tipo acorazamiento que se encuentran en el Municipio de La Costa, clasificándolas según sus dimensiones y el ente responsable de su construcción. Asimismo, se analizan los procesos de degradación de estas instalaciones, identificando los daños más frecuentes tanto en condiciones normales como durante eventos de tormenta. Finalmente, se presentan una serie de recomendaciones sobre las distintas tipologías de estructuras, su funcionamiento y desempeño.

Palabras clave: erosión de Costas, acorazamiento, defensa de costa

ABSTRACT
Over the past 50 years, various issues associated with coastal erosion have been identified in coastal towns of the Buenos Aires Province. Although it is a natural process, the intensive use of coastal resources and the lack of urban planning have significantly intensified erosive processes. Approximately 30 years ago, measures began to be implemented to mitigate these effects (Lopez et al., 2018). This study focuses on armor-type structures located in the Municipality of La Costa, classifying them according to their dimensions and the entity responsible for their construction. In addition, it analyzes the degradation processes of these facilities, identifying the most frequent damages under both normal conditions and during storm events. Finally, a series of recommendations is presented regarding the different types of structures, their functioning, and performance.

Keywords: coastal erosion, armoring, coastline defense.

INTRODUCCIÓN

El Partido de La Costa se encuentra en la zona centro-este de la provincia de Buenos Aires. La costa de este sector está dominada principalmente por el oleaje, que genera una corriente de deriva litoral que moviliza los sedimentos de sur a norte. Las playas presentan anchos que varían de 40 a 200 m, la pendiente media es de 0,028 (1º36'), no se observa la presencia de bermas estables, con excepción de los extremos de la zona de estudio donde las bermas presentan importantes desarrollos (Punta Rasa y Punta Médanos). La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte central de la cuenca del río Salado y los sedimentos que conforman el sustrato superficial corresponden a la Formación Punta Médanos y las Facies Mar de Ajó de la Formación Pozo N0 17, correspondientes al campo de dunas costeras y a los depósitos de cordones litorales respectivamente (Parker 1979).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un relevamiento de campo con el objetivo de monitorear la respuesta de las obras de acorazamiento en sectores costeros afectados por la erosión (López y Marcomini, 2005). El estudio se basó en información recolectada durante los últimos diez años en el Partido de La Costa.

Se utilizaron imágenes obtenidas en campañas anuales, así como también en momentos asociados a eventos de tormenta, lo que permitió registrar condiciones tanto ordinarias como extremas. Además, se procesaron imágenes satelitales, se realizaron relevamientos de campo y se confeccionaron perfiles de playa y mapas topográficos mediante el uso de una estación total.

Asimismo, se caracterizaron y clasificaron los distintos modelos de obras duras implementadas en la región. La integración de

los datos permitió analizar la respuesta de los diferentes diseños de obras de acorazamiento y su impacto sobre la dinámica y la morfología costera.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las obras de acorazamiento (Pope, 1997) pueden clasificarse en estructurales y no estructurales (Tabla 1), en función de su tipo de construcción, disposición y materiales constitutivos. Dentro de las estructurales es posible diferenciar, por un lado, las de carácter individual, generalmente impulsadas por individuos, cuyas propiedades están afectadas por la erosión. Por otro lado, se encuentran las integradas, que forman parte de una planificación frente al riesgo costero determinada por el organismo provincial competente.

Los principales tipos de obras de acorazamiento identificadas en el área de estudio son:

- Tetrápodos: estructuras de hormigón con brazos ensambladas y apiladas (Figura 1a). Este método clasificado como estructural e integrado, fue utilizado como medida de acorazamiento en los casos en que se colocaron los tetrápodos al pie de las edificaciones en riesgo y como medida de moderación en los casos donde se colocaron en la playa distal. Dado los costos y la dimensión de estas obras suelen ser realizadas de forma institucional.
- Gaviones: estructuras de alambre fosforado o revestido con PVC o polímeros que conforman cajones, rellenos con distintos tipos de materiales (piedras, adoquines, escombros, etc.). Han sido ampliamente utilizadas en los últimos años en el Partido de La Costa. Se apilan formando un paredón vertical (Figura 1b).
- Materiales sueltos: usualmente se utilizan escombros para conformar pedraplenes (Figura 1c). Estas medidas no estructurales mayormente se realizan como una respuesta, por parte de las delegaciones municipales, a reclamos de los vecinos de las propiedades afectadas. También es realizada en forma individual por los vecinos que colocan escombros delante de sus propiedades con el objeto de contener el retroceso de la línea de costa. Todas las obras monitoreadas de este tipo no contaron con un proyecto ni fundamentos ingenieriles básicos.
- Paredones: construcciones paralelas a la línea de costa, realizadas con diversos materiales y dimensiones (Figura 1d). Estas obras son realizadas tanto por el Estado como por los individuos particulares; siendo la principal diferencia entre ellas las dimensiones, características constructivas y planificación de la misma.
- Cilindros de geotextil: consiste en la utilización de malla permeable y flexible de fibras sintéticas, principalmente polipropileno y poliéster, conformando tubos rellenos de arena apoyados sobre una base de suelo-cemento. Este tipo de defensa suele ser utilizada en obras de protección combinadas (Figura 1e).
- Defensas combinadas: instalaciones que integran dos o más de los tipos mencionados (por ejemplo, paredones con geotextil, o materiales sueltos combinados con estructuras rígidas) como las observadas en la Figura 1f.

ACORAZAMIENTO		
ESTRUCTURALES		NO ESTRUCTURALES
INDIVIDUALES	INTEGRADAS	
Materiales Sueltos Paredón Cilindros de Geotextil Defensa Combinada	Paredón Cilindros de Geotextil Gaviones Tetrápodos Defensa Combinada	Materiales Sueltos Geotextil Tetrápodos

Tabla 1: Clasificación de obras de defensa tipo Acorazamiento en el municipio de la costa.

El presente trabajo tiene por objetivo analizar las problemáticas asociadas a la erosión costera en zonas litorales. Para ello, se propone una clasificación estructurada en tres categorías: causas, efectos y consecuencias (Tabla 2).

Entre las causas predominantes se identifican la interacción con el oleaje y la ocurrencia de tormentas, las cuales generan condiciones hidrodinámicas que favorecen los procesos erosivos.

Los efectos detectados en las estructuras comprenden fracturas estructurales, tanto con desplazamiento como sin él, así como procesos de socavamiento en sus componentes frontal y lateral, afectando directamente la estabilidad de las estructuras construidas sobre la línea de costa.

Como consecuencia de estos efectos, se han registrado fallas estructurales en distintas etapas, entre las que se destacan el descalce de estructuras, vuelcos, desplazamientos laterales, hundimientos y colapsos totales, siguiendo un orden secuencial en función del grado de deterioro.

En estructuras como gaviones, cilindros de geotextil y paredones, se presentan daños asociados al descenso del nivel de la playa. La pérdida de soporte genera fisuras en los paredones y fracturas en los encadenados (Figura 2a y b). Además se distinguió la desestabilización de las estructuras que provocan deformaciones y vuelcos (Figura 2a, c, d y e).



Figura 1: Defensas del tipo acorazamiento a) Tetrápodos b) Gaviones c) Materiales sueltos d) Paredones verticales e) Defensa combinada de paredón y tubo de geotextil. f) Combinada tablaestaca, manta de geotextil y recarga de arena.

A medida que los procesos erosivos se intensifican, el deterioro de las estructuras continúa hasta producir su descalce. Como consecuencia, puede observarse la caída total o parcial de los distintos tipos de defensas, incluyendo en muchos casos las edificaciones que fueron objeto de protección. Particularmente los cilindros de geotextil adicionan fenómenos de remoción en masa internos, provocando su desmantelamiento, debido a que el material de relleno, arena, es colocado en pendientes superiores al ángulo de estabilidad de la misma (Figura 2f).

Por otro lado, los tetrápodos de hormigón no cumplieron una función significativa en la protección costera. La ausencia de un sustrato portante (compuesto principalmente por arena), sumada a la acción continua del oleaje, provocó su rápido hundimiento sin lograr detener el retroceso de la línea de costa.

Una situación similar se observa en la construcción de pedraplenes con materiales sueltos, conformados principalmente por escombros, los cuales presentan escasa estabilidad estructural y limitada efectividad para mitigar el proceso erosivo.



Figura 2: Daños más observados en los distintos tipos de acorazamiento a) Paredones hundidos con fisura vertical b) Fisura vertical de fundación c) Fisuras por socavamiento lateral y frontal d) Caída de paredones e) Exhumación de defensa por descenso f) Desmantelamiento de tubo de geotextil.

La combinación de estructuras, como ser paredones verticales con cilindros de geotextiles en la base figura 1e, permitió más duración al paredón. En otros casos se combinó tablaestaca con geotextil y recarga de arena (Figura 1f).

CAUSAS	EFECTO		CONSECUENCIAS
Interacción del oleaje Acción de las tormentas Descenso del nivel de playa	Fracturas	Sin desplazamiento Con desplazamiento	Descalce Vuelcos Deformación Hundimientos Caídas
	Socavamiento	Frontal	
		Lateral	

Tabla 2: Caracterización de las problemáticas asociadas a la erosión costera.

CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar los diferentes tipos de afecciones y deterioros que presentan estas estructuras, y proponer una clasificación de los mismos. Si bien los daños varían según el tipo de acorazamiento implementado, se reconoce que las consecuencias finales tienden a ser similares, manifestándose principalmente en procesos de vuelco y colapso de los sistemas de defensa.

La inexistencia de un sustrato rocoso en las cercanías de la superficie en este tipo de costa, permitió el socavamiento de las estructuras provocando el hundimiento diferencial de las mismas.

La gran extensión longitudinal de la costa sin accidentes permitió que el oleaje actuara sobre los cierres laterales de las obras desestabilizando las estructuras.

La utilización de paredones, gaviones y geotextiles proveen de una protección temporal condicionada principalmente por la profundidad de fundación, el diseño estructural y la condición de cierre de los laterales. La utilización de estas obras en forma aleatoria por los vecinos (estructuras individuales), tienen baja eficiencia en mitigar el retroceso de la costa y menor durabilidad que las integradas.

Las obras combinadas por paredones y geotextiles presentaron mayor duración.

Las estructuras de acorazamiento causaron significativos descensos de los niveles de playa.

La presencia de estas estructuras, abandonadas en la playa, constituye un factor de riesgo para la integridad física de los visitantes y un elemento de degradación ambiental, comprometiendo la calidad del destino turístico.

Gracias a sus propiedades modulares y constructivas, los gaviones pueden ser reacondicionados, desarmados y reubicados, lo que los convierte en una solución considerable para enfrentar escenarios críticos de erosión y retroceso costero.

En términos generales, se concluye que este tipo de estructuras resulta de baja efectividad para mitigar el retroceso de la línea de costa. Su objeto se cumple temporalmente, su eficiencia y vida útil depende del tipo de instalación, los materiales utilizados, el grado de planificación técnica de la obra y su mantenimiento.

REFERENCIAS

López R.A. y Marcomini, S.C, y Lopez Marcomini F.V.2018. Comportamiento de obras de defensa duras en costas de dunas. 1° Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Resumen Pag.1-3, CD. San Luis.

López R.A. y Marcomini, S.C., 2005.Eficiencia de las obras de defensa en costas de dunas, Municipio de La Costa. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.* No 21, 157-165.

Parker G., 1979. Geología de la planicie costera entre Pinamar y Mar de Ajó, provincia de Bs. As. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. XXXIV 3:167-183.

Pope J., 1997. Responding to Coastal Erosion and flooding damage. *Journal of Coastal Research*, 13(3), 704-710.

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE DEFENSA COSTERA EN LOS PARTIDOS DE AVELLANEDA, QUILMES Y BERAZATEGUI, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Melisa S. Rossi[1,2,3], Rubén A. López[1,2]
[1]Universidad Nacional de Avellaneda, Departamento de Ambiente y Turismo.
[2]Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas.
[3]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mail de contacto: melisa.s.rossi@gmail.com

RESUMEN
El sector costero de Avellaneda, Quilmes y Berazategui, ubicado en el margen sur del estuario del Río de la Plata, presenta una alta heterogeneidad en las estructuras de estabilización costera aplicadas, reflejo de una red de intervenciones desintegrada. En el relevamiento realizado se identificaron zonas con rellenos antrópicos en el norte de Avellaneda, sectores con estructuras de defensa costera deterioradas en el sur de Quilmes y tramos de costa natural en el sur de Avellaneda y en Berazategui. Se observó un deterioro significativo en varias estructuras de defensa costera a lo largo de la zona de estudio. En particular, al sur del Pejerrey Club en la localidad de Quilmes, el camino ribereño que funciona como un paredón vertical presenta fracturas y socavamientos, por lo que se incorporaron por delante montículos rocosos para evitar el colapso del mismo. Este caso pone en evidencia los riesgos asociados al uso de estructuras rígidas en un entorno naturalmente dinámico como es la costa del estuario. Ante este escenario, se propone una gestión costera que priorice soluciones que reduzcan el uso de estructuras rígidas de defensa costera y fomente la resiliencia del borde costero. Además, se recomienda implementar un sistema de monitoreo hidrosedimentario, realizar evaluaciones periódicas de las defensas existentes y establecer una normativa específica que regule rellenos y usos del suelo, como base para una gestión costera más sostenible y proactiva.

Palabras clave: estructuras de defensa costera - manejo costero - estuario del Río de la Plata.

ABSTRACT
The coastal sector of Avellaneda, Quilmes, and Berazategui, located on the southern margin of the Río de la Plata estuary, presents a high heterogeneity in the applied coastal stabilization structures, reflecting uncoordinated interventions. In the conducted study, areas with anthropo-genic refill were identified in the north of Avellaneda, sectors with deteriorated coastal defense structures in the south of Quilmes and stretches of natural coastline in the south of Avellaneda and in Berazategui. Significant deterioration was observed in several coastal defense structures throughout the study area. In particular, south of the Pejerrey Club in Quilmes, the coastal path, which functions as a vertical wall, shows fractures and undermining, for which rock mounds were placed in front to prevent its collapse. This case highlights the risks associated with the use of rigid structures in a naturally dynamic environment such as the estuarine coast. In this scenario, a coastal management approach is proposed that prioritizes the reduction in the use of rigid coastal defense structures and promotes the resilience of the coast. In addition, it is recommended to implement a hydro-sedimentary monitoring system, carry out periodic evaluations of existing de-fenses, and establish specific regulations to anthropogenic refill and land use, as a basis for more sustainable and proactive coastal management.

Keywords: coastal defense structures - coastal management - estuary of the Río de la Plata.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realizó un relevamiento de la ubicación y tipología de las estructuras de defensa costera en los partidos de Avellaneda, Quilmes y Berazategui, Provincia de Buenos Aires.

La zona de estudio se ubica en el margen sur del estuario del Río de la Plata, a unos 50 kilómetros del frente del delta del Paraná (Figura 1). Este delta, altamente constructivo, presenta un ritmo de avance del frente de 42,30 a 45,13 metros por año (Marcomini et al., 2018), con una descarga anual de aproximadamente 150 millones de toneladas de sedimentos (Soldano, 1947). Estos sedimentos están compuestos por limo, arcilla y arena.

El estuario del Río de la Plata se caracteriza por una notable variabilidad en sus niveles de agua. En el Puerto de Buenos Aires, los registros indican fluctuaciones que van desde ascensos de 4,40 metros a descensos de -1,97 metros durante eventos extraordinarios y entre 3,00 y -0,80 metros durante eventos ordinarios (Pereyra et al., 2001). Las condiciones hidrodinámicas están fuertemente

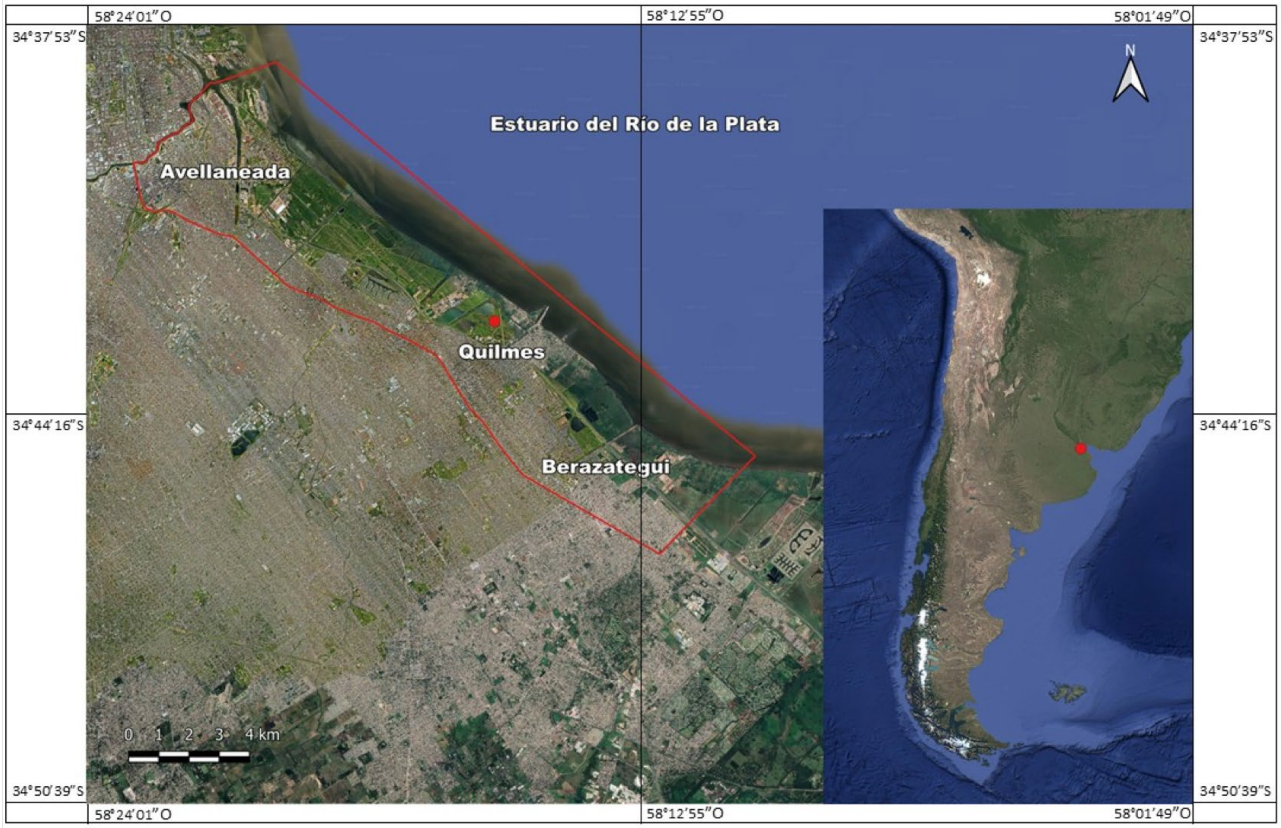


Fig. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

influenciadas por la acción de las mareas, los vientos y las tormentas (Marcomini y López, 2006).

La evolución geológica de esta área puede dividirse en tres grandes etapas que se dieron en el Holoceno superior: una transgresión marina, una posterior progradación costera y la configuración estuárica actual junto al desarrollo del delta del Paraná (Cavallotto, 2002; Cavallotto et al., 2005). Los depósitos presentes en la zona de estudio son resultado de estos procesos combinados con la dinámica reciente de arroyos tributarios y eventos extremos como las sudestadas.

Sobre esta base se superpone una intensa transformación del territorio impulsada por la acción antrópica. La zona de estudio presenta una notable heterogeneidad de usos del suelo, incluyendo industrias, plantas de tratamiento, actividades agrícolas, rellenos y disposición de residuos, canalizaciones, dragados y diversas obras de infraestructura costera. Estas intervenciones han modificado sustancialmente el paisaje original, alterando la dinámica sedimentaria y los procesos naturales del ambiente costero.

Aunque la transformación del paisaje ha sido evidente, los estudios académicos sobre este sector costero siguen siendo limitados. En las últimas décadas, diversos estudios han abordado la situación geoambiental del AMBA, como los trabajos de Pereyra y Rimoldi (2000) y Marcomini et al. (2011). No obstante, los análisis específicos sobre la costa sur del conurbano bonaerense continúan siendo escasos y fragmentarios.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es identificar, clasificar y cartografiar las estructuras de defensa costera presentes en Avellaneda, Quilmes y Berazategui. Se espera que los resultados aporten herramientas útiles para la gestión ambiental y la planificación territorial de esta área.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de identificar y cartografiar las estructuras de defensa costera presentes en el área de estudio, se realizaron tareas de campo y tareas de análisis espacial mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En una primera etapa, se relevó el área de estudio para registrar y caracterizar visualmente las distintas estructuras de defensa costera presentes. Se documentaron las estructuras mediante fotografías, notas descriptivas y ubicación con GPS. Se estudió en detalle la morfología, estado de conservación y relación con el entorno de la infraestructura costera.

En una segunda etapa, se analizaron imágenes satelitales de alta resolución de los años 2005 y 2025 disponibles en Google Earth Pro. A su vez, se utilizaron fotografías aéreas históricas de los años 1934 (escala 1:10.000), 1956 (escala 1:35.000) y 1991 (escala 1:35.000) para determinar cambios en la línea de costa y evaluar la evolución de las modificaciones antrópicas.

Finalmente, en una tercera etapa, se realizó la integración de la información mediante el software QGIS, donde se mapearon las estructuras de defensa costera observadas y se clasificaron según su tipología.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio realizado permitió identificar las distintas estructuras de defensa costeras presentes en el sector costero de Avellaneda, Quilmes y Berazategui, que reflejan la gran influencia antrópica en la dinámica costera. El mapa elaborado puede observarse en la figura 2.

En el mapa de la figura 2, se observa que en la costa de Avellaneda se encuentran presentes paredones verticales, espigones rectos y montículos rocosos, distribuidos de forma irregular a lo largo del frente costero. En el sector norte del partido, específicamente en el área correspondiente a Dock Sud y al norte del Arroyo Santo Domingo, se identificó un amplio sector de relleno antrópico, producto de un proceso progresivo de ganancia de tierras al estuario que se desarrolló entre mediados del siglo XX y principios del siglo XXI. Estos fueron realizados con escombros de demolición, sin selección granulométrica ni control de calidad, lo que incluye restos de hormigón, ladrillo, metales expuestos y suelos removilizados.

Este tipo de rellenos representa una alta peligrosidad, tanto desde el punto de vista ambiental como estructural. En contacto directo con el agua del estuario, estos materiales son retrabajados y generan sectores inestables con riesgo de colapso, erosión localizada, dificultades de acceso por la irregularidad del terreno y la presencia de materiales peligrosos. Para estabilizar estos sectores críticos, se establecieron distintos tipos de defensas. En Dock Sud se construyeron paredones verticales de hormigón y en las inmediaciones del Arroyo Santo Domingo se dispusieron montículos rocosos. En contraste, el sector de viñedos y el sur de Avellaneda, como se observa en el sector A de la figura 2, mantienen sectores de costa natural donde se desarrollan comunidades de juncos.

Al norte de Quilmes predominan los paredones verticales, mientras que hacia el centro se encuentran paredones escalonados. Al sur de estos se observa nuevamente un tramo de paredón vertical que corresponde al camino ribereño. En el mapa de la figura 2, en el sector B, se muestra una fotografía de dicho camino ribereño. En este se observaron fracturas, colapsos y socavamientos, por lo cual se incorporaron montículos rocosos por delante de la estructura para detener el deterioro de la misma. Por su parte, en el extremo sur del partido, se encuentra una zona con presencia de montículos rocosos (sector C) y áreas de costa natural donde se desarrollan las comunidades de junco y la selva ribereña (sector D).

A su vez, la costa de Berazategui muestra un desarrollo más acotado de defensas costeras, limitándose a un pequeño tramo junto a la Planta Depuradora Berazategui (sector E), donde se registran paredones verticales acompañados de montículos rocosos.

Por lo tanto, se observa una gran heterogeneidad en cuanto a las estrategias de estabilización costera aplicadas en los partidos de Avellaneda, Quilmes y Berazategui, reflejando diferentes niveles de intervención y niveles de planificación.

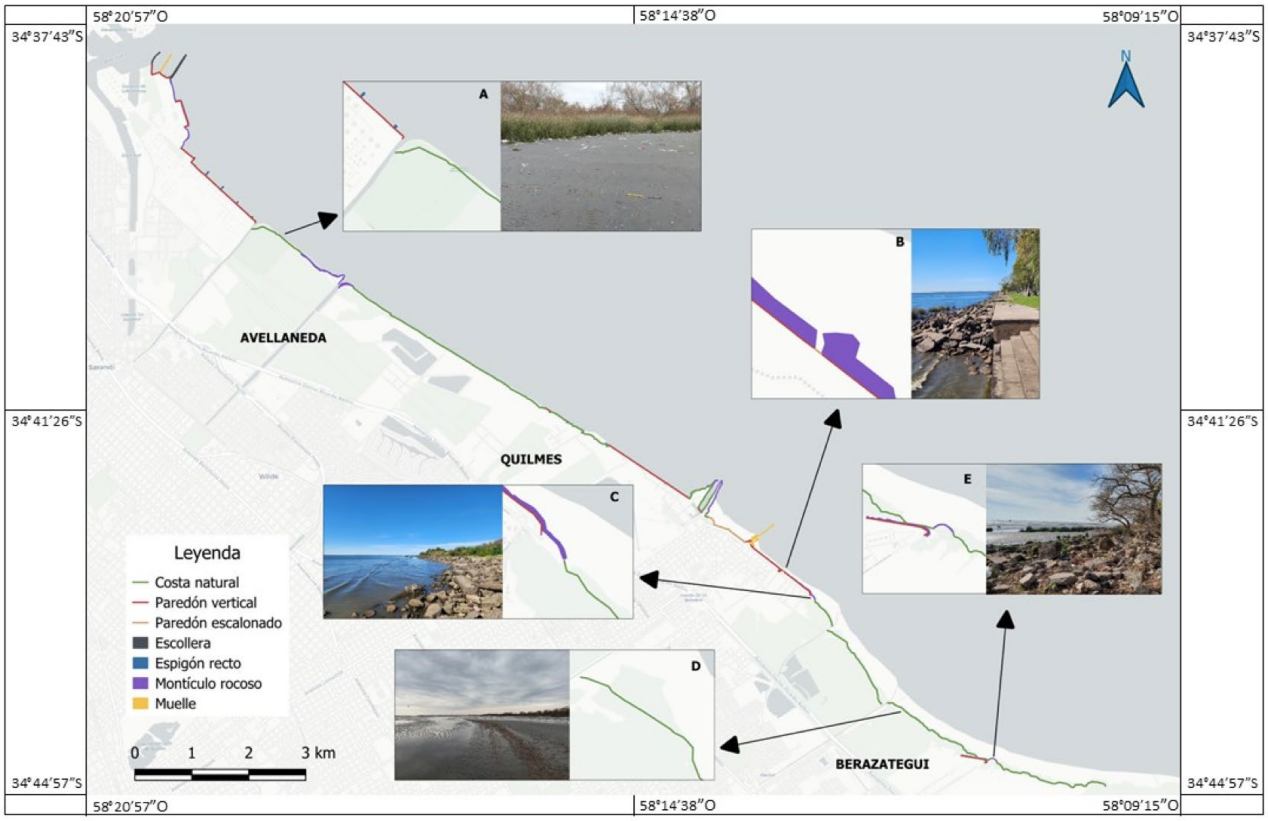


Fig. 2. Mapa de ubicación de estructuras de defensa costera entre Avellaneda, Quilmes y Berazategui, incluyendo ampliaciones de cinco sectores representativos: A) costa natural con juncos (zona de viñedos, Avellaneda), B) combinación de paredón escalonado, paredón vertical y montículos rocosos al pie del paredón vertical (Quilmes centro), C) montículos rocosos (sur de Quilmes), D) costa natural (Berazategui norte) y E) montículos rocosos (camping Recreo, Berazategui).

En cuanto a los riesgos asociados a estas estructuras de defensa costera, los paredones verticales, especialmente utilizados en Dock Sud y en varios sectores de Quilmes, generan una alta reflectividad del oleaje, lo que limita la formación de playas, interrumpe la conectividad entre el ambiente urbano y el estuario, y favorece procesos de socavamiento y colapso estructural, particularmente durante eventos extremos como las sudestadas. En cambio, los paredones escalonados, si bien también actúan como estructuras rígidas, permiten una disipación parcial del oleaje, reduciendo los procesos erosivos. Por su parte, los montículos rocosos permiten cierta amortiguación del oleaje y pueden favorecer la acumulación localizada de sedimentos. Sin embargo, cuando se componen de materiales no seleccionados o mal dispuestos, pueden volverse zonas inestables y peligrosas, dificultando el acceso y generando riesgos para la población. En contraste, los sectores de costa natural con presencia de juncos, como el área de viñedos y el sur de Avellaneda, el sur de Quilmes y Berazategui, actúan como ambientes amortiguadores naturales, capaces de adaptarse a las variaciones del nivel del estuario y contribuir a la disminución de la erosión mediante la disipación de la energía del oleaje y la retención de sedimentos. A su vez, estos ambientes también cumplen el rol de filtrado de contaminantes.

En el estudio realizado se observó un importante deterioro en las estructuras de defensa costera en distintos sectores de la zona de estudio. Particularmente, en el área al sur del Pejerrey Club en la localidad de Quilmes, sector B de la figura 2, se documentaron fracturas y socavamientos en los paredones verticales que forman parte del camino ribereño, por lo que se incorporaron montículos rocosos delante de este para evitar el colapso de la estructura. Esta situación evidencia que la fijación de la línea de costa mediante defensas rígidas interrumpe el transporte sedimentario natural y altera la dinámica del estuario. Durante eventos extremos, estas estructuras presentan alta reflectividad, lo que genera erosión localizada, socavamiento en la base y sobrelavado. El caso del camino ribereño de Quilmes, que comenzó a fracturarse a pesar de encontrarse en una zona sin erosión activa, pone de manifiesto la dinámica compleja de la costa estuarial en este sector, donde existe una tendencia general hacia la acreción. Sin embargo, esta tendencia se combina con variaciones entre momentos de retroceso y avance en el corto plazo, principalmente asociadas a eventos extremos y a la acción antrópica. Por su parte, en sectores acorazados, con presencia de paredones y/o montículos rocosos, la línea de costa tiende a mantenerse fija, lo que interrumpe el transporte sedimentario y modifica la evolución natural del perfil costero. Por lo tanto, el deterioro del camino ribereño de Quilmes evidencia los riesgos de aplicar infraestructuras rígidas en un sistema naturalmente dinámico y en constante evolución.

A partir de este estudio, se manifiesta la necesidad de realizar un plan de gestión costera que tenga en cuenta la característica dinámica de la costa del estuario del Río de la Plata. En este sentido, se propone preservar las costas naturales y fomentar soluciones como la plantación de juncos, reduciendo la necesidad de estructuras de defensa costera antrópicas. Además, en los sectores que presentan estructuras de defensa costeras deterioradas se recomienda reducir la reflectividad del oleaje y prevenir colapsos con la implementación de paredones inclinados, paredones escalonados o montículos rocosos frente a estas estructuras deterioradas. Por su parte, en los sectores que presentan estructuras de defensa costera sin deterioro, se sugiere incorporar montículos rocosos selectivos y vegetación halófila para introducir una amortiguación progresiva del oleaje y minimizar impactos estructurales. A su vez, se recomienda implementar una red de monitoreo hidrosedimentario con estaciones en puntos clave y realizar una evaluación periódica del estado de las defensas costeras existentes mediante inspecciones técnicas para contar con información confiable para la toma de decisiones y anticipar escenarios críticos ante eventos extremos o cambios en la dinámica costera. Finalmente, se sugiere diseñar un sistema normativo que limite rellenos antrópicos inestables, regule usos del suelo y fomente buenas prácticas costeras.

CONCLUSIONES

El estudio realizado permite determinar que la costa del sur del estuario del Río de la Plata se encuentra intensamente intervenida por el hombre. La coexistencia de estructuras de defensa costera rígidas, rellenos antrópicos y sectores naturales evidencia una gestión fragmentada, con consecuencias ambientales, estructurales y sociales.

Se concluye que las defensas rígidas, como paredones verticales, pueden ofrecer protección localizada, pero generan efectos adversos en un sistema naturalmente dinámico. Además, el uso de materiales inestables y no seleccionados en rellenos antrópicos representa un riesgo estructural y ambiental grave.

La falta de monitoreo sistemático y de criterios normativos claros dificulta la toma de decisiones sostenibles. Por lo tanto, es fundamental aplicar un modelo de gestión integrado que tenga en cuenta la dinámica del estuario para garantizar la estabilidad costera, la protección de los ecosistemas y la seguridad de las comunidades.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dejar expresado su agradecimiento a las instituciones que facilitaron el acceso a fotografías aéreas históricas relevantes para este estudio: la Base Aeronaval de Punta Indio, el Instituto Geográfico Nacional y la Cátedra de Geomorfología del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires.

REFERENCIAS

Cavallotto, J.L. (2002). Evolución Holocena de la Llanura costera del margen sur del Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (57), 376-388.

Cavallotto, J.L., Violante, R.A. y Colombo, F. (2005). Evolución y cambios ambientales de la llanura costera de la cabecera del Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (60), 353-367.

López, R.A. y Marcomini, S.C. (2013). Consecuencias de la configuración antrópica de la costa de la ciudad de Buenos Aires. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* (30), 101–111.

Marcomini, S.C. y López, R.A. (2006). La línea de costa del Río de La Plata. En F. Isla y C. Lasta (EUDEM), *Manual de manejo costero para la provincia de Buenos Aires* (pp 85-112).

Marcomini S.C. y López R. A. (2011). Problemática ambiental del estuario del Río de La Plata y Delta del Paraná En R. López y S. Marcomini (Croquis), *Problemática de los Ambientes Costeros, Sur de Brasil, Uruguay y Argentina* (pp 129-144).

Marcomini, S. C., Tripaldi, A., Leal, P., López, R. A., Alonso, M. S., Ciccioli, P., y Bunicontro, P. (2018). Morfodinámica y sedimentación de un sector del frente deltaico del Paraná (1933-2016), provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75(1), 1-16.

Pereyra, F.X., Marcomini, S.C., López, R.A., Merino, M. y Nabel, P. (2001). Caracterización del medio físico de la ciudad de Buenos Aires y área metropolitana. *Informe inédito. Convenio F.C.E y N., UBA- GCABA*.

Pereyra, F., y Rimoldi, H. (2000). Geosciences and Urban sprawl: AMBA city case, Argentina. *Special Symposia, invited contribution on XXX International Geological Congress (Río de Janeiro, Brasil).*

Pope, J. (1997). Responding to coastal erosion and flooding damage. Journal of Coastal Research 13(3), 704–710.

Soldano, F.A. (1947). *Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina* (Vol. 2). Editorial Cimera.

Wertheimer, M.C. (2018). Renovación urbana y conflictos territoriales en las costas metropolitanas del Río de la Plata: los casos de Quilmes, Avellaneda y Vicente López. *Estudios del Hábitat* (16).

GEOPARQUES

ÁREAS VERDES URBANAS COMO POTENCIALES SITIOS DE INTERÉS GEOLÓGICO, CÓRDOBA, ARGENTINA

Joaquín Cafieri[1], Rosana Varas[2], Gabriela A. Sacchi[3]
[1]Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica de la Rioja (CRILAR), Entre Ríos y Mendoza, La Rioja, Argentina.
[2]Servicio Geológico Minero Argentino, Delegación Córdoba, Celso Barrios 1712, Córdoba, Argentina.
[3]Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Ismael Bordabehere s/n, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: jcafieri@conicet.gov.ar

RESUMEN
Las áreas de reserva verde (RV) de la ciudad de Córdoba son espacios que tienen la función de preservar el equilibrio ambiental y contribuir a la conservación del patrimonio natural y cultural de la región. Son áreas destinadas a ser utilizadas como parques urbanos (Ordenanza Municipal N°12483). El objetivo principal del trabajo consistió en la recopilación de antecedentes geológicos de las RV, para evaluar el potencial interés geológico y valor de dichos sitios, y la posterior elaboración de fichas geológicas descriptivas. El área de estudio la constituyen: Reserva Verde del Este (RVE), Parque Sarmiento (PS), Parque de la Vida-Estación Flores (PV-EF) y Cárcano (C). Para su análisis, se consideraron trabajos generales y específicos de caracterización del medio físico en el marco de diversas disciplinas geocientíficas, así como trabajos vinculados a la protección y conservación del patrimonio natural. De acuerdo con los antecedentes bibliográficos y trabajos de campo, se pudo concluir que las RV analizadas en la ciudad de Córdoba, presentan un potencial interés geomorfológico, paleontológico y estratigráfico. En las cuales, se encuentran expuestas secuencias litológicas que permiten estudiar la evolución del paisaje donde se ha desarrollado la ciudad de Córdoba. A su vez, nos permite otorgarles un valor científico, turístico/recreativo, así como también educativo/didáctico, constituyendo zonas de fácil acceso para el público en general.

Palabras clave: patrimonio geológico, geodiversidad, geoconservación.

ABSTRACT
The green reserve areas (RV) of the city of Córdoba are spaces whose function is to preserve the environmental balance and contribute to the conservation of the natural and cultural heritage of the region. They are areas intended to be used as urban parks (Municipal Ordinance N°12483). The main objective of the work consisted in the collection of geological background of the VRs, to evaluate the potential geological interest and value of these sites, and the subsequent preparation of descriptive geological data sheets. The study area is constituted by: Reserva Verde del Este (RVE), Parque Sarmiento (PS), Parque de la Vida-Estación Flores (PV-EF) and Cárcano (C). For their analysis, general and specific works of characterization of the physical environment were considered within the framework of various geoscientific disciplines, as well as works related to the protection and conservation of the natural heritage. According to the bibliographic background and field work, it was concluded that the VR analyzed in the city of Córdoba have a potential geomorphological, paleontological and stratigraphic interest. In which, lithological sequences are exposed that allow us to study the evolution of the landscape where the city of Córdoba has developed. At the same time, it allows us to grant them a scientific, touristic/recreational, as well as educational/didactic value, constituting areas of easy access for the general public.

Keywords: geological heritage, geodiversity, geoconservation.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, las iniciativas que se han tomado, desde finales del siglo XX y principios del XXI, enfocadas en la identificación, valoración y conservación del patrimonio geológico y la creación de geoparques se han realizado con el principal objetivo de utilizarlas como herramientas de la protección y divulgación del conocimiento de las ciencias de la Tierra.

El patrimonio natural incluye elementos representativos de la diversidad biológica en el planeta, así como los aspectos geológicos y geomorfológicos. Todos los rasgos geológicos no resultan ser igualmente importantes, por lo que su valoración permite identificar aquellos que poseen una mayor relevancia y constituyen un patrimonio que debe ser conservado y aprovechado de manera sustentable. Este geopatrimonio se identifica a partir de lugares, puntos o sitios de interés geológico, conocidos como geositios (Prieto et al., 2016).

Los Sitios de Interés Geológico (SIG) son aquellos lugares y/o elementos geológicos que por sus características singulares o de representatividad en relación a una o varias disciplinas de la geología son empleados para conocer, estudiar y divulgar temas vincu-

lados al origen, evolución y composición de la Tierra. A su vez, permiten comprender los procesos que la han modelado, los climas y paisajes del pasado y el presente, así como el origen y evolución de la vida. El conjunto de estos sitios forma parte del geopatrimonio de la región (ASGMI, 2018; SEGEMAR, 2008).

En la Ciudad de Córdoba, Argentina, la Reserva Natural Urbana General San Martín es el único SIG, declarado como patrimonio ambiental de la ciudad de Córdoba el 30 de noviembre de 2009 (Digesto Municipal 2009, Gaido et al., 2010). Por otro lado, otros sitios poseen características singulares que permiten catalogarlos como posibles SIG. Por lo cual el objetivo del presente trabajo, es analizar y evaluar potenciales SIG que se encuentran en la ciudad de Córdoba, Argentina para que formen parte del patrimonio geológico urbano y provincial.

MATERIALES Y MÉTODOS

La selección, clasificación y determinación de las áreas verdes como potenciales SIG, se realizó siguiendo los criterios establecidos por el ASGMI (2018) y la categorización de áreas de reserva en la Ordenanza Municipal N°12.843 de usos de suelo. Para ello, se tuvieron en cuenta características geológicas singulares que presentan las áreas de reserva, facilidad de acceso a los sitios, posible potencial de interés y el valor potencial de los mismos. Para ello, se realizó la recopilación y análisis de antecedentes de las áreas de reserva, centrándose en temáticas vinculadas con la geología y la legislación actual.

Para la evaluación de las áreas de reserva como posibles sitios de interés, se tuvo en cuenta el modelo de la ficha descriptiva de SIG propuesto por el ASGMI (2018), con los criterios anteriormente mencionados. Los sitios fueron valorados en base a toda la información recolectada y a las observaciones generales realizadas en el campo. Para ello, se realizó la descripción primaria de cada sitio para identificarlos como SIG y analizar el valor geológico que posee cada área, determinando cuáles pueden ser clasificados como potenciales SIG y cuáles no.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis realizado se determinaron las siguientes áreas de reserva con un potencial interés (Figura 1)

Reserva Verde del Este (RVE): Ubicada en el sector noreste de la ciudad de Córdoba (31°24'16.20" S 64°8'5.84" O) (Fig. 1a). El área presenta zonas con explotaciones de áridos y arcillas en las cercanías del Río Suquía y el camino de Chacra de la Merced (Gaido et al., 2015). Está clasificada como área de reserva (Ordenanza Municipal N° 12.483). La RVE se encuentra localizada en el Paleoabánico aluvial del Río Suquía, Planicie Fluvioeólica Central, en la provincia geomorfológica de la Llanura Chacopampeana (Carignano et al., 2014). El sector está conformado por sedimentos de arenas gruesas con arcilla y limos subordinada, y gravas y cantos rodados (Quintana Salvat et al., 2002; Vettorelo et al., 2012). Se observó en los márgenes del Río Suquía la presencia de la Fm. Río Primero (Gaido et al., 2015).

Parque Sarmiento (PS): Ubicado en el sector central de la ciudad de Córdoba (31°25'46.31" S 64°10'36.00" O) (Fig. 1b). El área es de carácter público, exceptuando el sector del Parque de la biodiversidad, museos y predios municipales. Se clasifica como área verde (Digesto Municipal Municipalidad de Córdoba, 2016). Se encuentra localizada en un sector de la Planicie Fluvioeólica Central, en el extremo occidental de la Llanura Chacompampeana (Carignano et al., 2014). El sector del Parque Sarmiento se caracteriza por sedimentos de arenas gruesas y finas con horizontes de limos consolidados (Aiassa, 2008; Vettorelo, 2012), a su vez se encuentra en las cercanías del mismo la Fm. Río Primero (Quintana Salvat et al., 2002). En las inmediaciones del Parque Sarmiento, Montes (1958) reportó la presencia de fósiles de Gliptodonte Hoplophorus a dos metros de profundidad.

Parque de la Vida-Estación Flores (PV-EF): Ubicado en el sector suroeste de la ciudad de Córdoba (31°26'36.65" S 64°13'25.07" O) (Fig. 1c). La misma se encuentra en las cercanías del arroyo La Cañada. El Parque de la Vida está clasificado como área verde (Ordenanza Municipal N° 12.483), utilizado como parque urbano, se observó la presencia de materiales sedimentarios en las cercanías y presencia de alta urbanización en el sector de la Estación Flores. La misma estaría localizada en la zona pedemontana de las Sierras Chicas, en la Elevación Pampeana y forma parte de la Planicie Fluvioeólica central (Carignano et al., 2014). Según Crespo (2005), en las cercanías del arroyo La Cañada en barrio Suárez, se presenta una columna de sedimentos de origen eólico, conformado principalmente por loess. Quintana Salvat et al. (2002), describieron la presencia de depósitos fluvio-eólicos de bajo grado de compactación y materiales fluviales en el cauce del arroyo La Cañada y en las inmediaciones de la Estación Flores y barrio Parque Capital Sur.

Cárcano (C): Se encuentra ubicado en el sector noroeste de la ciudad de Córdoba, en las cercanías del Estadio Mario Alberto Kempes y Parque Kempes (31°22'21.42" S 64°15'3.75" O) (Fig. 1d). Ciertos sectores del Cárcano están clasificados como áreas de reserva y parque urbano (Digesto Municipal Municipalidad de Córdoba, 1999, 2016). La misma se encuentra ubicada en la zona pedemontana de las Sierras Chicas y en paleoabanicos del Río Suquía. Según Quintana Salvat et al. (2002), se encuentran en las inmediaciones del margen del Río Suquía, el complejo Feriar, Área Natural Chateau y Quebrada de las Rosas materiales fluvio-eólicos de bajo grado de consolidación con intercalaciones de sedimentos loéssicos.

Las áreas de estudio se caracterizan por presentar diferentes rasgos que les confieren un potencial valor e interés para clasificarlos como potenciales SIG, y otros que disminuyen su importancia. Parque Sarmiento y Cárcano pueden sugerirse como las áreas

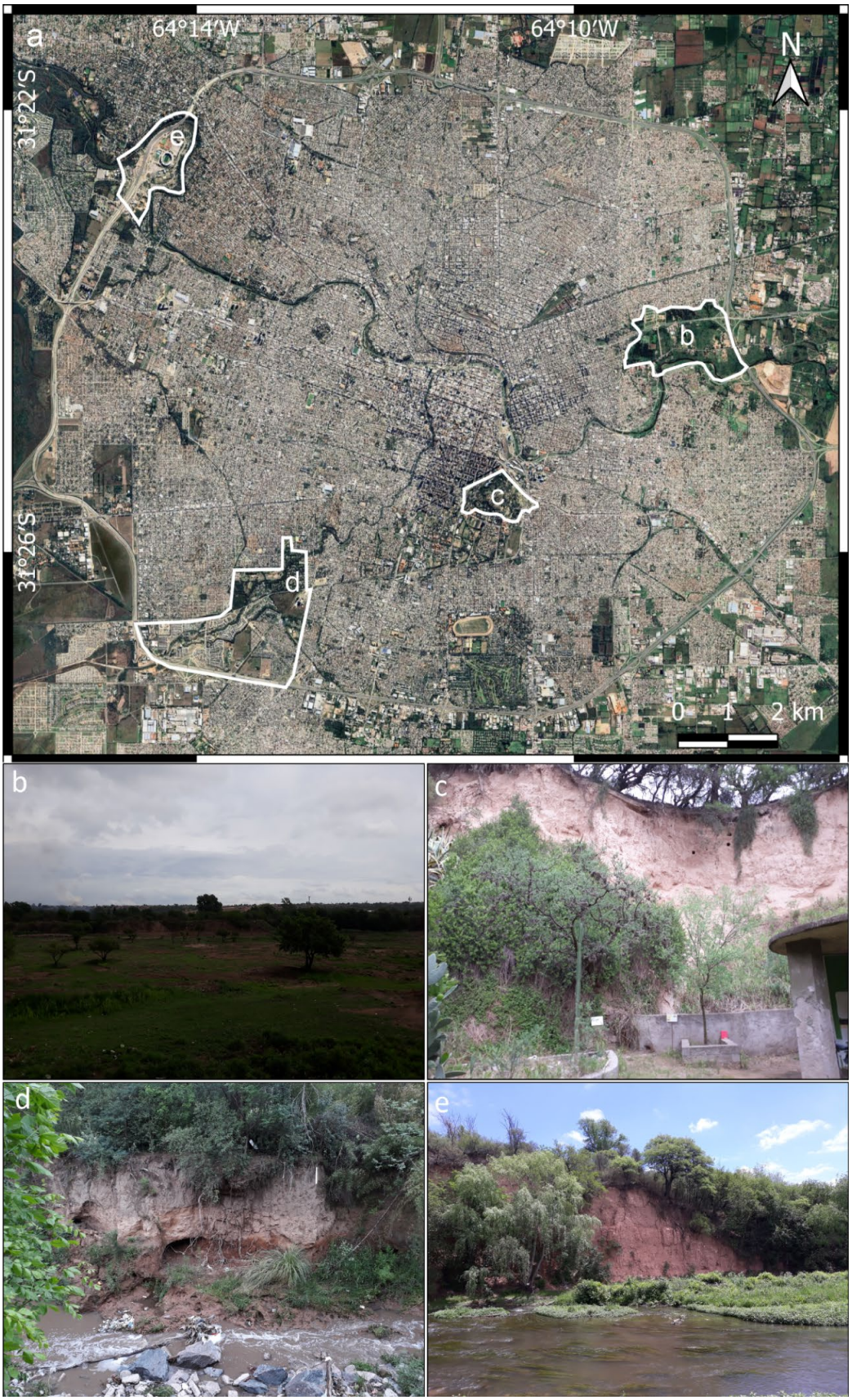


Fig. 1 a) Mapa de la ciudad de Córdoba indicando las áreas verdes como potenciales sitios de interés geológico (mapa modificado de Google Earth): b) Reserva Verde del Este se observa un nivel de terraza aluvial del Río Suquía. c) Columna sedimentaria en el Parque de la Biodiversidad en el Parque Sarmiento. d) Sedimentos fluvio-eólicos en las cercanías del Parque de la Vida-Estación Flores. e) Columna sedimentaria en las cercanías del Cárcano atravesado por el Río Suquía.

con mayor valor, debido a la facilidad de acceso a dichos lugares, columnas estratigráficas expuestas, sitios (museos, parques) que les confieren interés educativo/didáctico, turístico/recreativo. En cambio, la Reserva Verde del Este y el Parque de la Vida-Estación Flores se caracterizan por ser áreas de difícil acceso, sectores privados que restringen las zonas a las cuales ingresar, las columnas estratigráficas no están expuestas e inseguridad de dichos sectores.

CONCLUSIONES

La ciudad de Córdoba se caracteriza por poseer áreas verdes y de reserva que, en base a sus características geológicas, rasgos culturales, recreativos y educativos, pueden considerarse como posibles sitios de interés geológico. Siendo el Parque Sarmiento y el Cárcano los sitios que poseen mayor potencial para ser considerados como SIG, por su facilidad de acceso y valor.

Por el contrario, la Reserva Verde del Este y Parque de la Vida-Estación Flores, son los sectores que poseen menor posibilidad para ser clasificados como SIG, por aspectos como la inseguridad, la alta densidad de la urbanización y la dificultad para acceder a los sectores donde se encuentran las columnas sedimentarias expuestas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la geóloga Rosana Varas y la doctora Gabriela Sacchi por guiarme durante la realización del trabajo de investigación y al Centro Córdoba del SEGEMAR por permitirme usar su equipo e instalaciones para el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

ASGMI (2018). Bases para el desarrollo común del Patrimonio Geológico en los Servicios Geológicos de Iberoamérica. Asociación de Servicios de Geología y Minería de Iberoamérica – ASGMI. pp. 15. Salta, Argentina. https://asgmi.org/wp-content/uploads/2018/10/Bases-Metodologicas-Patrimonio-Geologico.pdf

Aiassa, G.M. (2008). Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados. Tésis doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. https://efn.biblio.unc.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8755&query_desc=kw%2Cwrdl%3A%20Aiassa%202008.

Carignano, C.A., Krohling, D., Degiovanni, S., Cioccale, M.A. (2014). Geomorfología. Relatorio XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, 1a Ed. Editores Roberto D. Martino y Alina B. Guereschi, Córdoba, Argentina. (pp. 747-821).

Crespo, E.Q. (2005). Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tésis doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. https://efn.biblio.unc.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9058&query_desc=kw%2Cwrdl%3A%20Relaci%C3%B3n%20entre%20las%20propiedades%20geot%C3%A9cnicas%20y%20los%20componentes%20puzol%C3%A1nicos%20de%20los%20sedimentos%20pampeanos.

Gaido, M.F., Sapp, M. (2015). Carta de minerales industriales, rocas y gemas 3163-III, Córdoba. Provincia de Córdoba. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Ar-gentino. Boletín N° 411, pp. 68. Buenos Aires.

Gaido, M.F., Sapp, M., Miró, R., Sacchi, G. (2010). Proyecto: Circuitos de interpretación geológica en áreas protegidas de la Municipalidad de Córdoba. Sitio de Interés Geológico Reserva Natural Urbana General San Martín. Servicio Geológico Minero Argentino–Municipalidad de Córdoba, pp. 1-14.

Digesto Municipal Municipalidad de Córdoba. (1999). Ordenanza Municipal Nº10.063 Reserva Ecológica del Suquía-Área de reserva verde recuperado el 29 de junio de 2025 de https://servicios2.cordoba.gov.ar/DigestoWeb/Page/Documento.aspx?Nro=6833.

Digesto Municipal Municipalidad de Córdoba. (2009). Ordenanza Municipal Nº11.702 Crea como Reserva Natural Urbana el Parque General San Martín recuperado el 29 de junio de 2025 de https://servicios2.cordoba.gov.ar/DigestoWeb/Page/Documento.aspx?Nro=14169.

Digesto Municipal Municipalidad de Córdoba. (2016). Ordenanza Municipal Nº12.483 Ocupación del suelo: Diversas formas recuperado el 29 de junio de 2025 de https://servicios2.cordoba.gov.ar/DigestoWeb/Page/Documento.aspx?Nro=54625.

Prieto, P.J.L., Cortez, S.J.L., Schilling M.E. (2016). Patrimonio geológico y su conservación en América Latina Situación y perspectivas nacionales. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Quintana Salvat, F., Barbeito, O.L., Menso, R.M.V. (2002). Carta de peligrosidad de inundación, erosión y anegamiento para las acciones de prevención, Ciudad de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Montes, A. (1958). Cambios climáticos durante el Holoceno de las Sierras de Córdoba. En: Anales de Arqueología y Etnología, años 1958-1959, 14-15, pp. 35-52.

Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) 2008. Sitios de Interés Geológico. Repositorio del Servicio Geológico Minero Argentino. https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1305

Vettorelo, P.V. (2012). Estudios Geotécnicos previos para el subterráneo de Córdoba. Tesis doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. https://efn.biblio.unc.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10687&query_desc=kw%2Cwrdl%3A%20Vettorelo%2C%20P.V.%202012.

GEOSITIO CERRO LOS GIGANTES (SIERRAS PAMPEANAS DE CÓRDOBA, ARGENTINA): PROPUESTA DE GEOITINERARIO PARA LA VALORIZACIÓN DEL PATRIMONIO GEOLÓGICO

Selene González[1], Jorge A. Sfragulla[2], Matías Forno[3], Gabriela A. Sacchi[3]
[1]Instituto Superior Arturo Umberto Illia, Olsacher 99, Villa Carlos Paz, Argentina.
[2]Departamento de Geología Básica, Facultad de Cs. Exactas, Fis. y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611 (Ciudad Universitaria), Córdoba, Argentina.
[3]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Cs. Exactas, Fis. y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611 (Ciudad Universitaria), Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: gonzalezsele@gmail.com

RESUMEN
El Cerro Los Gigantes (31°25'08.12" S, 64°48'22.32" O), constituye uno de los sectores más representativo del Batolito de Achala (Paleozoico Inferior-Medio) en las Sierras Pampeanas de Córdoba. Se encuentra a 2.380 m s.n.m, constituyendo el punto más alto del macizo de Los Gigantes, formando una gran muralla de rocas graníticas, con innumerables diaclasas, elevaciones y quebradas que le otorga un aspecto inconfundible y admirable, siendo un lugar visitado con frecuencia por escaladores y turistas de distintas edades. El geositio, integrado en la Reserva Hídrica Provincial Pampa de Achala (Decreto Provincial N° 361/99), presenta un elevado potencial para el geoturismo debido a la excelente exposición de sus rasgos geológicos y geomorfológicos. El área posee diversos senderos, que permiten visitar lugares donde las rocas y el relieve granítico se observan y se exponen con claridad, facilitando la comprensión de su origen y evolución.

Palabras clave: geositios, turismo, conservación.

ABSTRACT
The Cerro Los Gigantes (31°25'08.12" S, 64°48'22.32" W) is one of the most representative sectors of the Achala Batholith (Lower-Middle Paleozoic) within the Sierras Pampeanas of Córdoba. Located at 2,380 meters above sea level, it stands as the highest point of the Los Gigantes massif, forming a grand wall of granitic rocks. Its numerous joints, elevations, and gorges give it a distinctive and impressive appearance, making it a frequently visited site for climbers and tourists of all ages. This geosite, integrated into the Pampa de Achala Provincial Water Reserve (Provincial Decree N° 361/99), exhibits high potential for geotourism due to the excellent exposure of its geological and geomorphological features. The area offers diverse trails that lead to locations where the granitic rocks and relief are clearly observable and exposed, facilitating the understanding of their origin and evolution.

Keywords: geosites, tourism, conservation.

INTRODUCCIÓN

Los Gigantes, uno de los sectores más impactantes de las sierras de Córdoba, se encuentra en el extremo norte de la Sierra Grande. De gran belleza escénica, posee diversos senderos, poco o nada señalizados, que permiten visitar caminando, lugares donde las formaciones geológicas se observan y se exponen con claridad, facilitando la comprensión de su origen y evolución.

Alrededor del 75 % de las cuencas hídricas de la provincia de Córdoba tienen origen en la Sierra Grande y hacen su aporte a la mayoría de los embalses artificiales que proveen de agua y/o energía al 60 % de la población de la provincia. Tan importante es este ambiente serrano, que forma parte de la Reserva Hídrica Provincial Pampa de Achala, creada en el año 1999 con el objetivo de conservar los ecosistemas del cordón montañoso, de proteger las cabeceras de las cuencas hídricas, de mantener sus rasgos paisajísticos y de propiciar la perpetuación del escenario y la vida cultural de los lugareños, sus costumbres y tradiciones, entre otros.

El propósito de la selección del geositio es utilizar el atractivo paisajístico propio del área, para que los visitantes comprendan, valoren y se involucren en la conservación del entorno geológico que visitan, bajo la premisa de "conocer para conservar".

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del presente trabajo se sucedieron las siguientes etapas: búsqueda y recopilación de antecedentes bibliográfi-

cos y cartográficos del sector. La zona de interés se estudió a partir de imágenes satelitales (Google Earth). Las actividades de campo comprendieron el relevamiento, a lo largo del recorrido propuesto de aproximadamente 5 km, de los puntos de interés, describiendo elementos geológicos (rocas, suelos, formas del relieve) y la zona de divisoria de aguas que delimita las cuencas hidrográficas del geositio propuesto.

El área de estudio, "Los Gigantes", se ubica entre los departamentos Punilla, pedanía San Roque, y Cruz del Eje, pedanía Candelaria, en la provincia de Córdoba, Argentina. Desde la ciudad de Córdoba se recorren 85 km, siendo la vía principal de acceso la Ruta Nacional 20, utilizando la variante Costa Azul/RP 73 hasta la localidad de Bialet Masse. Desviar hacia el suroeste, por la RN 38 hasta la localidad de Villa Santa Cruz del Lago empalmando con la RP 28 hacia el paraje Los Gigantes. Desde la localidad de Tanti hacia Los Gigantes hay unos 30 km de ripio, generalmente en buen estado, que actualmente se encuentran en proceso de pavimentado.

Geomorfológicamente, el territorio de la provincia está integrado por dos regiones físicas contrastadas: llanuras al este y montañas al oeste. El área serrana constituye parte de la provincia geológica Sierras Pampeanas Orientales, más precisamente, su porción más oriental: Las Sierras de Córdoba. Estas constituyen un conjunto de cordones montañosos, que tienen una orientación N-S y que se extienden por aproximadamente 500 km con 150 km de ancho, desde los 29° hasta los 33° 30´ de latitud sur. En ellas se distinguen grandes unidades orográficas que, de este a oeste, se denominan: Sierra Norte-Sierra Chica-Sierra de las Peñas; Sierra Grande-Sierra de Comechingones; y finalmente la Sierra de Pocho-Guasapampa.



Fig. 1. Mapa de ubicación y acceso a Los Gigantes

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño y las características del recorrido propuesto se describen a continuación. El geoitinerario inicia en el refugio "Casas Nuevas", (coordenadas: 31°23'41.00"S, 64°46' 48.79"O; altura: 1.803 m s.n.m.) ya que desde allí comienza el Sendero Norte, senda clásica de ascenso de montañistas y escaladores que se dirigen hacia la cumbre del Cerro Los Gigantes (2.380 m s.n.m.). Durante todo el trayecto se pueden apreciar laderas rocosas pronunciadas con altos paredones, miradores naturales con profundas quebradas que condicionan la dirección de los arroyos y cursos de agua, formas de erosión y alteración de estas rocas (mogotes, cuevas, acanaladuras, taffoni), evidencias de deformación frágil (fallas, diaclasas), la relación directa entre la geología (permeabilidad secundaria del macizo rocoso fracturado) y la función hidrológica como cabecera de cuenca y zonas con suelos someros, que poseen una gran diversidad y endemismos de flora y fauna.

Punto de interés 1: Desde las profundidades

A unos 20 minutos de iniciada la caminata, se encuentra el primer punto de interés (coordenadas: 31°23'39.20"S, 64°47'23.10"O; altura 1.864 m s.n.m.) que constituye un excelente mirador natural desde donde se tiene una vista panorámica del macizo de Los Gigantes y las rocas que forman parte del Batolito de Achala.

Descripción: En las Sierras de Córdoba, en la era Paleozoica (Devónico Medio a Superior) se produce el emplazamiento de importantes cuerpos de rocas graníticas como el batolito de Achala y de otros cuerpos plutónicos de menores dimensiones. Según Lira y Sfragulla (2014), el Batolito de Achala tiene una forma elongada (groseramente elíptico) de rumbo NNE-SSO. Posee aproximadamente 105 km de largo en sentido norte-sur y 43 km de ancho en sentido este-oeste, con una superficie aflorante de 2.500 km². Las rocas dominantes son granitos (pudiendo distinguirse granitos porfíricos, granitos de grano fino y/o grueso, granodioritas, granitos de dos micas, tonalitas, entre otras). El complejo de plutones se originó entre los períodos Devónico – Carbonífero (alrededor de los 380-330 millones de años) y la profundidad mínima de emplazamiento se estima en unos 10 a 12 km de profundidad. Los granitos que se encuentran en este sector son monzogranitos (un subtipo de granito que contiene cantidades equivalentes de plagioclasa y feldespato potásico) equigranulares gruesos y porfíricos y el rango de edades de cristalización es entre 362 y 383 millones de años (Devónico Superior).

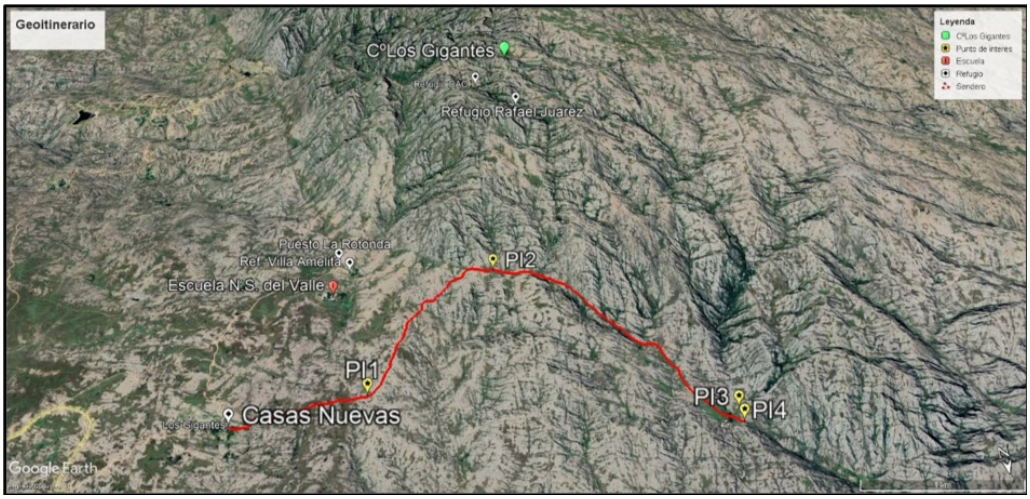


Fig. 2. Imagen satelital del geoitinerario propuesto con indicación de los puntos de interés (PI)

Punto de interés 2: Los pies sobre la tierra

El segundo punto de interés (coordenadas: 31°24'8.73"S, 64°48'2.59"O; altura 1.929 m s.n.m.) se ubica en el inicio de la senda conocida como "cuesta del perro".

Descripción: Los suelos en las áreas graníticas son someros, de texturas gruesas, arenosos, debido a la meteorización del granito, con buenos contenidos de materia orgánica, principalmente debido al clima frío, y alto porcentaje de roca aflorante. El suelo en este sector es muy frágil, es un área donde existe una gran pendiente, poca cobertura vegetal y, unos metros más arriba, hay una vertiente de agua que produce una pequeña zona húmeda (mallín) y una cascada. Con el paso del tiempo se ha generado un proceso erosivo en forma de cárcava (grandes zanjas producidas por la erosión del agua) y que, una vez iniciado, es difícil detener su avance. La alta dinámica del paisaje produce en general suelos jóvenes pertenecientes al orden taxonómico de los Entisoles (suelos inorgánicos, someros, de escaso desarrollo).

Punto de interés 3: Natural o artificial

El tercer punto de interés (coordenadas: 31°23'20.22"S, 64°48'52.91"O; altura 1.812 m s.n.m) se ubica en el sector conocido como "Los Mimbres"

Descripción: En todo el geoitinerario se observan taffonis (oquedades en una superficie vertical), pilancones (oquedades en una superficie horizontal), bloques grandes y redondeados, cuevas o aleros, acanaladuras, surcos, entre otras geoformas. También es posible observar, una roca ígnea de grano muy grueso, que recibe el nombre de pegmatita. Así mismo existen registros de los primeros habitantes de estas sierras: son muy comunes de encontrar morteros cavados en las rocas, algunos en cercanías de cursos de aguas y otros hallados en resguardo de aleros rocosos. Las distintas formas redondeadas del paisaje granítico se deben al comportamiento que tienen estas rocas frente a los procesos de meteorización y erosión. El requisito para que se formen estos paisajes es la existencia de un sistema de diaclasas (fracturas en las rocas que no han tenido desplazamiento) y que permiten el ingreso del agua, de los organismos y otros agentes activos de la meteorización física y química.

Punto de interés 4: Divisoria de agua

Situado en las inmediaciones del sector conocido como "Los Mimbres" se ubica el cuarto punto de interés (Coordenadas: 31°23'16.63"S, 64°48'52.52"O; altura 1.810 m s.n.m.).

Descripción: En este sitio, ubicado en las nacientes de los ríos Yuspe y San Guillermo, se da algo muy particular: en una superficie de 20 m^2 se puede estar parado y caminar sobre una divisoria de agua, que no es más que una línea imaginaria que separa el drenaje de dos corrientes de agua. Los cursos de agua que escurren hacia el oeste, lo hacen hacia la cuenca hidrográfica de Salinas Grandes, hacia la Depresión de las Salinas Grandes que es una depresión intermontana de relieve plano y pendiente suave, cubierta de vegetación halófita y, los cursos de agua que escurren hacia el este, lo hacen hacia la cuenca hidrográfica Laguna Mar Chiquita, hacia la Depresión de Mar Chiquita que es una extensa depresión de aprox. 1.850 km^2 a la altura de la cota 64 m s.n.m. y su eje este-oeste fluctúa alrededor de los 65 km y el norte-sur por los 30 km. La profundidad de esta laguna salada oscila entre los 2 y 3,5 m. La extensión y volumen de agua ha fluctuado con los cambios climáticos del Cuaternario.

CONCLUSIONES

El geositio cuenta con una diversidad geológica muy variada ofreciendo diferentes posibilidades para el desarrollo de actividades vinculadas con el geoturismo.

En cada una de las distintas etapas del geoitinerario propuesto, se pueden observar y describir claramente las características geológicas y geomorfológicas del extremo norte de la Sierra Grande. En algunos de los puntos de interés seleccionados, se expone notoriamente la relación entre zonas de recarga y zonas de descarga de agua subterráneas, al mostrar la divisoria de agua entre dos regiones naturales importantes y contrastantes de la provincia: la Reserva de Usos Múltiples Salinas Grandes (creada en el año 2003, al noroeste de la provincia) y el Parque Nacional Ansenuza (creado en el año 2022, al noreste de la provincia)

En la actualidad el área está teniendo un importante desarrollo turístico, debido a la pavimentación de un tramo de la Ruta Provincial 28 (Tanti - Cerro Blanco), a su cercanía con la ciudad de Córdoba (90 km) y el valle de Punilla y a las numerosas alternativas de "trekking" que, por senderos de diferentes grados de dificultad, permiten recorrer los alrededores. El macizo Los Gigantes se encuentra dentro de las zonas de riesgo en la provincia de Córdoba (establecidas por la Ley provincial 9856, Reglamentación 1525-12), siendo recomendable, antes de realizar la visita, consultar previamente a un guía especializado y a los guardaparques de la reserva para obtener información actualizada.

AGRADECIMIENTOS

Un sincero agradecimiento a los docentes de la Diplomatura Universitaria en Geoturismo de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y al profesor Geólogo Osvaldo "Coya" Barbeito, un apasionado en la enseñanza de las ciencias geológicas y una extraordinaria persona. Su legado perdurará en quienes tuvimos el privilegio de conocerlo y aprender de él.

REFERENCIAS

Administración de Parques Nacionales. Delegación Centro. *Mi casa es Achala. Manual docente* (2005). https://www.sib.gob.ar/portal/wp-content/uploads/2019/08/Mi-casa-es-Achala.-Manual-docente.pdf

Agencia Córdoba Ambiente. *Regiones naturales de la provincia de Córdoba.* (2003). https://www.igualdadycalidadcba.gov.ar/SIPEC-CBA/publicaciones/proyarboles/RegionesNaturalesdeCordoba.pdf

Bonalumi A., R. Martino, E. Baldo, J. Zarco. J. Sfragulla, C. Carignano, P. Kraemer, M. Escayola, A. Tauber, A. Cabanillas, E. Juri Y B. Torres (1999). Hoja Geológica 3166-IV, *Villa Dolores. Provincias de Córdoba, La Rioja y San Luis.* Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 250. Buenos Aires.

Gaido, M. F., J. J. Zarco, Miró, R. C., Sapp, M., Gamba, M. T. Y López, H. *Hoja geológica* 3166-30, Los Gigantes. Boletín 299. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires

Gutierrez Elorsa, M. (2011). *Geomorfología climática*. Ediciones Omega.

Lira, R. y Sfragulla, J. (2014) El magmatismo Devónico-Carbonífero: el batolito de Achala y plutones menores al norte del Cerro Champaqui. *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino - Córdoba. Asociación Geológica Argentina*. (pp 293 – 347).

VINCULACIÓN COMUNITARIA DEL PROYECTO GEOPARQUE CERRO VALDIVIA. APORTES PARA EL DESARROLLO DEL GEOTURISMO

Dinia Schmitter De Salvo[1], Maria R. Onorato[2], Laura I. León[1]
[1]Instituto de Geología Emiliano Aparicio (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Ignacio de la Roza 590 Oeste, Rivadavia, San Juan, Argentina.
[2]CONICET Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT San Juan, Av. Libertador Gral. San Martín 1109, San Juan, Argentina.
Mail de contacto: diniaschmitter@gmail.com

RESUMEN
El proyecto de extensión Geoparque Cerro Valdivia inició en el año 2017 impulsado desde el Instituto de Investigaciones Geológicas Dr. Emiliano P. Aparicio de la Universidad Nacional de San Juan. El Cerro Valdivia, se ubica 40 km al sur de la capital provincial conectado de forma directa por la Ruta Nacional N° 40. El proyecto inicial ha tenido como objetivo valorizar y fortalecer los lazos entre la comunidad y su patrimonio geológico, estableciendo estrategias participativas de conservación, educación y geoturismo a fin de lograr, un papel activo en el desarrollo económico sostenible de su territorio.
La necesidad de identificar los georrecursos y transmitir los conocimientos técnicos a la comunidad mediante acciones específicas conllevan a presentar los resultados obtenidos desde el año 2022 al presente.
Se parte de tres objetivos específicos: 1°) identificar y caracterizar los georrecursos del Cerro Valdivia (Fig. 1), 2°) capacitar a la comunidad en relación a los recursos geológicos disponibles, 3°) detectar las necesidades referentes a aspectos culturales de los habitantes. A partir de los cuales se diagramaron distintas actividades que permitieron realizar el relevamiento de la geodiversidad, considerando la valoración de la comunidad local, el interés científico y didáctico.
Se dictaron talleres en la Escuela Francisca de Páez y capacitaciones específicas a la comunidad con la finalidad de revalorizar y difundir el potencial natural y cultural del área, fortalecer la identidad y estimular la creación y crecimiento de emprendimientos locales innovadores que promovieran el desarrollo económico a través del geoturismo.
Las tareas realizadas arrojaron resultados positivos que favorecieron la participación en distintas actividades culturales, gastronómicas y científicas. Asimismo, surgen propuestas comunitarias de emprendimientos locales con rasgos identitarios a través de ofertas geoturísticas innovadoras que continúan promoviendo el desarrollo local sostenible.

Palabras clave: georrecursos, Geodiversidad, San Juan

ABSTRACT
The Cerro Valdivia extension project commenced in 2017, led by the Instituto de Investigaciones Geológicas Dr. Emiliano P. Aparicio de la Universidad Nacional de San Juan. Located 40 kilometres south of the provincial capital and directly accessible via National Route N° 40, the project aims to enhance and strengthen the relationship between the community and its geological heritage. By implementing participatory strategies for conservation, education, and geotourism, the initiative aims to promote an active role in the region's sustainable economic development. Since 2022, the project has focused on three specific objectives: 1) identify and characterize the georesources of Cerro Valdivia (Fig. 1), 2) educate the community about the available geological resources, and 3) understand the cultural needs of residents. Various activities were conducted to assess geodiver-sity, taking into account the local community's valuation, scientific interest, and educational significance. Workshops were held at the Francisca de Páez School, along with targeted training sessions to revalue and disseminate the area's natural and cultural potential, strengthen local identity, and encourage the creation of innovative local enterprises promoting economic development through geotourism. The activities conducted yielded positive results, enhancing community par-ticipation in cultural, gastronomic, and scientific events. Furthermore, local entrepreneurial proposals emerged, characterized by innovative geotourism offerings that continue to support sustainable local development.

Keywords: georesources, geodiversity, San Juan

INTRODUCCIÓN

El geoturismo es una de las ofertas turísticas en la que actualmente se está innovando a nivel nacional y provincial. Esta tipología es una forma de turismo de naturaleza, que se centra específicamente en la geología y el paisaje donde se promueve un turismo

hacia los Lugares de Interés Geológico y la geoconservación, potenciando el conocimiento de las Ciencias de la Tierra mediante su apreciación, disfrute y aprendizaje (Newsome y Dowling, 2010). Esto se consigue a través de visitas a los centros de observación de los rasgos geológicos, el uso de geo-rutas, itinerarios y visitas guiadas. En la provincia de San Juan aún es escasa la oferta de geo-turismo, por lo cual, con el proyecto Geoparque Cerro Valdivia se pretende contribuir con el desarrollo de una propuesta geoturística que permita valorizar y fortalecer los lazos entre la comunidad y el patrimonio geológico.

La zona de estudio está ubicada entre los departamentos Pocito y Sarmiento, al sur de la ciudad Capital de la provincia de San Juan. Geológicamente comprende parte de las unidades morfoestructurales de la Precordillera Oriental que involucra la Sierra Chica de Zonda y la unidad de Sierras Pampeanas Occidentales a la que pertenecen los cerros Valdivia y Barboza ubicado al noroeste (Fig. 1).

Los objetivos planteados buscaron tanto el relevamiento de los georrecursos como el trabajo con la comunidad. En primera instancia se buscó identificar y caracterizar los georrecursos del Cerro Valdivia que permitieran establecer un contexto geológico sencillo para la interpretación de todos los habitantes y visitantes por medio de estrategias de aprendizaje y comunicación. Posteriormente, la planificación de talleres buscó la sensibilización comunitaria. Se plantearon temas para talleres en la escuela, adaptado a los distintos niveles, y con la comunidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diagramaron distintas actividades, la metodología implementada para lograr el primer objetivo consistió en aplicar un análisis cualitativo de revisión de documentos científicos (tesis, mapas y cartas topográficas, geológicas. etc., publicaciones científicas y oferta turística de la zona de interés (a través de páginas webs y medios digitales), y valoración de la comunidad local. El análisis fue

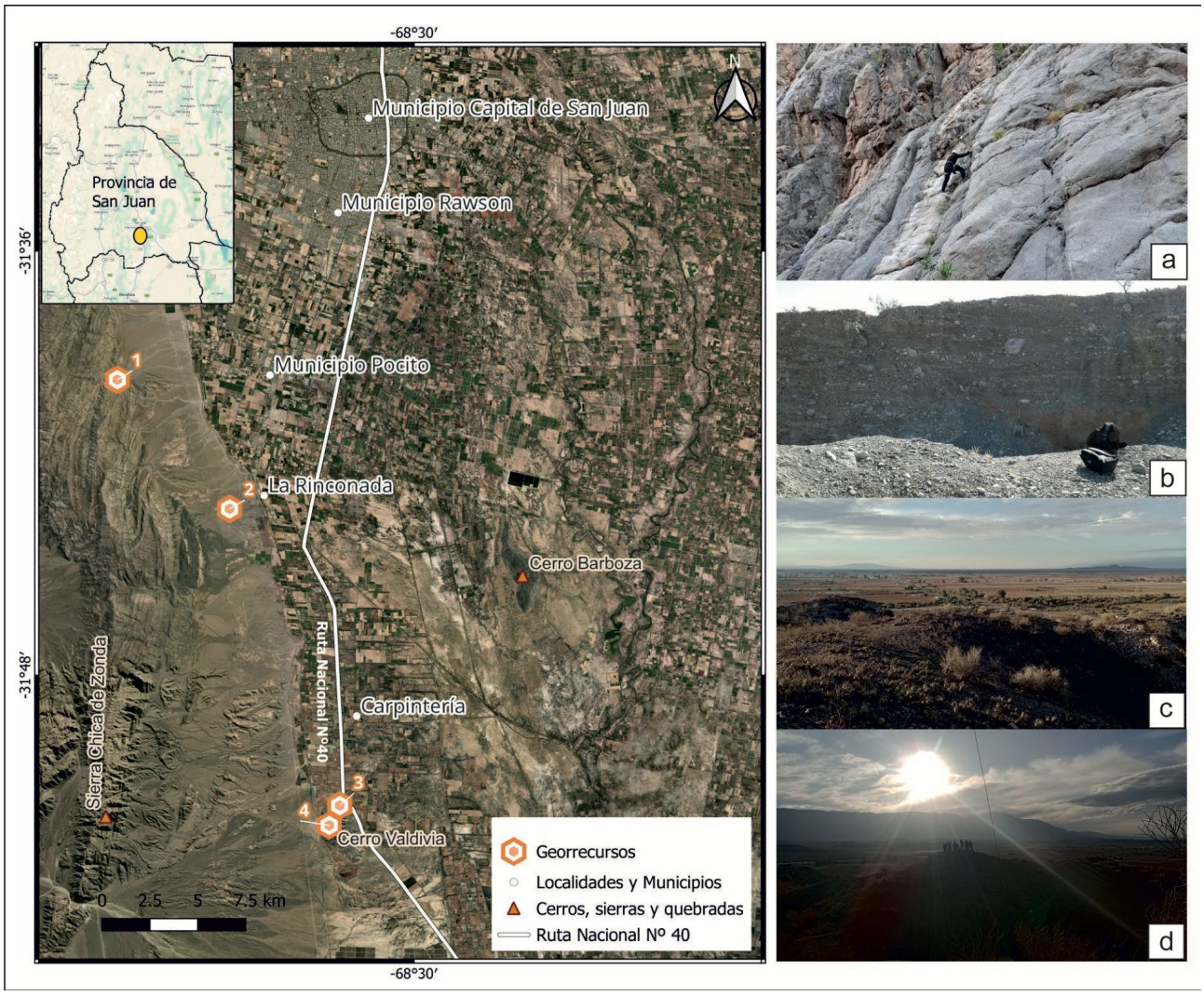


Figura 1: Mapa de ubicación de los Georrecursos (1) Quebrada de la calle 11, (2) Falla La Rinconada, (3) Afloramientos rocosos del Cerro Valdivia, (4) Mirador del Valle de Tulum. a) Escalada en roca, b) Trinchera natural de niveles afectados por la falla la Rinconada, c) y d) afloramientos del Co. Valdivia y vista del valle de Tulum.

exploratorio y de alcance descriptivo debido a que se identificaron y caracterizaron los georrecursos presentes en el área del Cerro Valdivia mediante un trabajo de campo y gabinete.

La caracterización de los recursos de la geodiversidad se realizó considerando su potencialidad geoturística, para lo cual se elaboró una ficha de recolección de datos y se implementó en las salidas de campo donde se observaron y fotografiaron los georrecursos. La elaboración de la ficha se realizó siguiendo modelos realizados por Carcavilla et al. (2007) y Schwarz (2019).

Las actividades coordinadas en conjunto con docentes del nivel primario y secundario de la Escuela Francisca de Páez implicaron talleres, salidas al terreno y visitas de los alumnos a la universidad. Los talleres propuestos buscaron generar conocimiento técnico de los recursos geológicos disponibles que pudieran ser aprovechados para impartir contenidos curriculares y que a su vez abordaran temáticas asociadas. Los talleres dictados se denominaron "Tectónica de Placas y Origen de los Sismos" y "Rocas y Minerales".

En relación a las actividades con la comunidad, se realizaron capacitaciones específicas con la finalidad de fortalecer los emprendimientos locales con productos turísticos sostenibles. Las temáticas abordadas surgieron a partir de diversos encuentros con un grupo comunitario en la Unión Vecinal donde los participantes señalaron carencias para el desarrollo de actividades relacionadas al geoturismo. Como resultado se diagramaron la diplomatura "Anfitrión en geoturismo" (dictado por docentes y alumnos de Universidad Nacional de San Juan), taller participativo "Raíces gastronómicas", "Curso de Manipulación de Alimentos" y "Taller de cocina regional" (dictado por docentes de la Facultad de Ciencias Químicas y Tecnológicas-Universidad Católica de Cuyo- en el marco del acta complementaria con Universidad Nacional de San Juan Res. N° 65/22 CD FCEFN).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la información disponible y los datos obtenidos con las fichas de relevamiento sirvieron para caracterizar los potenciales elementos de origen geológico y geomorfológico de los afloramientos del Cerro Valdivia. Los georrecursos fueron considerados de dos tipos: como enclaves o como vistas. Tomando en consideración a los enclaves como sitios geológicos y geomorfológicos con interés científico o didáctico mientras que las vistas refieren a elementos de gran escala y relevancia escénica, es decir, puntos panorámicos desde los cuales se observa el paisaje (Schwarz y Coronato, 2017). Este análisis permitió definir de modo preliminar 11 georrecursos. Se seleccionaron cuatro para trabajar en primera instancia, dos de acuerdo a las actividades coordinadas con las docentes de escuela y dos siguiendo los intereses manifestados por la comunidad.

Se escogieron tres enclaves: 1) Quebrada de la calle 11, 2) Falla La Rinconada, 3) Afloramientos rocosos del Cerro Valdivia y una vista: 4) Mirador del Valle de Tulum (Fig. 1). El enclave 1 y la vista tienen principalmente un uso turístico-recreativo, mientras que los enclaves 2 y 3 son fundamentalmente de relevancia geológica y/o geomorfológica.

Se dictaron 4 talleres en la escuela Francisca de Páez, dirigidos a estudiantes. El primer taller denominado "Rocas y Minerales" se consideró abarcando el enclave de los afloramientos rocosos del Cerro Valdivia, mientras que el taller "Tectónica de Placas y Origen de los Sismos" se focalizó en la Falla la Rinconada y su relación con los sismos históricos de 1944 y 1952 (Tello y Perucca, 1993).

La escuela Secundaria Francisca Ríos de Páez participó en 2023 tras la exposición de los proyectos en la Instancia Provincial de la Feria de Ciencias y Tecnología – Área de Actividades Científicas (CECYT), dependiente de la Subsecretaría de Planeamiento Educativo en la Instancia Nacional en Tecnópolis con el Proyecto "La Francisca, informa desde el cerrillo". El mismo, creó un sitio en internet que brindaba información sobre el geoparque, con el fin de atraer turismo, que obtuvo una mención especial. (https://www.canal13sanjuan.com/san-juan/conoce-cuales-son-los-proyectos-para-las-nacionales-de-ciencias-y-tecnologia_a66aaf8703ed2a6010d93a8cf) En el 2024 también participó en "Feria de Ciencias STEAM para la alfabetización escolar San Juan" con los Proyectos: "Promotor de Experiencias Turísticas"(https://www.youtube.com/watch?v=ry3TV9M6MGU) y "Turismo Religioso en El Cerrillo"(https://www.youtube.com/watch?v=extmty1uKfU), se seleccionó a ambos proyectos para la concursar en instancia provincial (https://sisanjuan.gob.ar/23-educacion/2024-08-12/57467-feria-de-ciencias-casi-50-seleccionados-en-las-dos-primeras-regionales) obteniendo mención especial en instancia provincial. Recientemente docentes y alumnos participaron en la 2° Feria de Ciencia y Tecnología Crear ConCiencia San Juan 2025.

Las cuatro capacitaciones realizadas "Anfitrión en geoturismo", taller participativo "Raíces gastronómicas", "Manipulación de Alimentos" y "Taller de Cocina regional" permitieron establecer la formalización y reconocimiento de los participantes mediante la obtención de las certificaciones.

El "Trekking Nocturno Cerro Valdivia" diseñado como prueba piloto fue coordinado íntegramente por alumnos diplomados con resultados óptimos. Esto permitió posteriormente diseñar una propuesta geoturística en conjunto con la Municipalidad de Pocito denominada "Trekking Cerro Valdivia". Otra actividad en la que participó activamente la comunidad fue durante el desarrollo del VII Taller de Campo en Tectónica organizado por la Comisión de Tectónica (COMTEC) de la Asociación Geológica Argentina (AGA) el 15 de junio de 2024, en la cual participaron siendo proveedores de viandas personales y cierre del evento con gastronomía regional y bailes típicos. A nivel provincial la Secretaría de Turismo y Cultura convocó a la comunidad bajo la figura de "informantes de sitio" (https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/tras-la-huella-de-los-terremotos-de-san-juan-1645740.html) a participar en el lanzamiento y actividades diagramadas en la "Ruta Turística Sísmica" donde se invita a explorar el Cerro Valdivia como espacio de interés geológico y sitio de memoria (https://www.instagram.com/sjturistico/reel/C9YXOD8hAFY/).

CONCLUSIONES

Los georrecursos más valorados en esta primera instancia en general son el mirador del Valle de Tulum y la Qda. de la Calle 11, esto en base a la información disponible como oferta turística a través del municipio y/o emprendedores privados. La valoración está dada por las actividades deportivas-recreativas como la escalada técnica en roca y trekking.

Es necesario continuar con el relevamiento y análisis de los recursos geológicos disponibles en el sector, considerando el acceso a los mismos como uno de los requisitos indispensables que permitan diagramar senderos geoturísticos.

Las actividades realizadas con la escuela han permitido despertar el interés por el patrimonio natural e incrementar en el alumnado el conocimiento de los georrecursos del cerro Valdivia dejando una impronta en proyectos educativos institucionales de gran relevancia.

El diálogo de saberes con la comunidad identificó el Cerro Valdivia como espacio geográfico estratégico para la comercialización de productos gastronómicos y artesanales en relación a visitantes temporales que transitan por la zona y permanentes que desarrollan actividades recreativas, deportivas o afines. Sin embargo, no fue hasta que el equipo del proyecto de extensión destacó su valor agregado como potencial georrecurso en relación al interés geológico/geomorfológico, que se generaron propuestas específicas de geoturismo como una alternativa de desarrollo local. Se considera al Cerro Valdivia con un alto potencial geoturístico, donde las acciones realizadas buscaron revertir entre otros objetivos este vínculo de la comunidad, promoviendo el trabajo colaborativo.

Se estima que las líneas de actuación propuestas desde el proyecto inicial de Geoparque y las acciones ejecutadas y en vías de desarrollo, fortalecen los lazos entre la comunidad y el patrimonio geológico, retroalimentando acciones y transformando ideas con eje en el geoturismo como oportunidades de desarrollo local comunitario. Sin embargo, es necesaria una planificación integral participativa que permita generar consenso para evitar tensiones y divisiones entre los miembros de la comunidad con objetivos compartidos y lineamientos preestablecidos. Los nuevos esquemas de actuación contemplarán mesas de diálogo participativas bajo el concepto de gobernanza donde se establezcan procesos, prácticas y reglas para la toma de decisiones con objetivos conjuntos claros.

AGRADECIMIENTOS

El financiamiento para esta investigación fue proporcionado por el “Proyecto de Extensión Geoparque Cerro Valdivia: Acciones estratégicas participativas para su desarrollo” (Res. 2022-32-APN–SECPU-ME). Los autores agradecen la colaboración de recursos materiales técnicos y humanos aportados en diversas instancias por la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNSJ), Escuela Francisca Ríos de Páez (primaria y secundaria), Unión Vecinal de Barrio Ruta 40, Facultad de Ciencias Químicas y Tecnológicas (UCCuyo), Ministerio de Desarrollo humano a cargo del Prof. Fabian Aballay (2022) y la Municipalidad de Pocito, que permitió la realización de capacitaciones, talleres y estudios de campo.

REFERENCIAS

Canal13sanjuan (2023). Recuperado el 24 de agosto de 2023 de https://www.canal13sanjuan.com/san-juan/conoce-cuales-son-los-proyectos-para-las-nacionales-de-ciencias-y-tecnologia_a66aaf8703ed2a6010d93a8cf

Carcavilla, L., López-Martínez, J. y Durán, J.J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Instituto Geológico y Minero de España, *Serie Cuadernos del Museo Geominero, nº 7*, Madrid, 360 p.

Diario de Cuyo (2024). Recuperado el 6 de agosto de 2024 de https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/tras-la-huella-de-los-terremotos-de-san-juan-1645740.html

Escuela Secundaria Francisca Ríos de Páez (2024). Recuperado el 31 de julio de 2024 de https://www.youtube.com/watch?-v=ry3TV9M6MGU

Escuela Secundaria Francisca Ríos de Páez (2024). Recuperado el 31 de julio de 2024 de https://www.youtube.com/watch?-v=extmty1uKfU

Newsome, D. y Dowling, R.K. (2010). *Geoturism: the tourism of Geology and landscape*. Goodfellow Publishers, Oxford.

San Juan Turístico (2024). Recuperado el 13 de julio de 2024 de https://www.instagram.com/sjturistico/reel/C9YXOD8hAFY/

Schwarz, S. (2019). *Geodiversidad en el centro y norte de Tierra del Fuego: recursos para un potencial desarrollo geoturístico.* Tesis doctoral de la Universidad Nacional de La Plata http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/tesis/te.1696/te.1696.pdf

Schwarz, S. y Coronato, A. (2017). Metodología de análisis de la geodiversidad en la cabecera del lago Fagnano, Tierra del Fuego: bases para su uso educativo-recreativo. *Actas del XX Congreso Geológico Argentino “Geología, Presente y Futuro”*, Tucumán, 61-63.

Si San Juan servicio informativo (2024). Recuperado el 31 de julio de 2024 de https://sisanjuan.gob.ar/23-educacion/2024-08-12/57467-feria-de-ciencias-casi-50-seleccionados-en-las-dos-primeras-regionales

Tello, G., y Perucca, L. (1993). El Sistema de Fallamiento de Precordillera oriental y su relación con los sismos históricos de 1944 y 1952, San Juan, Argentina. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 246-251.

INVENTARIO DE SITIOS DE INTERÉS GEOLÓGICO DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Rosana E. Varas
Servicio Geológico Minero Argentino, Celso Barrios 1712, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: rosana.varas@segemar.gov.ar

RESUMEN

Los sitios de interés geológico (SIG) forman parte del patrimonio geológico de un lugar. El interés creciente por la conservación del patrimonio geológico condujo a la creación de inventarios dinámicos y abiertos. Este trabajo muestra el avance del inventario de SIG en la provincia de Córdoba, desarrollado por el centro Córdoba del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) en el marco del Proyecto de Inventario de SIG de la República Argentina. El registro incluye fichas confeccionadas según la Asociación de Servicios Geológicos Minero Iberoamericanos (ASGMI 2018), recopilando 71 SIG basados en las publicaciones de las Hojas Geológicas del SEGEMAR, Leynaud (2002) y Varas (2025). Este inventario destaca la diversidad geológica de la provincia y su potencial para el desarrollo de actividades relacionadas con el geoturismo y la divulgación científica.

Palabras clave: sitios de interés geológico, patrimonio, inventario.

ABSTRACT

Geological Interest Sites (GIS) are part of the regional geological heritage. The growing interest in the conservation of geological heritage has led to the creation of dynamic and open inventories. This work presents the progress of the GIS inventory in the province of Córdoba, developed by the Córdoba Centre of Argentine Geological and Mining Survey (SEGEMAR) within the programme of the Geological Interest Sites Inventory Project of Argentina. The list includes compiled data according to ASGMI (2018), gathering 71 GIS based on the Geological Sheets of SEGEMAR, Leynaud (2002), and Varas (2018, 2025). This inventory highlights the geological diversity of the province and its potential for the development of activities related to geotourism and science communication.

Keywords: Geological Interest Sites, heritage, inventory.

INTRODUCCIÓN

El patrimonio geológico es un componente fundamental de la geodiversidad de un territorio, y su identificación y conservación resultan esenciales para el desarrollo de estrategias que integren el conocimiento científico con el uso responsable de los recursos naturales. En este marco, los SIG poseen un valor geológico significativo y su registro en inventarios, permiten sistematizar la información, ponerles valor y fomentar medidas de protección.

El Proyecto de Inventario de SIG tiene como objetivo describir y clasificar sitios geológicamente relevantes a nivel local, nacional e internacional. En este contexto, se presenta el avance del inventario en la provincia de Córdoba, una región con marcada diversidad geológica emplazada en dos provincias geológicas: en el sector occidental se presentan las Sierras Pampeanas Orientales, y en el área centro-este, la Llanura Chacopampeana.

El inventario elaborado incluye fichas que sistematizan la información clave de cada sitio tomando como base el primer registro realizado por Leynaud (2002), complementado con las Hojas Geológicas del SEGEMAR y un trabajo de recopilación reciente (Varas, 2025).

Los lineamientos metodológicos propuestos por la ASGMI (2018), basados en las experiencias del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2014) son la base para la elaboración de las fichas y permite una evaluación integral del patrimonio geológico, orientada a la geoconservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La elaboración del presente inventario se inició con la búsqueda de antecedentes y registros previos publicados en bibliotecas y repositorios digitales institucionales.

Leynaud (2002), confeccionó el primer inventario sistemático de puntos de interés geológico (PIG) en la provincia de Córdoba. Entre los 28 PIG descriptos se encuentran el Museo de Mineralogía, el Museo de Paleontología y el Museo de Ciencias Naturales, y lugares que forman parte de la historia de la actividad minera como el Horno La Nueva Argentina y la Labor Arce de Mina Las Tapias.

Complementariamente, se utilizó la cartografía geológica producida por el SEGEMAR, la cual incluye la identificación y descripción de SIG conforme a la normativa técnica vigente (SEGEMAR, 1999). En la Tabla 1 se mencionan las hojas geológicas que comprende el territorio de la provincia, que aportan las características geológicas de los sitios inventariados. Asimismo, se consideró un trabajo preliminar "Sitios de interés geológico de la provincia de Córdoba" (Varas, 2025) en el cual se presenta una compilación de cincuenta y cuatro (54) sitios georreferenciados, que se basa en información proveniente de las hojas geológicas mencionadas.

HOJA N°	NOMBRE	HOJA N°	NOMBRE	HOJA N°	NOMBRE
2966-IV	Recreo	3163-I	Jesús María	3366-IV	Villa Mercedes
2963-III	Ojo de Agua	3163-III	Córdoba	3363-1	Villa María
3166-II	Cruz del Eje	3361-II y 3361-IV	Sunchales-San Francisco	3363-II y 3363-IV	Bell Ville- Venado Tuerto
3166-IV	Villa Dolores	3366-II	Villa de Merlo	3363-3	Río Cuarto

Tabla 1. Hojas geológicas consultadas para la recopilación de SIG (SEGEMAR s.f.)

Para la sistematización de la información, se elaboró un registro de los sitios siguiendo la propuesta metodológica de la ASGMI (2018) que contempla el reconocimiento de los SIG por medio de la Identificación del sitio (ID), nombre y localización geográfica expresada en coordenadas geográficas. Desde el punto de vista técnico se lo describe geológicamente indicando el interés de la selección y la relevancia del lugar. El registro se acompaña con material fotográfico, referencias bibliográficas y datos sobre el estado de conservación y medidas de protección existentes. Las bases de datos oficiales sobre áreas naturales protegidas y regiones naturales disponibles en el portal de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR, s.f.) muestra las áreas reguladas y controladas para su conservación con las cuales se infiere el estado de cuidado del lugar.

Finalmente, se generó un mapa de localización de los SIG mediante un sistema de información geográfica (SIG), utilizando como base cartográfica la imagen satelital proveniente de Google Earth, lo que permitió georreferenciar con precisión los sitios incluidos en el inventario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La recopilación de los datos publicados en los antecedentes mencionados permite incorporar cuarenta y tres (43) nuevos sitios al registro original descripto por Leynaud (2002), alcanzando un total de setenta y uno (71) puntos georreferenciados con valor patrimonial (Tabla 2).

La distribución espacial de los SIG analizados (Fig. 1) revela una representatividad equilibrada entre dos ambientes geológicos contrastantes: Treinta y siete (37) sitios se localizan en áreas serranas y treinta y cuatro (34) en zonas de llanura, reflejando la diversidad geomorfológica de la provincia. Desde una perspectiva del ámbito geográfico, se identificaron tres (3) SIG ubicados en contextos urbanos: Reserva Natural Urbana General San Martín (ID: 44, Córdoba, departamento Capital), Falla de Sierra Chica (ID: 43, Villa Carlos Paz, departamento Punilla) y El Chorrito (ID: 63, Cruz Alta, departamento Marcos Juárez).

Asimismo, se presentan sitios de carácter mueble (ASGMI 2018), ubicados en museos y espacios institucionales, a saber: Horno La Nueva Argentina (ID: 39, Bialet Massé, departamento Punilla) y Museos de Ciencias Naturales, Mineralogía y Paleontología (ID: 45, 46 y 47, Córdoba, departamento Capital), mientras que los sesenta y siete (67) restantes conservan su localización original, es decir pertenecen a la categoría de patrimonio inmueble.

En cuanto al mapa de protección (IDECOR, s.f.), veinticinco (25) sitios se encuentran dentro de áreas naturales protegidas bajo la Ley Provincial N.º 6964/83. Esta coincidencia ofrece una base normativa favorable para la implementación de estrategias de geoconservación. No obstante, se observa la falta de estudios de evaluaciones cuantitativas sobre el estado de conservación de los SIG, lo que representa una limitación para la formulación de estrategias integrales de protección.

CONCLUSIONES

El inventario actualizado incluye setenta y un (71) puntos georreferenciados con descripciones sistemáticas. La cartografía que acompaña esta actualización muestra una distribución homogénea del patrimonio según los ambientes geomorfológicos de la provincia. Se incorporan clasificaciones de patrimonio mueble e inmueble generando una visión más amplia e integradora del alcance de los SIG que facilita la articulación de datos históricos, sociopolíticos y geológicos como por ejemplo el que ofrece el Horno La Argentina.

En resumen, el inventario de SIG contribuye a un registro actualizado con identificación del patrimonio geológico, que visibiliza el potencial como herramientas integradoras entre geociencias y divulgación, favoreciendo el diálogo intergeneracional y la apropiación social del conocimiento.

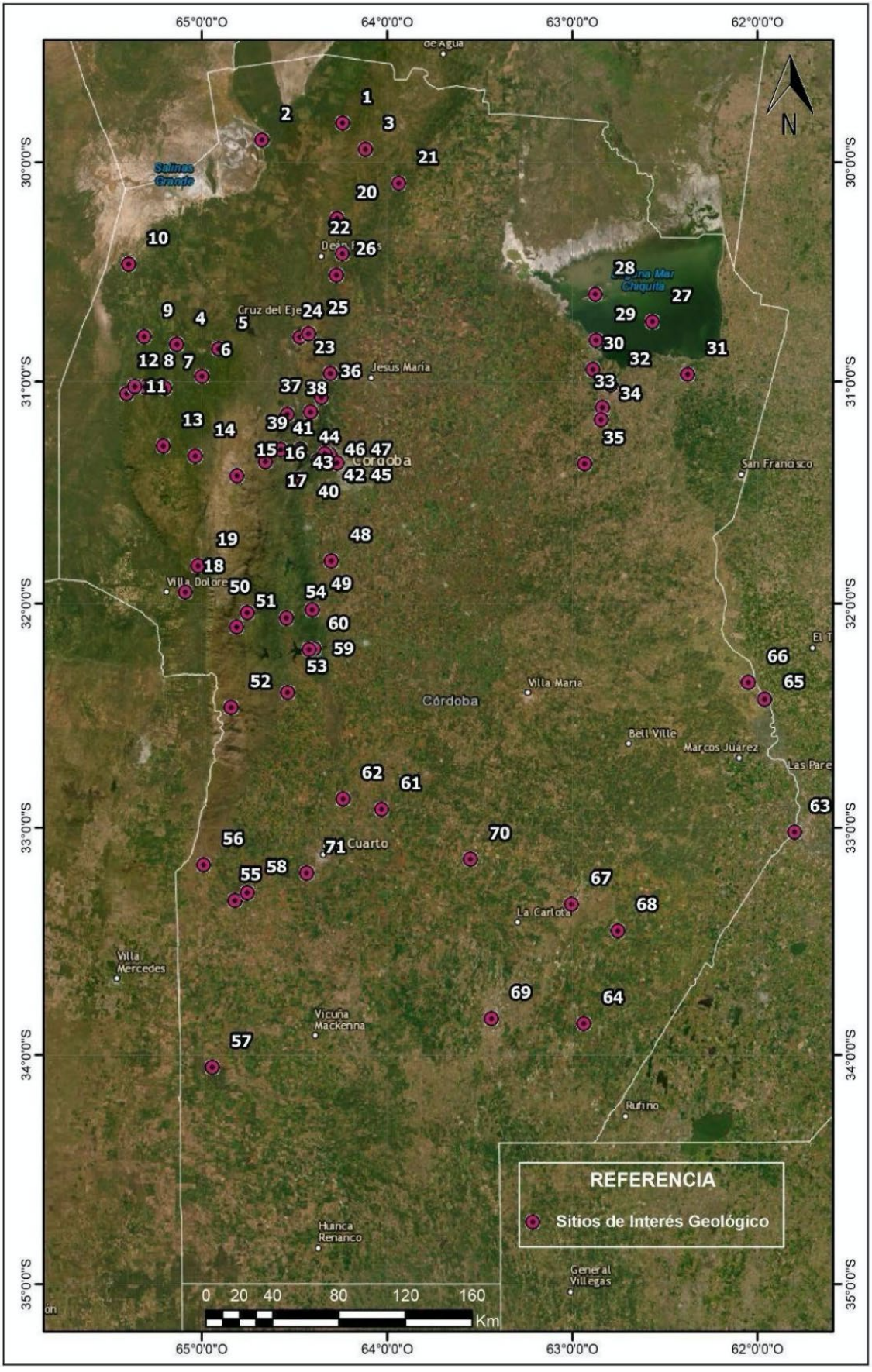


Fig. 1. Mapa de ubicación SIG en la provincia de Córdoba (Imagen de base tomada de Google Earth).

ID	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	I	IMPORTANCIA
01	Estancia Simbol Huasi	29°48'49.54"	64°14'0.72"	E	Localidad tipo.
02	Salinas Grandes	29° 53' 30.7"	64° 40' 17.6"	G	Bolsón tectónico salino.
03	Brechas de arenisca.	29°56'7.79"	64°6'48.02"	L	Brechas de talud. Cretácicas.
04	Pichanas	30°49'29,4"	65°07'55,8"	T	Registro deformación antigua
05	Soto- La Puerta	30°50'40.44"	64°54'12.05"	T	Cizalla Guamanes
06	Cerro Negro	30° 58' 09.8"	64° 59' 40.7"	L	Rocas con predominio de cordierita.
07	El Guaico	31° 1'23.21"	65°11'45.95"	M	Distrito minero y ruinas mineras.
08	Valle de Tasa Cuna	31° 1'3.45"	65°18'11.15"	P	Sedimentos pérmicos con flora fósil.
09	Charquina. La Playa	30° 47' 25.9"	65° 18' 27.2"	L	Pictografías en granodiorita.
10	El Quicho	30° 27' 35"	65°23'25.37"	H	Fuente mesotermal.
11	Granito Charquina	31° 02' 56"	65° 24' 3,7"	L	Roca comercial Gris Mara
12	La Playa	31° 01´ 0,4"	65° 21´29"	L	Litología fosilífera por vulcanismo
13	Volcanes de Pocho	31°08'	65°05'	G	Complejo Mioceno - Plioceno.
14	Cuchillaco Pocho	31° 19' 50.3"	65° 01' 52"	M	Mina aurífera. Resto de hornos.
15	Cerro Los Gigantes	31° 25' 15"	64° 48' 20"	G	Graníticos de un pilar tectónico.
16	Cerro Blanco	31° 21' 25"S	64° 39' 06"	MI	Pegmatita, variedad mineralógica.
17	Cueva de los Pajaritos	31° 18´7.4"	64° 34' 13.3"	G	Arroyo Mallín en parte subterráneo.
18	Las Tapias	31°56'38,6"	65°05'05,6"	M	Mina de espodumeno.
19	Terciario- Cuaternario	31°49´27,8"	65° 00´55,5"	T	Falla.
20	Valle de la Lidia	30°15'9"	64°15'50"	E	Depósitos neoproterozoico.
21	Cerro Colorado	30° 05' 30"	63° 56' 00"	E	Localidad tipo, Areniscas.
22	Ischilín-Sauce Punco	30°24'47.02"	64°14'9.18"	T	Cizalla.
23	Ascochinga- La Cumbre	30°57'29.64"	64°17'59.24"	E	Transecta: rocas cámbricas y cretácicas, cizalla Carapé.
24	Sierra de Pajarillo	30°47'34"	64°27'56"	E	Rocas sedimentarias cretácicas.
25	Ongamira	30° 46' 37.6"	64° 25' 03.8"	G	Rocas sedimentarias cretácicas.
26	Calcrete	30°30'34.10"	64°16'7.81"	E	Depósitos químicos de carbonatos.
27	Mar Chiquita	30°43'19.37"	62°33'44.87"	G	Laguna endorreica de agua salada.
28	El Mistolar	30°35'48.74"	62°52'17.25"	G	Isla, barrera.
29	Campo Mare	30°48'24.57"	62°51'57.23"	G	Dunas, noroeste, oeste y sudoeste.
30	Laguna del Plata	30°56'22.56"	62°53' 4.34"	G	Estratigrafía Pleistoceno-Holoceno.
31	Tostado-Selva	30°57'38.71"	62°22'19.82"	T	Elevación, evidencia indirecta escarpa.
32	Plujunta-Marull	31°0'29.45"	62°47'18.85"	E	Depósitos eólicos cuaternarios.
33	Puente Romagosa	31°6'40.00"	62°49'54.65"	E	Arenas finas, laminadas y limos arenosos en facies aluviales
34	Cascada río Plujunta	31°10'0.6"	62°50'17.9"	G	Erosión retrogradante.
35	Paleocauce río Xanaes	31°21'58.27"	62°55'40.47"	E	Depósitos faja fluvio aluvial río Xanaes.
36	Agua de Oro-La Falda.	31° 3'55.18"	64°20'59.24"	T	Cizalla Carapé.
37	Estancia La Sureña	31°07'52,38"	64°24'24,44"	E	Discordancia erosiva.
38	Cuevas de Indio Punilla	31° 08' 36"	64° 31' 59"	G	Paisaje kárstico.
39	La Nueva Argentina	31° 18' 00.7"	64° 27' 51.3"	M	Museo
40	Quebrada Río Suquía	31°21'4.29"	64°22'7.50"	T	Eventos Orogenia Pampeana.
41	Arroyo Saldán	31° 19' 17"	64° 18' 21"	E	Facies abanico aluvial. Cretácico
42	Mina Esperanza	31° 19' 12"	64° 19' 48"	MI	Cristales de dioptasa.
43	Falla Villa Carlos Paz	31°26'42.49"	64°29'59.72"	T	Falla Sierra Chica (Ciclo Ándico)
44	Reserva San Martín	31°21'45"	64°15'49"	E	Estratigrafía, Neógeno a Holoceno.
45	Museo Cs Nat B. Mitre	31° 25' 11"	64° 11' 6,3"	Mu	Museo
46	Museo Mineralogía	31° 25' 11"	64° 11' 6,3"	Mu	Museo
47	Museo Paleontología	31° 25' 11"	64° 11' 6,3"	Mu	Museo

48	Cretácico Despeñaderos	31°48'13"	64°17'50"	E	Secuencia sedimentario-volcánico.
49	Soconcho	32° 1'22.97"	64°23'54.29"	T	Cizalla oblicua a Sierra Chica.
50	Azul Tango	32° 02' 12"	64° 45' 00"	L	Anatexita tonalítica con cordierita y antofilita (kinzigita).
51	Tres Árboles	32° 5'56.30"	64°48'31.35"	T	Cizalla.
52	San Virgilio	32°27'31.81"	64°50'18.00"	M	Distrito minero Cerro Áspero.
53	Yacimiento Las Caleras	32° 23' 31.4"	64° 31' 54.5"	P	Fósiles. Paisaje kárstico.
54	Falla Calamuchita	32°3'33.168"	64°32'18.95"	T	Falla Sierra Chica (Ciclo Ándico)
55	Cerro Sampacho	33°18'57.94"	64°48'58.15"	T	Evidencias de actividad tectónica.
56	Achiras	33° 9'34.14"	64°59'9.29"	L	Estructuras y mixing magmáticos.
57	Valle río Quinto	34° 3'2.86"	64°56'22.10"	E	Afloramientos neógenos
58	Cerro Suco	33°17´	64°45´	E	Areniscas del Paleozoico.
59	El Hongo	32° 11' 48,4"	64° 23' 21"	L	Tonalita (Trondhjemita)
60	Sierra de Los Cóndores	32° 12' 01,2"	64°24'56,4"	E	Complejo Sedimentario-Volcánico
61	Médanos	32°54'48.62"	64° 1'27.34"	G	Activos
62	Campo de cráteres	32° 52'	64° 14'	G	Cráteres de impacto meteorítico.
63	El Chorrito, Cruz Alta	33°00'50,68"	61°47'43,10"	H	Aguas minerales surgentes.
64	Dunas parabólicas.	33°51'28.80"	62°55'55.60"	G	Estratificación de una megaduna.
65	Saira	32°25' 25"	61° 57' 27"	G	Erosión-acumulación actuales.
66	Canal San Antonio	32° 20'51"	62° 0' 43"	H	Erosión-acumulación actuales
67	Bañados del Saladillo	33°20'	63°	H	Zona de descarga, flujo subterráneo (ríos Tercero y Quinto).
68	Bañados del Tigre Muerto	33°27'	62° 45'	H	Zona de descarga.
69	La Chanchera-Santa Ana-La Brava	33°50'16.38"	63°25'55.53"	H	Complejo Lagunar en depresión tectónica.
70	La Felipa	33° 8'3.56"	63°32'42.79"	E	Sistema lagunar en cubetas eólicas.
71	Arroyo Las Lajas-Ruta 35	33°11'44.33"	64°25'49.00"	E	Secuencia cuaternaria característica de planicie pampeana, paleosuelo.

Tabla 2. Tabla resumida del inventario. Referencias: I: Interés. E: Estratigráfico. G: Geomorfológico. L: Litológico. T: Tectónico. M: Minero. P: Paleontológico. H: Hidrogeológico. MI: Mineralógico. M: Museo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la doctora Gabriela Sacchi por la lectura crítica del trabajo. A la geóloga Fernanda Gaido del Centro Córdoba por los aportes y colaboración para la realización del presente trabajo. A mi familia por el apoyo y acompañamiento constante en estos proyectos.

REFERENCIAS

Asociación de Servicios Geológicos Mineros Iberoamericanos, ASGMI. 2018. Bases para el desarrollo común del Patrimonio Geológico en los Servicios Geológicos de Iberoamérica. (Salta), (15 p.p.). Recuperado el 20 de junio de 2025 de https://asgmi.org/bases-metodologicas-para-el-desarrollo-del-patrimonio-geologico/

Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba, IDECOR. (s./f.). Mapa Áreas Naturales Protegidas y Regiones Naturales. Recuperado el 20 de junio de 2025 de https://www.idecor.gob.ar/mapas/areas-naturales-protegidas-y-regiones-naturales

Leynaud, F. (2002). Inventario y caracterización de los puntos de interés geológico (PIG) de la Provincia de Córdoba. En: N. Cabaleri, C. Cingolani, E. Linares, M. G. López de Luchi, H. A. Ostera, y H. O. Panarello (Eds.), *XV Congreso Geológico Argentino (El Calafate),* (7pp.)

Varas, R. (2025). Sitios de interés geológico de la provincia de Córdoba. En J. Selles Martinez y L. Castro (Eds), *4° Jornadas Argentinas de Geoturismo. (Ciudad Autónoma de Buenos Aires*), (p.p. 31-34).

Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, 1999. Programa Nacional de Cartas Geológicas y Temáticas de la República Argentina - Normativa para las Cartas Minero-Metalogenéticas de la República Argentina. 85 p. Buenos Aires. Recueprado el 20 de junio de 2025 de http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2885

GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA: RIESGO HÍDRICO, GESTIÓN DEL AGUA Y EL DESAFÍO DE LA GOBERNANZA ANTE UN CONTEXTO DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Nerea V. Bastianelli[1,2,3], Ana Casado[4], Natalia C. Lopez[5], Damián M. Costamagna[3], Lucia B. Carrica[1,2], René E. Albouy[1,2]

[1]Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina
[2]Centro de Geología Aplicada Agua y Medio Ambiente CGAMA CIC UNS, Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.
[3]Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires- ADA, calle 5 366, La Plata, Argentina.
[4]CONICET - CEDETS, Universidad Provincial del Sudoeste, Ciudad de Cali 320, Bahía Blanca, Argentina
[5]Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur - Instituto de Ingeniería (CIC-UNS), Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina
Mail de contacto: nereabastianelli@gmail.com

RESUMEN

La gobernanza del agua en Bahía Blanca tiene como desafío la gestión del riesgo hídrico, por exceso (inundaciones) o por déficit (sequías), en un contexto de marcada variabilidad climática. La fuente principal de abastecimiento de agua es el embalse Paso de las Piedras, mientras que las fuentes secundarias incluyen la explotación de agua subterránea en las cuencas del arroyo Napostá Chico y del Rio Sauce Grande; también se utiliza agua superficial que se extrae mediante una toma sobre el Rio Sauce Grande y dos en el arroyo Napostá Grande.

El objetivo de este trabajo es sistematizar y caracterizar la relación entre disponibilidad, usos y gestión del agua en la región de Bahía Blanca, mediante un análisis integrado y prospectivo, que permita abordar incertidumbres relacionadas con factibilidad de aprovechamiento e impacto de la buena gobernanza del agua depende de la inversión pública y la planificación territorial, componentes fundamentales de la soberanía hídrica. En la provincia de Buenos Aires, la Autoridad del Agua (ADA) creada y constituida a partir de lo establecido en la Ley N° 12.257, es la entidad autárquica de derecho público y naturaleza multidisciplinaria que tiene a su cargo la reglamentación, supervisión y vigilancia de todas las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua, así como la promoción de programas de educación formal e informal sobre el uso racional del agua.

Palabras clave: gobernanza, gestión, recurso hídrico, Bahía Blanca, variabilidad climática.

ABSTRACT

Water governance in Bahía Blanca faces the challenge of managing water risk, whether it responds to water excess (floods) or water deficit (droughts), in a context of marked climate variability. Currently, the main source of water supply is the Paso de las Piedras reservoir, while secondary sources include groundwater exploitation in the basins of the Napostá Chico and Sauce Grande streams; surface water is also used, extracted through one intake on the Sauce Grande stream and two on the Napostá Grande stream.

The objective of this work is to systematize and characterize the relationship between water availability, uses and management in the Bahía Blanca region, through an integrated and prospective analysis, to address uncertainties related to the feasibility of water use and the impact of climate variability.

Good water governance depends on public investment and territorial planning, fundamental components of water sovereignty. In the province of Buenos Aires, the Water Authority (ADA), created and constituted by Law No. 12.257, is the autonomous entity of public law and multidisciplinary nature in charge of the regulation, supervision and monitoring of all activities and works related to the study, collection, use, conservation and disposal of water, as well as the promotion of formal and informal education programs on the rational use of water.

Keywords: governance, management, water resources, Bahía Blanca, climate variability.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pone en tensión la mirada sobre el tema del agua en el área serrana e interserrana de la vertiente suroccidental de las Sierras Australes (Figura 1), hasta el estuario de Bahía Blanca; particularmente las cuencas de los arroyos Napostá Grande,

Napostá Chico y la del Río Sauce Grande. En la región, la principal fuente de abastecimiento a las localidades de Bahía Blanca, General D. Cerri y Punta Alta proviene desde el embalse Paso de las Piedras sobre el río Sauce Grande, generado por el dique Pablo Goldaracena y ubicado a unos 65 Km al noreste de la ciudad de Bahía Blanca.

El aprovisionamiento se suplementa con la explotación del agua subterránea en un área de llanura próxima al piedemonte de las Sierras Australes, en proximidades de la localidad de Cabildo y en el denominado Bajo San José (BSJ), actualmente con un total de 30 perforaciones operativas. Para completar y dar respuesta a la demanda de agua se suman tres tomas de agua superficial, una sobre el río Sauce Grande y dos sobre el arroyo Napostá Grande.

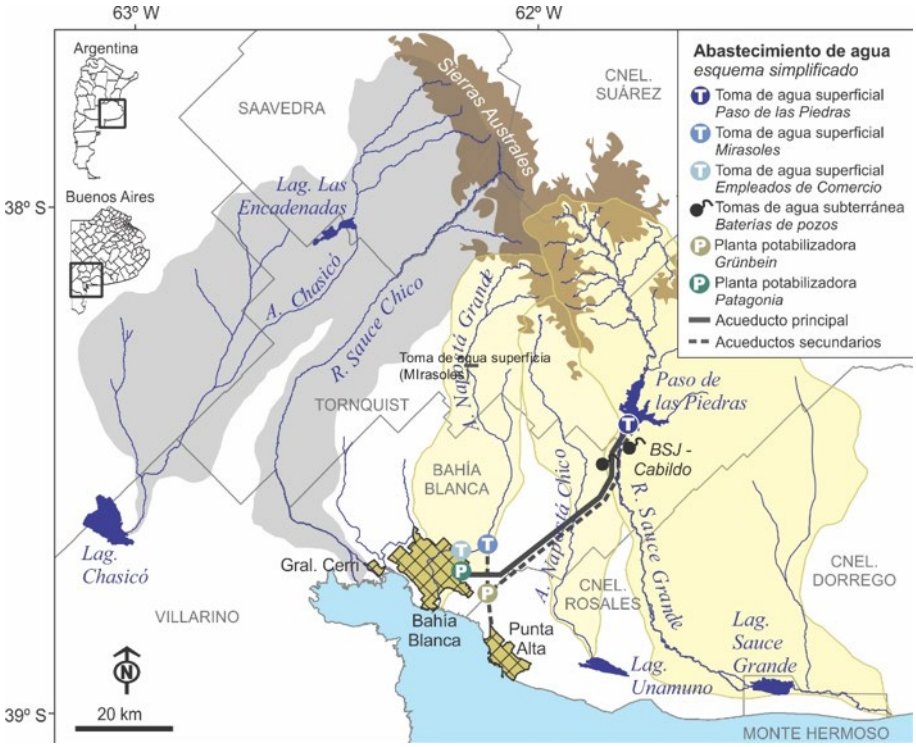


Fig. 1. Localización, situación y principales características del área de estudio.

Esta publicación reúne diferentes disciplinas y roles sociales de los autores, un grupo de investigación técnica y académica que reflexiona, participa, dialoga y se involucra en la toma de decisiones, desde el encuentro participativo en la "Mesa del Agua" convocada por el Municipio de Bahía Blanca. En este artículo no se presentan datos estadísticos, tablas, ni valores medidos con rigurosidad, ya que el objetivo principal es comentar sobre el escenario del agua en la región de Bahía Blanca y reflexionar sobre la condición actual de la gestión y la gobernanza. El trabajo se realiza con una mirada integrada y prospectiva sobre el recurso hídrico, con base en las normativas vigentes de la provincia de Buenos Aires (Código de Aguas - Ley N° 12.257) y experiencias locales de los autores.

El actual escenario hídrico nos conduce a valorar una evolución futura sobre la gobernanza del agua, equitativa, sostenible y eficaz en relación con el territorio y las situaciones sociales y ambientales regionales. Tal vez es momento de que los investigadores refuercen la revisión de temas básicos, repensando e incluyendo conceptos como la variabilidad climática en los estudios base, replanteando los términos de la ecuación de balance a la hora de cuantificar los recursos y reservas hídricas disponibles. Además, es necesario trabajar sobre la evaluación del riesgo hídrico, tanto por escasez como por exceso, bajo la misma premisa.

RIESGO HÍDRICO

El riesgo hídrico se refiere a la probabilidad de que la sociedad, el ambiente y las economías expuestas sufran consecuencias negativas debido a fenómenos extremos relacionados con el agua, como inundaciones (excesos hídricos) y sequías (escasez de agua) (GWP, 2012). La gestión del riesgo hídrico implica identificar las amenazas, evaluar la vulnerabilidad y desarrollar estrategias para reducir los impactos negativos de estos fenómenos (UN Water, 2012). El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, de aquí a 2030 (UN Water, 2023).

Por déficit: evolución de la cota del embalse Paso de las Piedras-

El embalse Paso de las Piedras (PdlP) constituye actualmente la fuente principal de abastecimiento de agua dulce regional. El mismo posee una superficie de 32 km², 28 m de profundidad y una capacidad máxima de 330 hm³ (308 hm³ de capacidad útil). PdlP embalsa la cuenca media-alta del río Sauce Grande desde 1978 para provisión de agua potable a los partidos de Bahía Blanca

y Coronel Rosales. La población abastecida alcanza unos 400.000 habitantes (Censo 2022) y se concentra mayoritariamente en las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta. El agua para uso industrial representa cerca de 20 % de la provisión total.

Si bien el embalse no fue diseñado para el control de crecidas, esta última constituye una importante función secundaria. La cuenca drenante a la represa posee una superficie de 1552 km^2, de los cuales 1.020 km^2 corresponden al río Sauce Grande, 405 km^2 corresponden al arroyo El Divisorio y 127 km^2 corresponden a pequeños cursos intermitentes que desaguan en el embalse en forma irregular. El módulo de entrada al embalse es de 4,5 m^3/s, de los cuales 3,4 m^3/s corresponden al río Sauce Grande. El mismo posee un régimen pluvial irregular, con mínimos registrados de 0,3 m^3/s y máximos instantáneos superiores a 1000 m^3/s.

La gestión del embalse es de tipo conservacionista; es decir, se embalsa y conserva el máximo volumen de agua para asegurar la provisión en periodos de sequía. Las erogaciones aguas abajo se producen únicamente por el aliviadero de crecidas (cota de 165 m s.n.m.). El caudal ecológico aguas abajo se mantiene por sistemas de drenes de presa que descargan en el cauce principal. Luego de 130 km de recorrido, el río Sauce Grande desemboca en el océano Atlántico a 17 km al este de la localidad de Monte Hermoso (partido homónimo). Di Maggio et al. (2016) describen el estado hipereutrófico del embalse. PdlP constituye un sistema de embalse interanual con alto rendimiento seguro y una capacidad tres veces superior a la demanda proyectada (94,6 hm^3). Sin embargo, la variabilidad de las precipitaciones regionales - traducida por una marcada variabilidad de los derrames de entrada- ocasiona fluctuaciones notables de los niveles de embalse. En efecto, se trata de un sistema particularmente vulnerable a la alternancia de periodos húmedos y secos, con baja capacidad de resiliencia en periodos de déficit extremo (Figura 2). Esta dependencia climatológica marca una de las debilidades más significativas a la hora de garantizar la continuidad y el mantenimiento de un servicio público, esencial para la vida y la salud de la población, así como también el desarrollo socioeconómico de la región.

En el año 2001 se crea el Comité de la Cuenca Hídrica Río Sauce Grande (Ley 12.257), bajo el Número de Resolución: 006/01, con el objetivo de delinear y consensuar sobre la gestión de la cuenca. El Comité está Integrado por los Municipios de Coronel Rosales, Bahía Blanca, Tornquist, Coronel Dorrego, Monte Hermoso, Cnel. Pringles y Coronel Suárez; actualmente presidido por el Intendente de Bahía Blanca, Federico Susbielles.

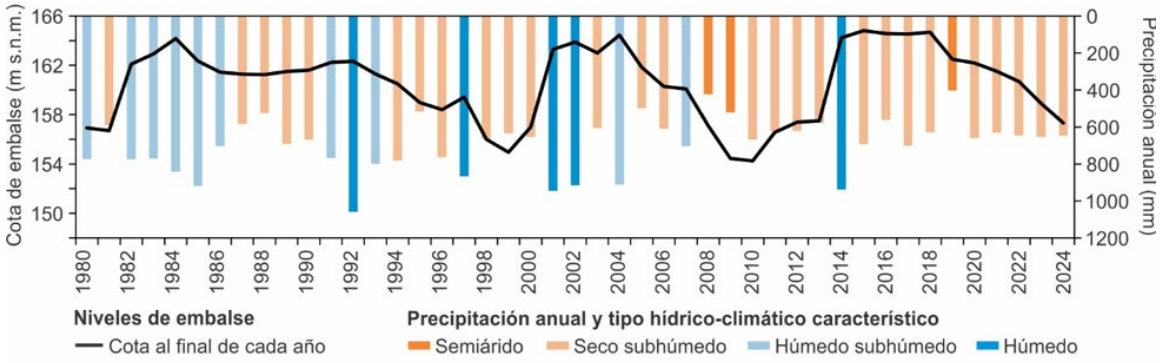


Fig. 2. Relación entre la precipitación anual y la variación en los niveles del embalse Paso de las Piedras. Período 1990-2024.

Por exceso: evento extraordinario del 07 de marzo de 2025

Las inundaciones son las catástrofes de origen natural que mayores daños causaron en la Argentina en las últimas décadas. Hacia el futuro, las proyecciones de los modelos climáticos indican que, en general, en toda la Argentina al norte de la Patagonia, las precipitaciones extremas acumuladas en uno o cinco días serán cada vez mayores y frecuentes (CIMA, 2015). Esto mismo se proyecta para las precipitaciones acumuladas mensuales en grandes zonas de la llanura de esta región. De acuerdo con estas proyecciones, se debería descartar la posibilidad de que las frecuentes inundaciones recientes disminuyan en lo que resta de este siglo, a menos que se adopten o completen las medidas estructurales y/o de manejo de las cuencas con ese propósito. (CIMA, 2015).

El pasado 7 de marzo, la ciudad de Bahía Blanca fue epicentro de un evento de precipitación extraordinario para la ciudad. Se registraron milimetrajes que variaron espacialmente entre 300 y 400 mm, en un tiempo que no superó las 8 horas. La intensidad del evento dio como resultado la inundación más grande en la historia de la ciudad, desde su fundación en 1828. Se registraron daños a la infraestructura y las propiedades, pérdidas económicas debido a interrupciones en la producción y el suministro de agua, roturas en el sistema de saneamiento, problemas de salud pública y pérdida de vidas humanas. Cabe destacar, sin embargo, que la región acredita eventos extremos de magnitud comparable. Entre ellos, se destacan la tormenta de octubre de 2003 que azotó la localidad de Sierra de la Ventana (300 mm en 6 horas) y el evento de precipitación acumulada que dio lugar al rebalse del vertedero de PdlP en noviembre de 2002, evento que ocasionó el anegamiento de unas 200 mil hectáreas, dejando aislada a la localidad de Monte Hermoso durante varios días consecutivos debido al anegamiento de las vías de circulación.

VARIABILIDAD CLIMÁTICA REGIONAL

El índice hídrico (Ih) que resulta de la relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), los excesos y los déficits hídricos

anuales (Thornthwaite, 1948) evidencia una marcada variabilidad hídrico-climática en términos tanto espaciales como temporales (Casado y Ferrelli, 2025). El Ih medio interanual para el periodo 1981-2020 separa (i) las cuencas altas de aporte bajo un tipo climático húmedo subhúmedo con pequeño déficit en verano y pequeño exceso, (ii) el embalse PdlP y las secciones medias de las cuencas regionales bajo tipo seco subhúmedo y (iii) el área de influencia de la localidad de Bahía Blanca, de tipo seco subhúmedo pero sin exceso y déficit moderado en verano y otoño. Paralelamente, la variabilidad del Ih anual evidencia un cambio positivo (incremento) de la ETP media anual desde 2000 y un cambio negativo (disminución) de la precipitación media anual desde 2004. Los excesos anuales se redujeron hasta 61 % (desde 2002) y los déficits anuales se incrementaron en hasta 87 % (a partir de 2004). Se evidencia asimismo una mayor recurrencia de años secos durante las últimas dos décadas, lo que sugiere que las normales del periodo 1981-2020 no son adecuadas para describir las condiciones medias actuales.

USO INTEGRADO DEL RECURSO HÍDRICO

Cuencas hídricas y acuíferos de la región: embalse, tomas de agua superficiales y captaciones de agua subterránea

Albouy et al. (2022) describen el recurso hídrico subterráneo de la región que suplementa el abastecimiento a las ciudades más importantes como Bahía Blanca y Punta Alta. El mismo constituye la única fuente para abastecimiento de núcleos urbanos del interior de la provincia de Buenos Aires y sustenta el desarrollo industrial, como el Polo Petroquímico de Bahía Blanca, y agropecuario de las amplias áreas rurales. En toda el área sujeta a estudio queda demostrada la disponibilidad de recursos subterráneos y, en este sentido, en todo el suroeste bonaerense se destaca el interés y relevancia que adquiere la explotación y utilización de este recurso para satisfacer la gama de necesidades de suministro. El conocimiento hidrogeológico de los acuíferos (freático, intermedio y Sistema Hidrotermal Profundo) y de la calidad natural del agua que alojan deben proyectarse en la planificación hídrica para establecer un equilibrio entre la demanda y el desarrollo socio económico regional.

El agua superficial tiene un rol preponderante y, en particular, emerge la cuenca del río Sauce Grande como fuente principal de abastecimiento a partir del embalse Paso de las Piedras. En un sector de esta cuenca, denominado Bajo San José, en la intersección del río con la ruta provincial Nº51, existe una toma de agua superficial y una batería de 15 captaciones de agua subterránea del acuífero freático. En la cuenca del arroyo Napostá Chico se utiliza el agua subterránea a partir de la explotación y operación de 15 pozos, mientras que en la cuenca del arroyo Napostá Grande se construyeron dos sectores de endicamiento rústicos para la instalación de tomas directas desde el cauce. Bajo este escenario, se demuestra la relevancia del uso integrado del agua superficial y subterránea para uso múltiple en la región de Bahía Blanca y su área de influencia, a partir del manejo del recurso de tres cuencas hídricas.

CONSIDERACIONES FINALES

La gobernanza del agua trata sobre la construcción de diálogo de distintos sectores a nivel nacional, regional y local, y plantea que el agua es la componente dinámica del eje de articulación social y territorial. En el contexto de la variabilidad climática característica de la región, el abastecimiento de agua a la región de Bahía Blanca se asegura a partir del manejo de las fuentes de forma integrada. En períodos climáticos secos donde el agua superficial disminuye sus caudales, el agua subterránea garantiza la cantidad necesaria para el normal funcionamiento. El entendimiento de la gestión y buen uso del recurso hídrico, garantizan la disponibilidad de agua en todo momento y para todo uso.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el marco correspondiente a los Proyectos de Investigación (PGI) otorgados por la Secretaría General de ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur al Dr. René Albouy (PGI 24/H165) y a la Mg. Natalia López (PGI 24/ZJ55). Se agradece a la Autoridad del Agua de la provincia de Buenos Aires, por la información (verbal y normativa) suministrada.

REFERENCIAS

Albouy, R; Bastianelli, N.; Ruffo, A.; Carrica, L.; Giorgi, J.M.; Rey, M. (2022). El recurso hídrico subterráneo y su explotación en la región de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, Argentina, Revista Argentina de Hidrogeología, 1:59-78

Casado, A. y Ferrelli, F. (2025). Déficit y exceso hídrico bajo un clima variable, Sudoeste Bonaerense (Argentina). *Revista Geográfica Venezolana,* 66(1), 12-30. https://doi.org/10.53766/RGV/

Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación 159 Capítulo 5. Adaptación).

CIMA. (2015). *Cambio climático en Argentina: tendencias y proyecciones*. 3ra Comunicación Nacional de la República Argentina a

la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Buenos Aires: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera.

Di Maggio, J., Fernández, C., Parodi, E.R., Diaz, M.S., Estrada, V., 2016. *Modeling phytoplankton community in reservoirs. A comparison between taxonomic and functional groups-based models.* J. Environ. Manag. 165, 31–52.

GWP. (2012). *Increasing Water Security — A Development Imperative* [Perspectives paper]. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers

UN Water. (2012). *Managing Water under Uncertainty and Risk* [Development Report 4, Vol. 1]. Paris, Francia: UNESCO. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215644

UN Water. (2023). *Partnerships and cooperation for water* [UN World Water Development Report]. Paris, Francia: UNESCO. Recuperado de https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA FAJA Y PALEOFAJA FLUVIAL DEL RÍO XANAES, ENTRE DESPEÑADEROS Y RÍO SEGUNDO, CON LA FINALIDAD DE SER EXPLOTADA PARA USOS EN ABASTECIMIENTO PÚBLICO Y OTROS USOS PRODUCTIVOS

Lara C. Cañas[1], María S. Robledo[1], David H. Palacio[1], Mario I. Aguirre Alanis[1]
[1]Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Av. Haya de la Torre s/n, X5000HUA, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: larahoran.lc@gmail.com

RESUMEN

Este estudio se centra en la caracterización hidrogeológica de un área específica de la provincia de Córdoba, Argentina, ubicada en el entorno del río Xanaes, principalmente al norte de éste, entre las localidades de Despeñaderos y Río Segundo. El objetivo principal es analizar la dinámica y características hidroquímicas del acuífero libre (faja y paleofaja fluvial), con el fin de evaluar su potencial para el abastecimiento de agua a un sector de la ciudad de Córdoba y otros usos sociales y productivos regionales.

La metodología empleada incluye mediciones de campo, como la conductividad eléctrica y niveles estáticos del acuífero libre, así como la interpretación de análisis fisicoquímicos de muestras actuales y antecedentes. Los datos obtenidos se presentan en forma de mapas temáticos que reflejan el comportamiento hidrogeológico de la zona de interés.

Los resultados indican que el río Xanaes ejerce una influencia significativa en el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del acuífero libre, sugiriendo la existencia de amplias zonas con salinidades relativamente bajas, que las hace aptas para una explotación racional y planificada. Se destaca la importancia de comprender la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas para lograr una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Se proponen estudios adicionales para cuantificar el potencial del sistema y definir parámetros hidrogeológicos que permitan establecer un modelo de explotación racional. Los hallazgos sugieren que la explotación del acuífero libre es factible como para abastecer de agua potable a parte de la ciudad de Córdoba, ofreciendo una alternativa a las fuentes superficiales, que están siendo afectadas por un creciente grado de eutrofización, y para otros usos sociales y productivos. Un sistema de explotación adecuado será crucial para garantizar la preservación del recurso hídrico en el futuro, subrayando la importancia de una gestión prudente de estos recursos.

Palabras clave: acuífero libre, explotación sostenible.

ABSTRACT

This study focuses on the hydrogeological characterization of a specific area in the province of Córdoba, Argentina, located in the vicinity of the Xanaes River, mainly to the north of it, between the towns of Despeñaderos and Río Segundo. The main objective is to analyze the dynamics and hydrochemical characteristics of the unconfined aquifer (river belt and paleo-belt) in order to evaluate its potential for supplying water to a sector of the city of Córdoba and other regional social and productive uses.

The methodology used includes field measurements, such as electrical conductivity and static levels of the unconfined aquifer, as well as the interpretation of physical-chemical analyses of current and historical samples. The data obtained are presented in the form of thematic maps that reflect the hydrogeological behavior of the area of interest.

The results indicate that the Xanaes River has a significant influence on the hydrodynamic and hydrochemical behavior of the unconfined aquifer, suggesting the existence of large areas with relatively low salinity, which makes them suitable for rational and planned exploitation. The importance of understanding the interaction between surface water and groundwater for sustainable water resource management is highlighted.

Additional studies are proposed to quantify the potential of the system and define hydrogeological parameters that will allow the establishment of a rational exploitation model. The findings suggest that the exploitation of the unconfined aquifer is feasible for supplying drinking water to part of the city of Córdoba, offering an alternative to surface sources, which are being affected by an increasing degree of eutrophication, and for other social and productive uses. An adequate exploitation system will be crucial to ensure the preservation of water resources in the future, underscoring the importance of prudent management of these resources.

Keywords: unconfined aquifer, sustainable exploitation.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende realizar la caracterización hidrogeológica de un área específica de la provincia de Córdoba, comprendida entre la Ruta Nacional 36 y la autopista Córdoba-Rosario, abarcando la faja y paleofaja fluvial río Xanaes o Segundo (Figura 1), desde la localidad de Despeñaderos, pasando por el paraje Cosme, hasta la localidad de Río Segundo. La zona de estudio contempla un paleocauce notoriamente identificable en imágenes satelitales, que se desprende desde el centro de la zona de estudio y se dirige con dirección noreste hasta interceptar la faja fluvial del río Suquía, al este de la localidad de Río Primero (Aguirre, 2019). En este estudio se procura obtener un mayor conocimiento de las condiciones hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema acuífero, a partir recopilación de datos bibliográficos, muestreos en censos de pozos, y resultados de análisis físicos - químicos. A partir de toda la información, se generan mapas de curvas equipotenciales (Isofreáticas), conductividad eléctrica (Isoconductividad), e interpretaciones mediante herramientas hidroquímicas tradicionales que permiten un análisis regional y en detalle del sistema.



Fig. 1. Ubicación de área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo contempla una recopilación inicial y análisis de bibliografía, búsqueda y clasificación de antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos. Entre los trabajos utilizados se destacan: "Aguas Subterráneas de la Provincia de Córdoba" de Blarasin et al. (2014); "Geología de Superficie" de Carignano et al. (2014), entre otros. Además, se recabaron datos de fuentes oficiales como: Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba, Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI), Instituto Geográfico Nacional (IGN), Convenio Argentino-Alemán de Aguas Subterráneas (CAAAS, 1973), y FONCYT-PID 2008-00035: "Dinámica, Calidad y Reservas de Agua Subterránea de la Provincia de Córdoba; potencialidad para usos productivos y sociales".

El trabajo de campo se basa en un censo de pozos ejecutado mediante siete salidas de campo, que totalizaron 88 determinaciones en pozos, perforaciones y tomas de datos de agua superficial. En cada uno de los puntos de muestreo se tomaron niveles estáticos (en el caso de pozos o perforaciones) datos hidroquímicos in situ (conductividad, temperatura, ph), en algunos puntos se tomaron muestras para análisis físico químicos, y se recabaron datos de interés sobre uso del agua, caudales de extracción, régimen de bombeo, y demás aspectos de interés.

Posteriormente, en gabinete, se sistematizó la información recopilada y generada; a partir de la cual, se elaboró una planilla general con la totalidad de los datos y se generaron con el software libre QGis 3.22 mapas: Isofreático, de Isoconductividad Eléctrica y diagramas de Stiff.

Mediante el Software libre Easy_Quim, se interpretaron los resultados de los análisis fisicoquímicos y los antecedentes obtenidos de la Administración Provincial de Recursos Hídricos, que fueron representados en un mapa con los diagramas de Stiff y de Piper.

Este trabajo se ha desarrollado como parte de un proyecto de investigación propia de la cátedra de Hidrogeología de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba, en el contexto de una tesis de maestría y dos trabajos finales de grado. La financiación ha sido enteramente con fondos propios y la colaboración de la Secretaría de Minería de la provincia de Córdoba y la Administración Provincial de Recursos Hídricos, que absorbieron parte de los costos de las salidas de campo y análisis de laboratorio, en el marco de las tesis mencionadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como puede observarse del mapa hidrodinámico de la Figura 2, la zona de estudio tiene un comportamiento variable en cuanto a la relación agua superficial-subterránea definida por una estrecha relación con las condiciones geomorfológicas y estructurales. Haciendo un análisis hidrodinámico desde el oeste al este se tiene que en sector occidental, en el ámbito de la Elevación Pampeana, precisamente donde el río Xanaes cruza la expresión morfológica de la estructura que eleva el bloque de la plataforma basculada, inmediatamente al oeste de la localidad de Despeñaderos, el río es efluente en ambos márgenes con un gradiente hidráulico elevado. Desde la localidad de Despeñaderos hacia el este, el río toma dirección noreste, y tiene un comportamiento mixto, siendo efluente al norte e influente al sur. Aproximadamente en el centro oeste de la zona de estudio, el río toma una dirección oeste - este, y la relación de agua superficial subterránea cambia a influente en ambas márgenes a levemente indiferente. Posteriormente el río vuelve a tomar una dirección noreste y vuelve a tener un comportamiento mixto, mayormente efluente al norte e influente al sur. Finalmente en el sector oriental del área de estudio, el río toma otra vez dirección oeste - este, y se torna influente hacia el margen norte y efluente hacia el margen sur. El gradiente hidráulico es notoriamente menor hacia el este en la dirección de escurrimiento, lo que es consecuente con la disminución del gradiente topográfico.

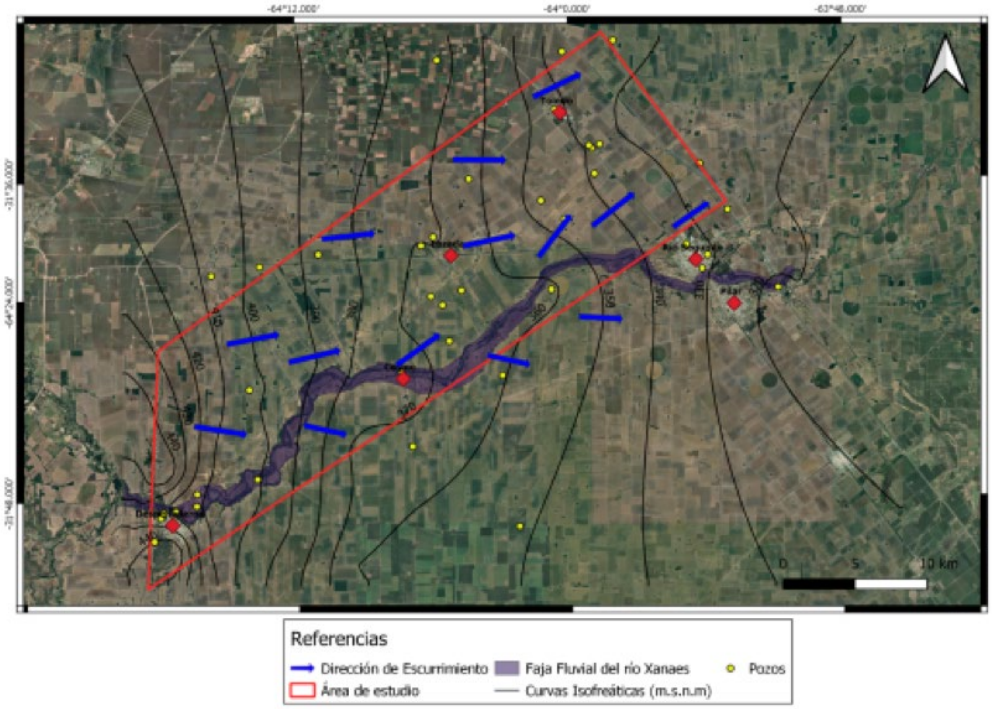


Fig. 2. Curvas isofreáticas y dirección de escurrimiento.

En cuanto al comportamiento hidroquímico puede decirse que es completamente influenciado por las condiciones hidrodinámicas, lo que puede verse en el mapa de isoconductividad (Figura 3) donde las bajas salinidades se asocian a las zonas de recarga del río que constituyen las fajas actuales y paleofajas (zonas de influencia del río), enmarcadas en un entorno regional de salinidades elevadas. Las características hidroquímicas del agua subterránea se evidencian en el mapa de diagramas de Stiff (Figura 4) en donde se ve con claridad que las zonas de baja salinidad, influenciadas por recarga del río Xanaes (fajas y paleofajas), tienen agua de características bicarbonatadas; en tanto el entorno relacionado a las unidades geomorfológicas Elevación Pampeana y Planicie Fluvio Eólica tienen salinidades elevadas y aguas de tipo sulfatadas y cloruradas.

La caracterización hidroquímica y su relación con la geomorfología se aprecia en el diagrama de Piper de la figura 5 en donde se ve una clara correspondencia entre las aguas bicarbonatadas relacionadas de las fajas y paleofajas influencias por la recarga del río Xanaes, y las aguas más evolucionadas de carácter regional, sin influencia fluvial, relacionadas a la Planicie Fluvio Eólica Central.

CONCLUSIONES

En función del análisis de los resultados puede afirmarse que el río tiene un comportamiento mayormente influente, y genera sectores de bajas salinidades relacionadas a, posiblemente, sedimentos gruesos correspondientes a la faja fluvial. Esto permite identificar sectores potencialmente interesantes a los fines de la explotación del sistema acuífero para fines sociales y productivos. Los principales sectores identificados son el entorno inmediato del paraje Cosme (ver Figura 2) en el sector central del área de estudio, donde el río toma dirección recta oeste - este y la caracterización hidroquímica confirma la presencia de aguas de tipo

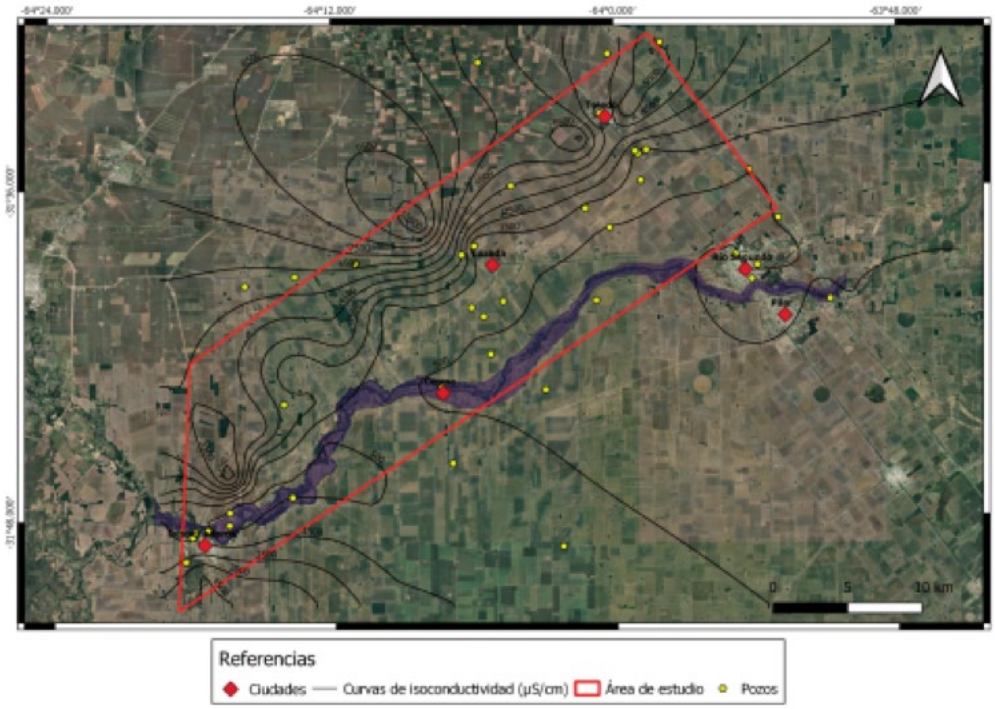


Fig. 3. Mapa de Isoconductividad Eléctrica.

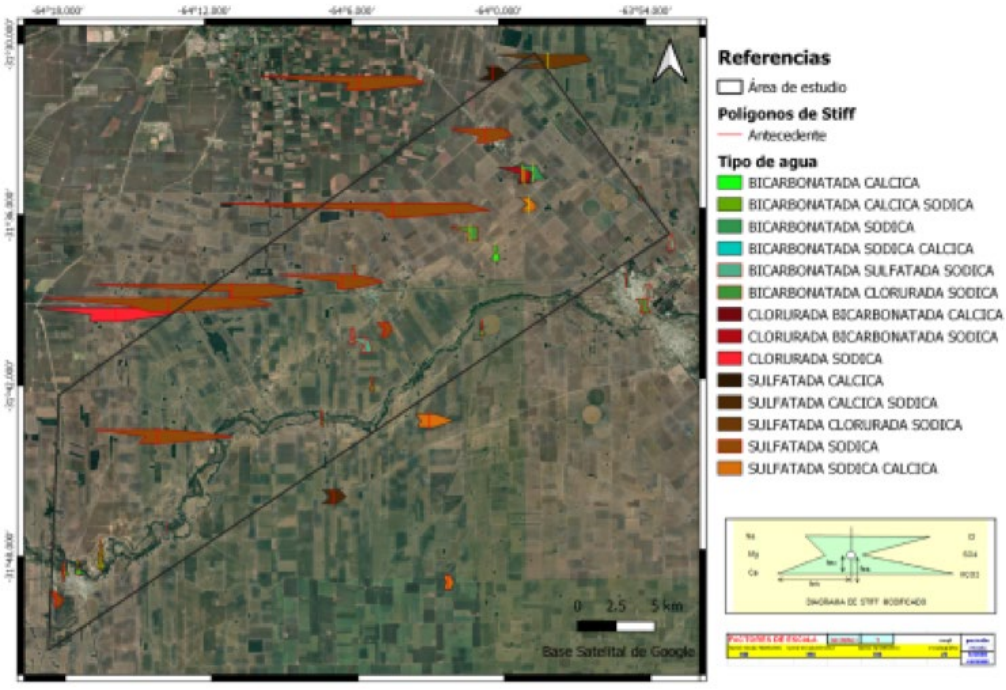


Fig. 4. Mapa de diagramas de Stiff.

bicarbonatadas de infiltración reciente. Desde aquí, por la proximidad a la ciudad de Córdoba, podría ser viable una explotación a gran escala que permita colaborar con el abastecimiento de agua a la ciudad. Otro sector de interés se define por el paleocauce que se desprende de la faja fluvial del río Xanaes, continúa con dirección noroeste, es recargado por agua de la faja fluvial del río y presenta agua de baja salinidad y tipo bicarbonatada a sulfatada. Ese paleocauce podría ser aprovechado para la explotación y abastecimiento de consumos menores como las localidades de Lozada, Toledo y demás usos productivos menores.

De acuerdo a lo concluido se recomienda continuar con el estudio y caracterización del Sistema Hidrogeológico en los sectores de interés a los fines de corroborar la presencia de sedimentos permeables explotables y definir las características hidráulicas del sistema.

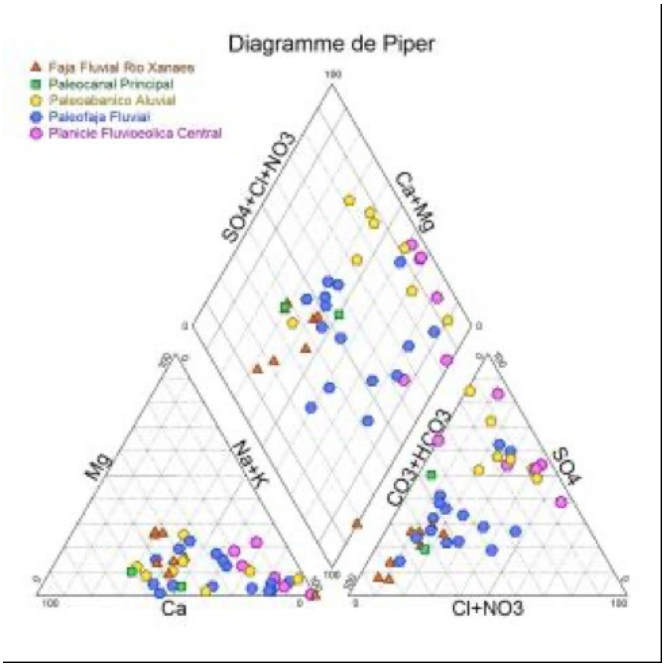


Fig. 5. Diagrama de Piper.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba, la Administración Provincial de Recursos Hídricos y la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales por los apoyos económicos e institucionales prestados y a las personas e instituciones, como la Municipalidad de Toledo, que permitieron tomar datos de sus pozos y perforaciones para ser usados en este trabajo.

REFERENCIAS

Aguirre, M. (2019). Caracterización hidrogeológica, hidroquímica e isotópica ambiental de los sistemas acuíferos del NE de Córdoba (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto.

Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Aguirre, M., Giuliano Albo, J., Becher Quinodoz, F., Maldonado, L., & Frontera, H. (2014). Recursos Hídricos Subterráneos. Parte 2: Aspectos geoquímicos, isotópicos, contaminación y aptitudes de uso. Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino (Córdoba).

Carignano, C. A., Kröhling, D., Degiovanni, S., & Cioccale, M. A. (2014). Geomorfología. Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino (Córdoba).

Grupo de Hidrología Subterránea - Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC. (s.f.). Software Easy_Quim [Software]. Universitat Politècnica de Catalunya.

QGIS Development Team. (2021). QGIS Geographic Information System (Versión 3.22) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. https://qgis.or

AVANCES EN EL DESARROLLO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL COMPLEJO MINERO FABRIL SAN RAFAEL, MENDOZA, ARGENTINA

Alejandro Cané[1], Noelia Sileo[1], Gonzalo Nader[1], Valeria Solanes[1], Cristian Gutiérrez[1]
[1]Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. del Libertador 8250, CABA, Argentina.
Mail de contacto: alejocane@gmail.com; alejandrocane@cnea.gob.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentan los trabajos realizados para el desarrollo del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Complejo Minero Fabril San Rafael (CMFSR), que contribuirá a la gestión de los pasivos mineros. Se realizaron diferentes actividades, incluyendo análisis de niveles piezométricos, muestreos de aguas, análisis hidroquímicos y de isótopos estables y radiactivos.
El área de estudio se centra en la zona del CMFSR, dentro de la subcuenca del arroyo El Tigre, ubicada a 38 km al sudoeste de la ciudad de San Rafael. Dicho complejo es atravesado por el arroyo El Tigre de régimen permanente y tributario del río Diamante.
Los resultados muestran que la fuente de recarga principal del acuífero libre del CMFSR son las lluvias locales, mayormente estivales. La dirección de flujo de agua subterránea es de sur a norte, desde zonas topográficamente elevadas hacia las más bajas. El agua subterránea está conformada por la mezcla de aguas jóvenes que se infiltran a través de tobas y conglomerados, y por aguas más antiguas que circulan lentamente a través de areniscas y conglomerados alterados. La litología y las estructuras serían los principales determinantes en los procesos hidroquímicos, isotópicos y en la tasa de recarga. Los pasivos ambientales, principalmente los ubicados en la zona de diques de cola, modifican algunas de las características fisicoquímicas del agua subterránea pero no alteran la tipología del arroyo El Tigre en su paso por el complejo.

Palabras clave: modelo hidrogeológico conceptual, pasivos ambientales mineros, isotopía.

ABSTRACT

This work presents the work done for the development of the Conceptual Hydrogeological Model of the San Rafael Industrial Mining Complex (CMFSR), which will contribute to the management of mining liabilities. Different activities were carried out, including groundwater level measurements, water sampling and hydrochemical, stable isotope and radioactive isotope analy-sis.
The study area is centered around the CMFSR zone, within the El Tigre stream sub-basin, located 38 km southwest of the city of San Rafael. This complex is crossed by the El Tigre stream with a perennial flow regime, and a tributary of the Diamante River.
The results show that the main recharge sources of the unconfined aquifer at CMFSR is local rain-fall, mostly occurring during the summer. The groundwater flow follows a south-to-north path, moving from topographically higher to lower areas. The aquifer contains a mix of young waters, which circulate rapidly through fractures in tuffs and conglomerates that facilitate infiltration and flow, and older waters that circulate slowly through altered sandstones and conglomerates, which hinder flow. Lithology and structural features would be the main factors influencing hydrochemi-cal and isotopic processes, as well as the recharge rate. Mining liabilities, mainly those located in the tailing dams zone, modify some of the physicochemical characteristics of the groundwater but do not alter the typology of the El Tigre stream as it passes through the complex.

Keywords: hydrogeological conceptual model, mining liabilities, isotopes.

INTRODUCCIÓN

El trabajo se centra en el Complejo Minero Fabril San Rafael (CMFSR), ubicado a 38 km de la ciudad de San Rafael (Fig. 1), el cual pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y donde se llevaron a cabo actividades de la minería del uranio desde 1975 hasta 1997.

El CMFSR es atravesado por el arroyo El Tigre, tributario del río Diamante y de régimen permanente. Esta zona se inserta en el extremo norte del cordón orográfico de la Sierra Pintada del Bloque San Rafael, está compuesto principalmente por rocas volcánicas, piroclásticas e hipabisales, así como rocas sedimentarias de baja permeabilidad del Pérmico inferior (Formación Los Reyunos) que conforman el sistema de acuíferos fracturados de la zona. Estructuralmente se encuentra sobre un braquianticlinal, afectado por numerosas fallas, con rumbos transversales a su eje, con dirección OSO-ENE (Parra et al. 2020).

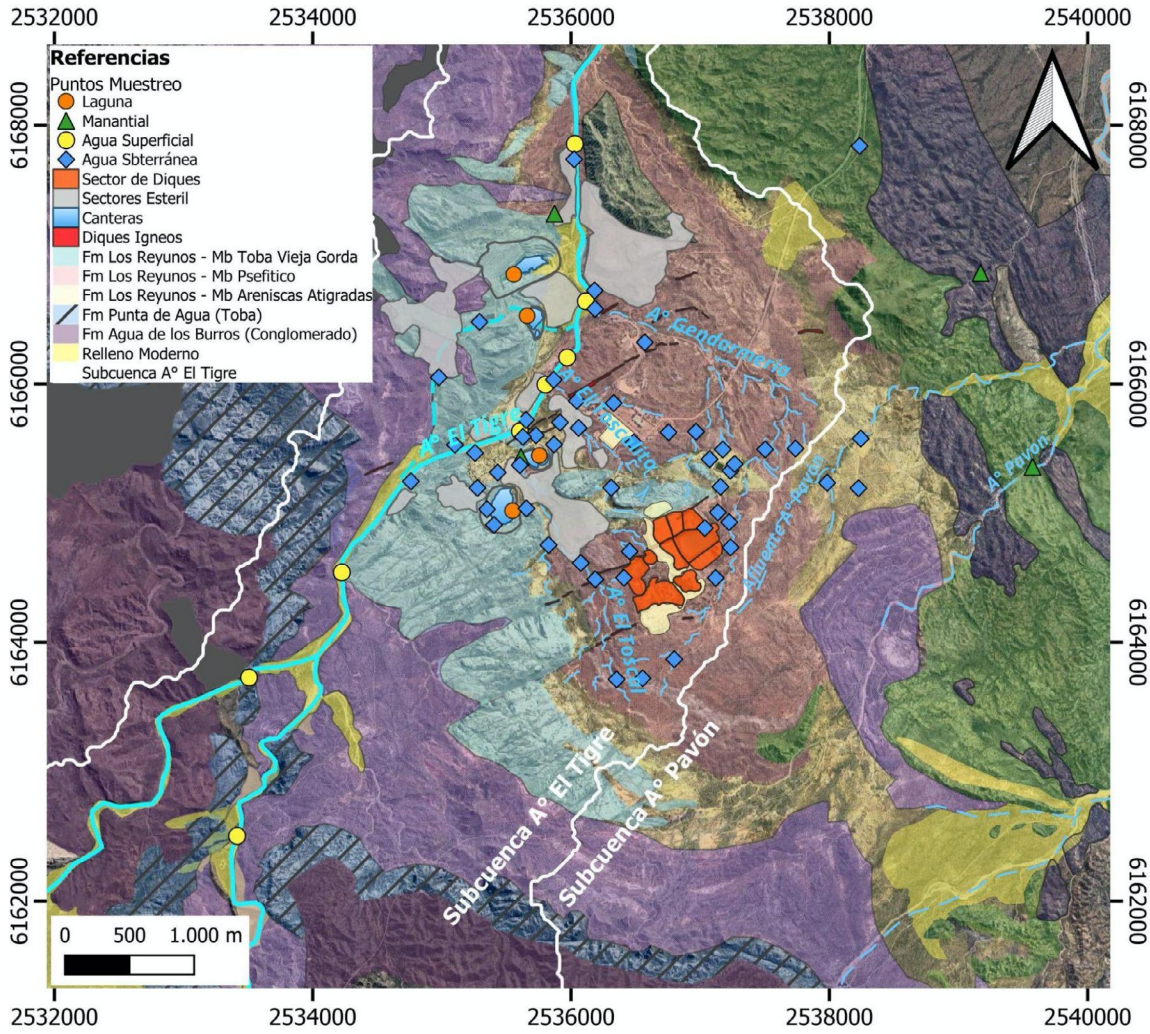


Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio y puntos de muestreo.

Según los índices climáticos de Martonne y Blair en esta zona el clima es de tipo continental semiárido, con marcada amplitud térmica diurna-nocturna y anual (verano-invierno), elevada insolación, escasa humedad y reducida nubosidad. La temperatura media anual es de 14,7° C, siendo la media mínima anual de 7° C y la media máxima anual de 21,1° C, datos correspondientes a mediciones propias realizadas durante los últimos 12 años. La precipitación media anual es de 410,9 mm, con nevadas ocasionales, no frecuentes. El período principal de lluvias se corresponde con la estación estival (INA-CRAS, 2016).

Actualmente, en el sitio se están llevando a cabo actividades de remediación de los pasivos ambientales, para lo cual es necesario desarrollar un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) que permita conocer, con cierto nivel de detalle, el movimiento del agua subterránea, superficial y atmosférica. Este trabajo presenta los avances alcanzados en el desarrollo de dicho modelo, por un equipo interdisciplinario de la CNEA, apoyado por el Proyecto de Cooperación Técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica, ARG/7/008, y fondos institucionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar el modelo conceptual hidrogeológico se realizaron diferentes actividades, incluyendo la revisión de estudios de geología estructural, hidrológicos e hidroquímicos.

La caracterización del agua subterránea respecto a su recarga, dirección de flujos preferenciales y posibles descargas se realizó a partir de un análisis temporal y espacial de niveles. Para esto, se contó con registros de niveles de agua subterránea en diversos pozos ubicados dentro y en cercanías del CMFSR, desde el año 2003, con lo cual se generó una base de datos de frecuencia trimestral. En noviembre del 2020 se instalaron 17 registradores automáticos de nivel generando una base de datos de frecuencia horaria.

Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en el área del CMFSR, una en época de lluvia y otra en época seca, para la determinación de parámetros hidroquímicos e isotópicos. En agua superficial, se muestrearon ríos, arroyos y canteras. En agua sub-

terránea, las muestras se tomaron en piezómetros y manantiales. Se realizaron mediciones in situ de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y nivel freático (en el caso de agua subterránea). En todas las muestras colectadas se midieron isótopos estables de deuterio (^{2}H) y oxígeno 18 (^{18}O) y radiactivos (Tritio, ^{3}H), iones mayoritarios (Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3-, NO_3-) y minoritarios (CO_3^{2-}, NH_4^{+}, F^{-}, Fe, Si).

Para la caracterización isotópica de las precipitaciones se instaló un colector de agua de lluvia en el CMFSR a 1000 m s.n.m., tomando muestras mensuales acumulativas desde 2019 a 2020 donde se midió $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y ^{3}H. Las determinaciones de ^{2}H y ^{18}O fueron realizadas en el laboratorio de Isotopía del Instituto de Geología de Costas y Cuaternario de la ciudad de Mar del Plata con un equipo LWIA-45-Ep Los Gatos Research Inc. Las determinaciones de ^{3}H se realizaron en el laboratorio Isodetect Gmbh en Leipzig (Alemania), mediante la técnica conteo de centelleo líquido.

Para caracterizar de los cuerpos de agua se determinaron sus tipologías por medio de diagramas de Piper y se analizó su distribución espacial mediante diagramas de Stiff. Para identificar el origen del agua que recarga del acuífero y conocer los principales procesos que afectan la composición isotópica del agua, se presentan los gráficos que muestran la relación entre $\delta^{18}O$ ‰ y $\delta^{2}H$ ‰. Con los datos isotópicos de precipitaciones se construyó una Línea Meteórica Local (Local Meteoric Water Line, LMWL) (Craig, 1961; Dansgaard, 1964) que fue utilizada en el análisis de los resultados de $\delta^{18}O$ ‰ y $\delta^{2}H$ ‰.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de niveles piezométricos

Las líneas de flujo de aguas subterráneas presentan un sentido sur-norte y parecen estar condicionadas por la morfología superficial. Teniendo en cuenta la topografía (curvas de nivel) el flujo subterráneo circularía preferencialmente a través de los cauces de los arroyos temporarios El Toscal, El Toscalito y Gendarmería hasta alcanzar el cauce del arroyo El Tigre. En la zona de diques, el agua subterránea (que podría entrar en contacto con los pasivos ambientales) fluye en sentido SSE–NNO, probablemente a través de los cauces de los arroyos temporales El Toscalito y Gendarmería. En la zona de la subcuenca Pavón, el agua subterránea se mueve en sentido SSO–NNE siguiendo, aparentemente, el cauce del arroyo temporario homónimo (y por lo tanto no alcanzaría al arroyo El Tigre).

Prácticamente todos los niveles piezométricos responden a eventos de lluvias locales, aunque de formas diferentes permitiendo agrupar a los pozos en dos grandes grupos. El primero, corresponde a las tobas y al conglomerado donde se observa una recarga rápida que podría estar relacionada a la mayor apertura y menor relleno de las fracturas. El segundo grupo responde a los pozos ubicados en areniscas, caracterizados por una recarga más lenta que puede estar relacionada al relleno de las fracturas en este tipo de rocas. En ambos casos, estas propiedades varían en profundidad.

Isotopía

Se obtuvo una LMWL preliminar mediante regresión ortogonal ponderada por precipitación (PWRMA): $\delta^{2}H = 8{,}1 \pm 0{,}3\ \delta^{18}O + 16 \pm 2$ con un coeficiente de regresión R2 de 0,966. La pendiente mayor a 8, es típica de ambientes montañosos con lluvias orográficas, pudiendo representar condensación con bajo fraccionamiento cinético (Rozanski et al., 1993).

Se pudo observar cierto enriquecimiento isotópico a lo largo de la línea de flujo del arroyo El Tigre y además, que los puntos ubicados sobre el cauce antiguo del mismo se encuentran más enriquecidos que aquellos que se encuentran sobre el cauce principal. De acuerdo con las condiciones locales, principalmente el bajo caudal del A° El Tigre, se puede inferir que el enriquecimiento isotópico estaría ligado a un proceso de evaporación.

Los valores de las aguas subterráneas muestreadas en los piezómetros del CMFSR presenta menor dispersión comparado con las aguas superficiales. Solo tres piezómetros presentan una desviación mostrando que pueden haber sufrido un proceso de enriquecimiento isotópico mayor al resto. La Figura 2 muestra que la composición isotópica de las aguas subterráneas en la zona del CMFSR, es ligeramente más enriquecida que las muestras del arroyo El Tigre, en esa misma zona.

La composición isotópica similar entre aguas superficiales y subterráneas sugiere conexión hidrogeológica entre ambas, y un origen común a partir de las lluvias locales.

Por otro lado, las aguas de las lagunas de cantera se encuentran enriquecidas respecto al resto de los sitios muestreados evidenciando un proceso evaporativo intenso, típico de cuerpos de agua someros expuestos a altas temperaturas y con cierto tiempo de residencia superficial (Figura 2). Se evidencia también que existiría una correlación directa entre la composición isotópica de las aguas de cantera y las aguas subterráneas (siguiendo ambas la misma tendencia), lo que indicaría la existencia de un aporte de las primeras que se mezclaría con el agua de las precipitaciones en estos sitios.

Se analizó además la composición isotópica de los piezómetros de acuerdo a la tipología de las aguas. Se determinó que valores de exceso de deuterio (d) elevados (mayores a 10) se corresponden, en general, con las aguas tipo bicarbonatadas, mientras que las aguas con d menores a 10 se correlacionan con las tipologías sulfatadas y cloruradas, con excepciones puntuales.

Los valores de ^{3}H en el acuífero libre del CMFSR permitieron diferenciar dos grandes grupos. El primero responde a los pozos ubicados en tobas de la Formación Los Reyunos con valores más altos (media de 2,03 UT) y un segundo grupo que responde a pozos que se encuentran en conglomerados y areniscas, cuyos valores son más bajos presentando una media de 0.84 UT.

En precipitaciones se registraron los valores más altos, superando entre 5 y 8 veces la media en pozos. Esta diferencia pareciera

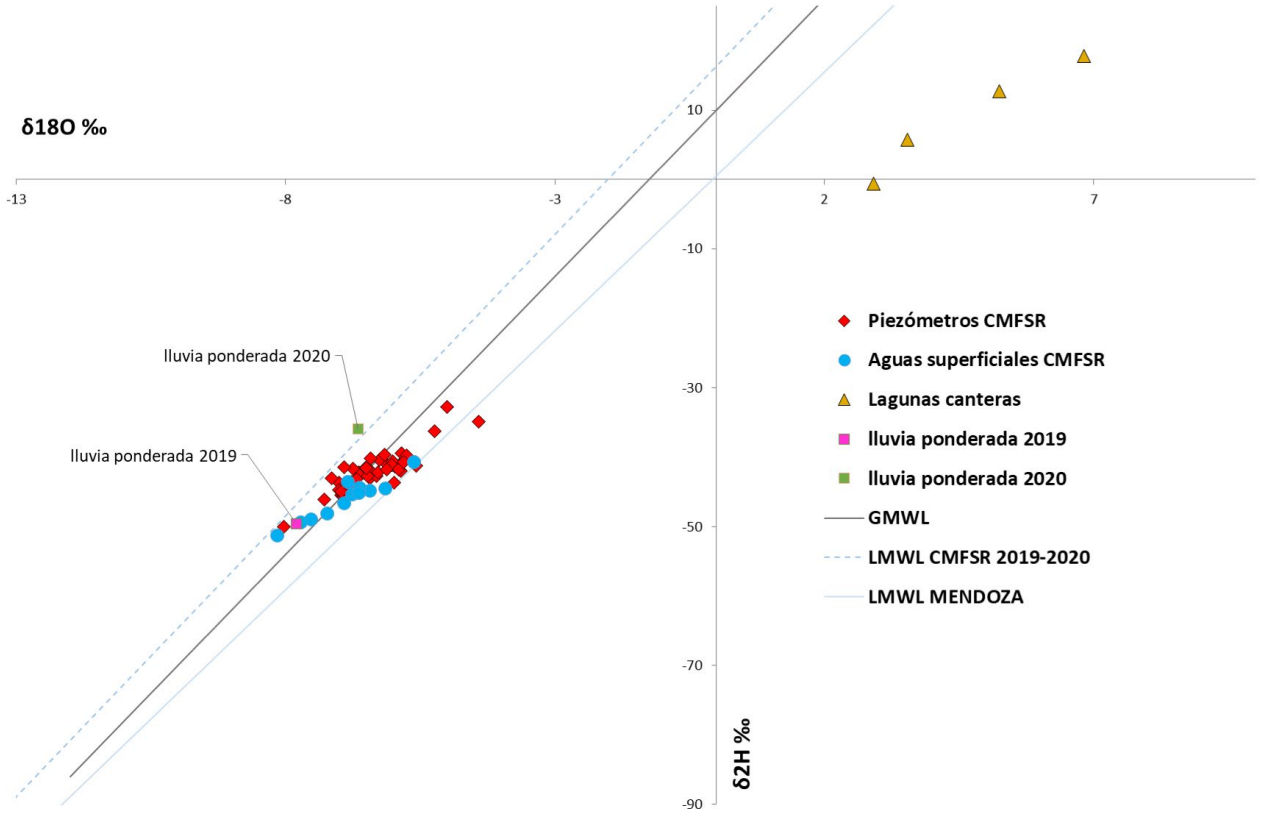


Fig.2: Relación ^{2}H vs. ^{18}O, de aguas subterráneas y superficiales en el CMFSR.

indicar que la recarga del agua de lluvia se mezcla con aguas del acuífero más antiguas. Otra hipótesis que se plantea es que el agua de recarga sufra un proceso de difusión gaseosa en su paso por la zona no saturada.

Hidroquímica

El diagrama de Piper para agua superficial (Fig.3A) muestra dos tipos de agua bien definidos: el agua del arroyo El Tigre es sulfatada cálcica; mientras que el agua contenida en las canteras es del tipo sulfatada sódica. Para agua subterránea, el diagrama de Piper se graficó teniendo en cuenta el grado de mineralización de las aguas (Fig. 3B). Las aguas poco mineralizadas (CE<900 µS/cm) son del tipo bicarbonatadas sódicas o cálcicas; mientras que las aguas mineralizadas (900<CE<1900 µS/cm) presentan tipologías mixtas en aniones y cationes, con predominio del ion sulfato y/o sodio. Las muestras de agua muy mineralizadas (CE>1900 µS/cm) son en general sulfatadas mixtas. La variedad en la tipología de las aguas subterráneas puede deberse a las distintas litologías allí presentes.

El mapa de los diagramas de Stiff para agua superficial (Fig. 4A) muestra que la tipología de las aguas del arroyo El Tigre no varía al atravesar el CMFSR, ni tampoco la concentración de los iones, indicando que dicho arroyo no estaría afectado por las actividades antrópicas allí desarrolladas. Por otro lado, los diagramas de Stiff para agua subterránea muestran una gran variación en la tipología de las aguas dentro del CMFSR (Fig. 4B). En la zona de diques se observa un aumento en la concentración de iones, debido a posibles aportes de los pasivos mineros ambientales.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la fuente de recarga principal del acuífero libre del CMFSR son las lluvias locales, mayormente estivales; siguiendo, el flujo de agua subterránea un recorrido de sur a norte, moviéndose desde las zonas más elevadas topográficamente a las más bajas. El agua subterránea está conformada por la mezcla de aguas jóvenes de circulación rápida a través de fracturas en tobas y conglomerados, que facilitan la infiltración y el flujo, y por aguas más antiguas de circulación lenta a través de areniscas y conglomerados alterados, que dificultan la misma. El arroyo El Tigre constituye el nivel de base, por lo que sería el principal receptor del flujo subterráneo en el área de estudio.

Por otro lado, la litología y las estructuras geológicas serían los principales determinantes en los procesos hidroquímicos, isotópicos y en la tasa de recarga. Los pasivos ambientales, principalmente los ubicados en la zona de diques, modifican algunas de las características fisicoquímicas del agua subterránea pero no alteran la tipología del arroyo El Tigre en su paso por el complejo.

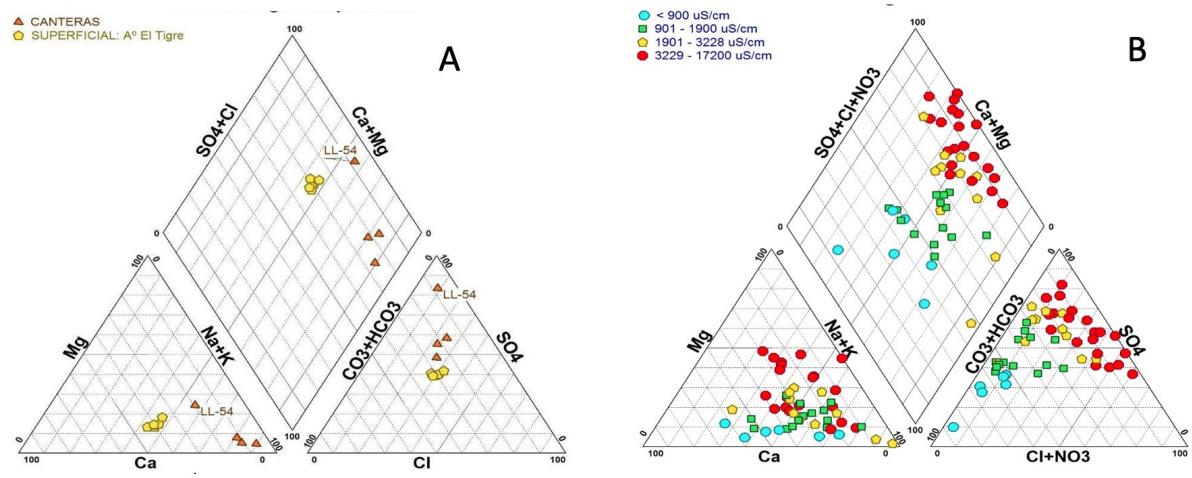


Fig. 3. Diagrama de Piper para agua superficial (A) y subterránea (B).

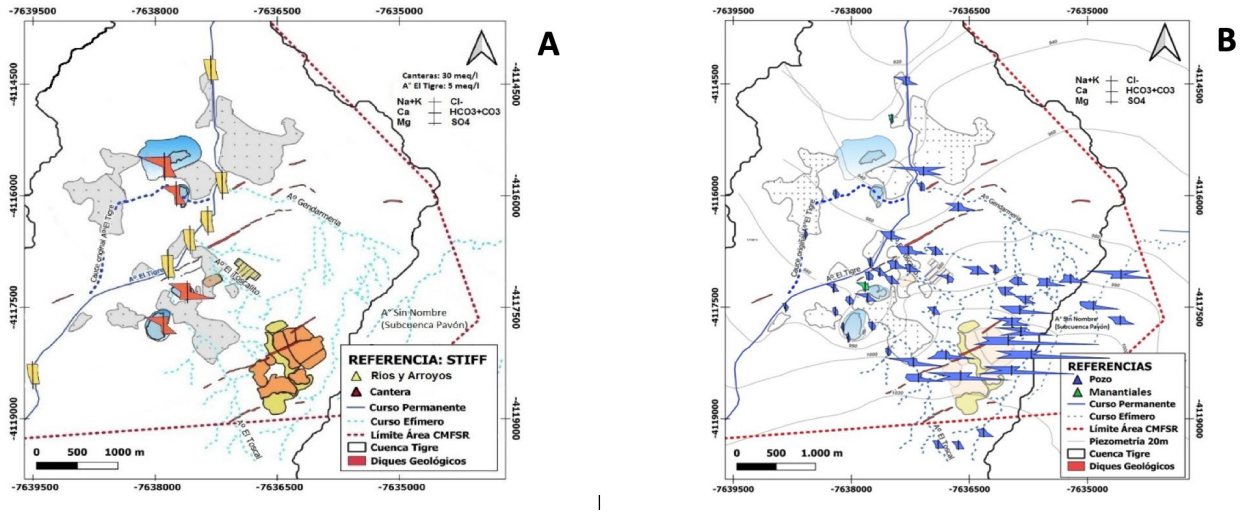


Fig. 4. Mapa de diagramas de Stiff para agua superficial (A) y subterránea (B).

REFERENCIAS

Craig, H. (1961). *Isotopic Variations in Meteoric Waters.* Science, 133, 1702-1703. http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702.

Dansgaard, W. (1964). *Stable isotopes in precipitation*. Tellus, 16: 436-468. https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

INA-CRAS (2016). Recopilación, Revisión, Actualización y Análisis de la Información Hidrogeológica, Hidrológica, e Hidroquímica. *Informe Técnico IT-358 – San Juan. CNEA.*

Parra, F.J., Scarlatta, L.R., López Pinto, M., Felkai, E.N., Anzil, P.A., Miyno, S.S., Ferreyra, P. Salvatore, M. (2020). Caracterización estructural de la deformación frágil en la subcuenca Arroyo El Tigre. Sierra Pintada, Mendoza. *Informe Técnico IF-GEMP-RC-002 Rev.: 1. CNEA.*

Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. and Gonfiantini, R. (1993). *Isotopic patterns in modern global precipitation, in Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 78, pp. 1-36, AGU, Washington, D.C., 1993.

ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS DE CARBÓN EN EL AGUA DEL RÍO LEBU, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

Isidora Figueroa[1], Matilde Basso[2], Rodrigo Ceballos[3]
[1]Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile.
[2]Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile.
[3]Ministerio de Minería, Región del Biobío, Colo-Colo N°756, 2° piso, Curanilahue, Chile.
Mail de contacto: ifigueroa@ing.ucsc.cl

RESUMEN
El objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto generado por el drenaje ácido de minas (DAM) de carbón en la calidad del agua del río Lebu, ubicado en la Región del Biobío, Chile, como consecuencia de la actividad minera de carbón en la zona. Para ello, se llevó a cabo un muestreo que comprendió un análisis químico del agua del río Lebu en diferentes puntos de descarga. Este análisis incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, potencial redox) y la concentración de metales pesados (Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn) en puntos estratégicos del cauce, con el fin de identificar contaminantes asociados al DAM y evaluar su distribución en relación con las fuentes potenciales de contaminación minera.

Palabras clave: drenaje ácido de minas (DAM); calidad del agua; análisis químico.

ABSTRACT
The main objective of this research is to evaluate the impact of acid mine drainage (AMD) from coal mines on the water quality of the Lebu River, located in the Biobío Region of Chile, as a result of coal mining activity in the area. To this end, sampling was carried out that included a chemical analysis of the water from the Lebu River at different discharge points. This analysis included the measurement of physicochemical parameters (pH, temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, redox potential) and the concentration of heavy metals (Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn) at strategic points along the riverbed, in order to identify contaminants associated with AMD and evaluate their distribution in relation to potential sources of mining pollution.

Keywords: acid mine drainage (AMD); water quality; chemical analysis.

INTRODUCCIÓN

Según Cochilco (2014), la minería en Chile es un pilar económico clave, aportando alrededor de un 11 % del PIB y más de la mitad de las exportaciones. Sin embargo, esta actividad genera impactos ambientales significativos, entre ellos el drenaje ácido de minas (DAM), que libera soluciones ácidas con altas concentraciones de metales pesados y sulfatos, afectando cuerpos de agua y suelos (Barón, 2013). Aunque el DAM es más común en faenas metálicas, también puede generarse en minas de carbón cuando existen minerales sulfurados como la pirita (FeS_2) en los estratos geológicos. En la cuenca del río Lebu, ubicada en la Región del Biobío, estudios previos han identificado la presencia de pirita asociada a capas de carbón, lo que sugiere un alto potencial de generación de DAM (Mellado, 2018).

Diversas investigaciones han abordado esta problemática desde distintos enfoques. Aduvire (2006) y Bahamóndez (2012) analizaron los procesos geoquímicos y microbiológicos que intensifican la formación de aguas ácidas. Chartrand y Bunce (2003), así como Kefeni et al. (2017), revisaron técnicas de remediación, y Jaishankar et al. (2014) estudiaron la toxicidad de metales pesados como Fe^{3+}, Mn y Al^{3+}, destacando sus impactos en la salud y el ambiente. Estas referencias fundamentan la importancia de monitorear este fenómeno en zonas mineras.

El presente estudio evalúa el efecto del DAM en la calidad del agua del río Lebu, históricamente afectado por la actividad minera del carbón. Se analizaron parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox), así como también, la concentración de metales pesados en puntos estratégicos del cauce, con el objetivo de establecer una línea base de calidad del agua y su relación con fuentes de contaminación minera.

La zona de estudio corresponde al río Lebu, cuya cuenca hidrográfica tiene un área aproximada de 855 km², de régimen pluvial y drenaje exorreico, con la ciudad de Lebu como principal centro poblacional (Carrasco, 2007).

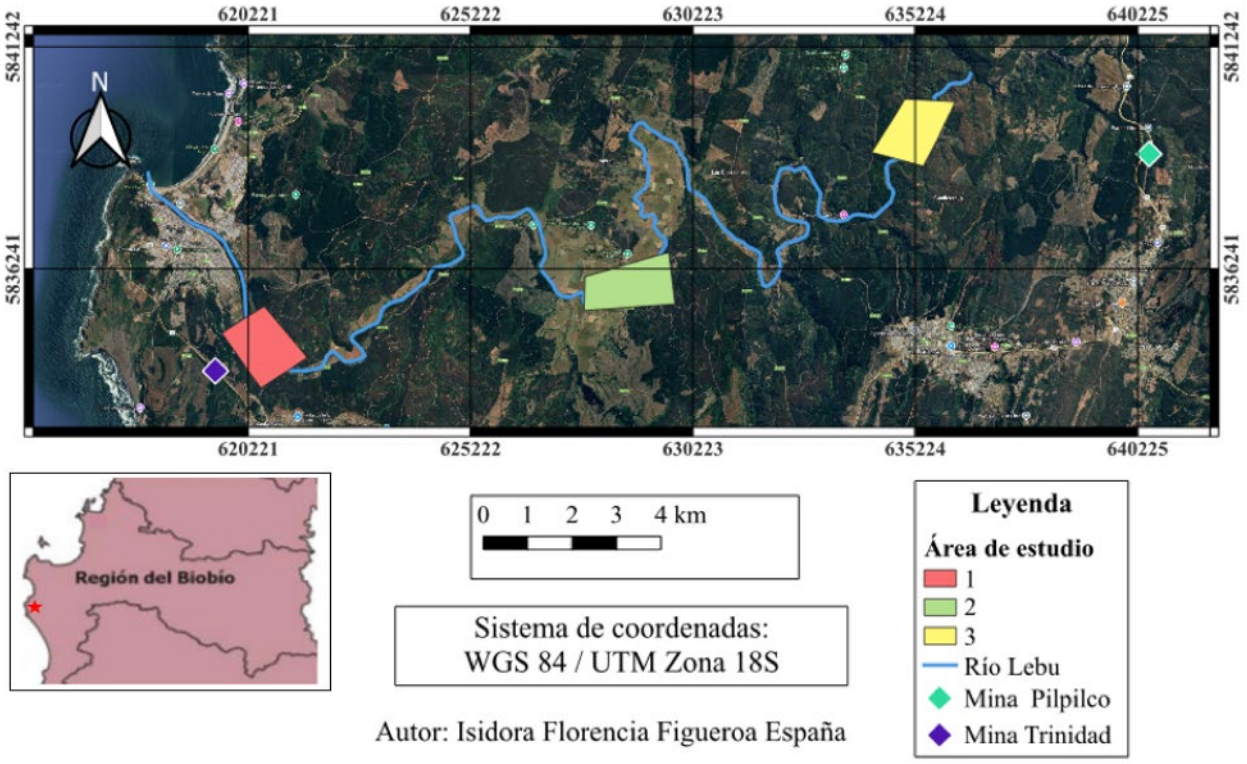


Fig. 1. Mapa ubicación zona de estudio – Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio de la calidad del agua en el río Lebu, considerando la posible influencia del DAM provenientes de minas de carbón cercanas. Se seleccionaron tres puntos de muestreo (Fig. 2): cuenca baja (P1), cuenca media (P2) y cuenca alta (P3) del río Lebu. En cada punto se recolectaron muestras superficiales y profundas de agua, utilizando frascos previamente esterilizados y asegurando el transporte adecuado de las muestras.

El análisis químico se llevó a cabo en el Laboratorio de Procesos Químicos Aplicados de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Se midieron in situ parámetros como la temperatura, y en laboratorio se evaluaron pH, conductividad eléctrica, potencial redox y sólidos disueltos totales (TDS) mediante medidor multiparamétrico HI5521 & HI5522 (Hanna Instruments). Además, se analizaron metales pesados (Al^{3+}, Fe^{3+}, Mn) por espectrofotometría visible con espectrofotómetro HI801 (Hanna Instruments).

Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable, según se detalla en la Tabla 1.

SUSTANCIAS	VALOR DE REFERENCIA [MG/L]
Al^{3+}	0,2
Fe^{3+}	0,3
Mn	0,4

Tabla 1. Valores de referencia máximos para algunos metales pesados – Modificado de la OMS, 2006.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian una posible influencia del drenaje ácido de minas de carbón (DAM) en la calidad del agua del río Lebu.

Medición in situ

Se realizó un muestreo en tres puntos de descarga a lo largo del río (Fig. 2), donde se midió in situ la temperatura (Tabla 2). Los

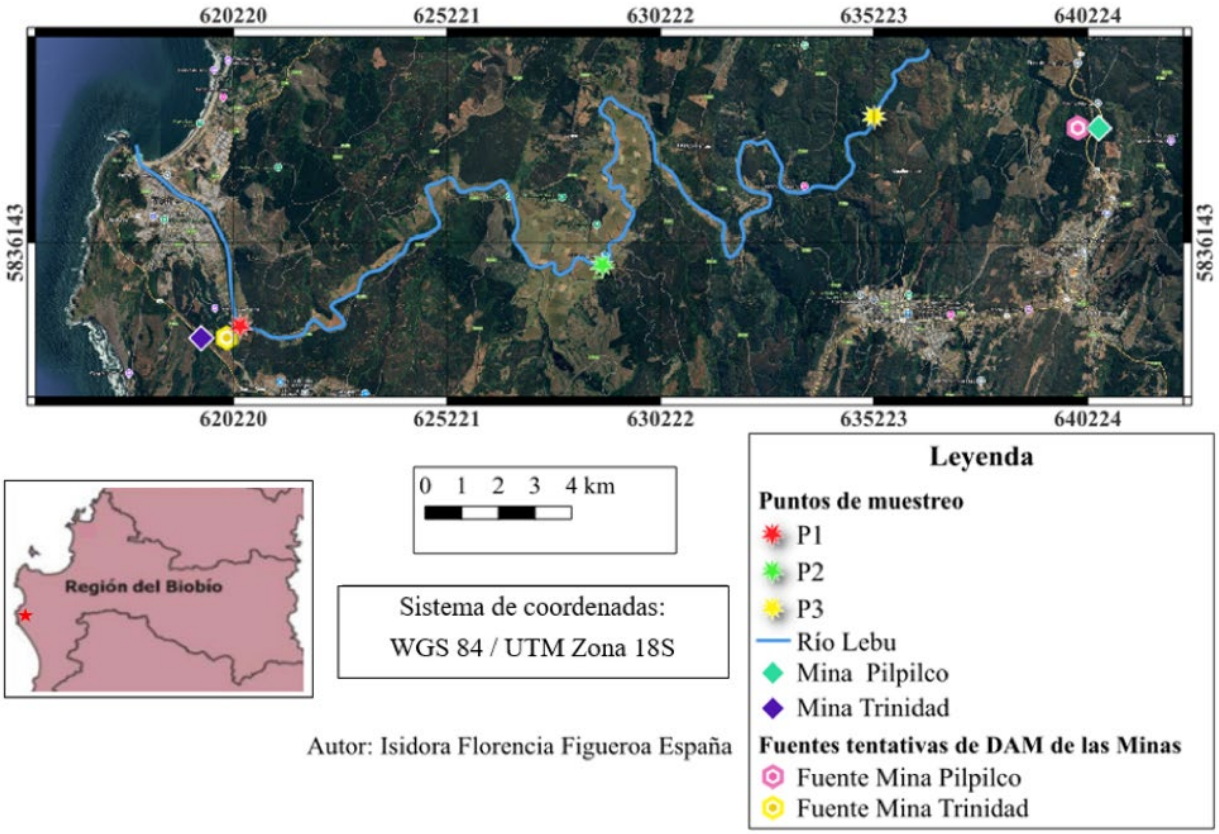


Fig. 2. Ubicación de los puntos de descarga – Elaboración propia.

valores de temperatura obtenidos en los tres puntos de descarga mostraron variabilidad: 17,5°C en P1, 17°C en P2 y 14,5°C en P3. Si bien se observó cierta variabilidad, esta diferencia es moderada y no necesariamente significativa en términos de procesos de disolución de metales como hierro y manganeso. La menor temperatura en P3 podría estar vinculada a una menor exposición solar o a la influencia de fuentes más frías. Además, los datos sugieren una tendencia al aumento de la temperatura hacia la cuenca baja, lo cual podría estar relacionado con la menor cobertura vegetal o cambios en las condiciones del cauce.

PUNTOS DE DESCARGA	MUESTRAS	COORDENADA E (UTM)	COORDENADA N (UTM)	TEMPERATURA (°C)
1	MA1 (S)	6,203,700	5,834,228	18
	MA2 (F)			17
2	MB1 (S)	6,288,590	5,835,657	15,4
	MB2 (F)			17
3	MC1 (S)	6,351,970	5,839,096	14,6
	MC2 (F)			14,4

Tabla 2. Resultados de la temperatura en los puntos de descarga – Elaboración propia.

Medición en Laboratorio

Se midieron los parámetros fisicoquímicos del agua, obteniéndose valores medios de pH, conductividad eléctrica, potencial redox y sólidos disueltos totales (TDS) para los puntos de muestreo (P1, P2 y P3) (Tabla 3). Se observa que el pH mantiene valores cercanos a la neutralidad (7,5–7,8), con una leve disminución hacia la cuenca baja (P1), lo que podría indicar procesos de acidificación vinculados a la actividad minera. La conductividad eléctrica presenta un incremento en P2, alcanzando valores superiores a 70 µS/cm, lo que sugiere una mayor presencia de iones disueltos y probable influencia de lixiviados mineros. En cuanto al potencial redox, los valores registrados fueron levemente negativos, lo que indica condiciones ligeramente reductoras en el sistema acuático. Este tipo de ambiente puede influir en la forma química y la movilidad de algunos metales, aunque no se evidencian condiciones lo suficientemente extremas como para generar procesos de movilización intensa.

En cuanto a los metales pesados (Tabla 4), el hierro (Fe^{3+}) presentó las concentraciones más elevadas, destacando en la cuenca baja (P1), donde superó el límite establecido por la OMS para agua potable (0,3 mg/L). Este resultado podría estar relacionado con la cercanía a antiguas zonas de descarga minera, donde es posible la liberación de hierro desde sedimentos o materiales residuales. El manganeso (Mn) también presenta concentraciones relevantes, sobre todo en P2, alcanzando valores de hasta 0,2 mg/L, lo cual

PUNTOS DE DESCARGA	MUESTRAS	PH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (MS/CM)	POTENCIAL REDOX (MV)	TDS (MG/L)
1	MA1 (S)	7,76	62,58	-30,7	31,25
	MA2 (F)	7,83	59,85	-34,3	29,92
2	MB1 (S)	7,63	81,87	-29,1	40,77
	MB2 (F)	7,82	99,34	-30,3	44,98
3	MC1 (S)	7,69	89,18	-24,3	42,37
	MC2 (F)	7,67	68,37	-34,9	34,20

*S: Superficial *F: Fondo

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en laboratorio – Elaboración propia

PUNTOS DE DESCARGA	MUESTRAS	Al^{3+} (MG/L)	Fe^{3+} (MG/L)	MN (MG/L)
1	MA1 (S)	0,1	0,38	0,0
	MA2 (F)	0,0	0,38	0,1
2	MB1 (S)	0,0	0,38	0,2
	MB2 (F)	0,0	0,37	0,1
3	MC1 (S)	0,0	0,27	0,2
	MC2 (F)	0,0	0,30	0,1

*S: Superficial *F: Fondo

Tabla 4. Concentración de metales pesados obtenidos en laboratorio – Elaboración propia.

podría asociarse a procesos de lixiviación y transporte desde las áreas de explotación minera.

Por otra parte, debido a la limitación de datos y con el objetivo de evitar interpretaciones erróneas derivadas de interpolaciones espaciales con escaso soporte estadístico, no se incluyeron mapas de distribución espacial. En su lugar, se optó por presentar un análisis exploratorio mediante un gráfico de caja (Fig. 3), que permite comparar visualmente las concentraciones registradas de Al^{3+}, Fe^{3+} y Mn, evidenciando la mayor recurrencia y consistencia de niveles elevados de Fe^{3+}, así como la dispersión en los valores de Mn y la presencia puntual de Al^{3+}.

En el gráfico se observa que el Fe^{3+} presenta la mediana más elevada, superando el umbral recomendado por la OMS para agua potable (0,3 mg/L), lo que evidencia concentraciones que merecen ser monitoreadas con mayor profundidad. En contraste, el Mn exhibe una mayor dispersión, con valores entre 0,0 y 0,2 mg/L, mientras que el Al^{3+} se mantiene en niveles bajos o no detectables, destacando un único valor atípico correspondiente a una muestra superficial.

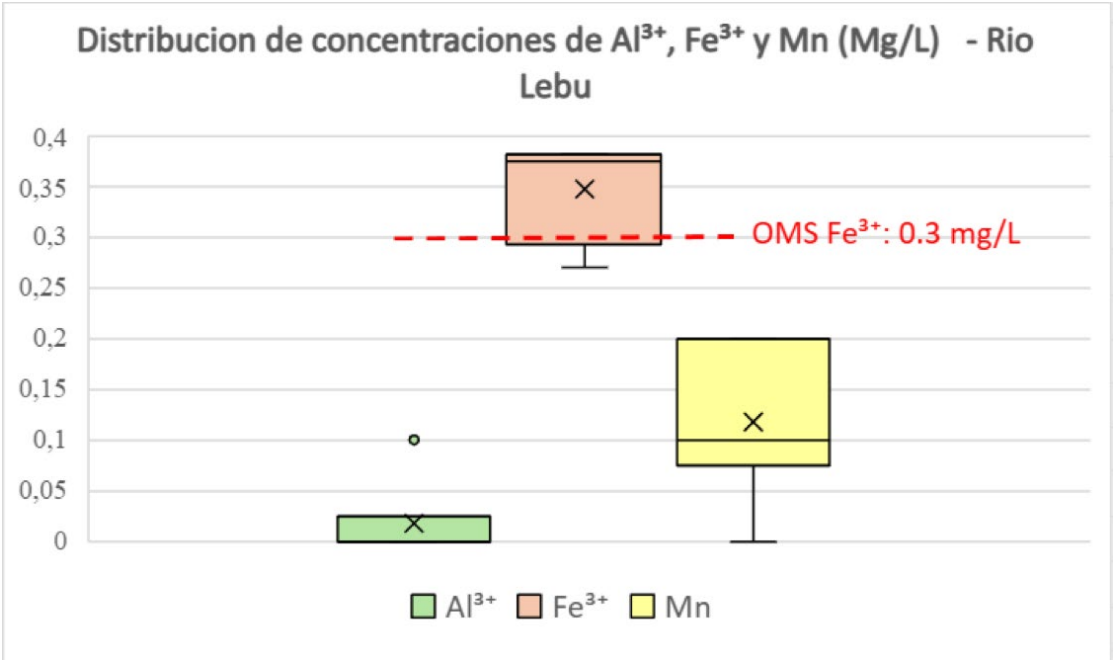


Fig. 3. Distribución exploratoria de concentraciones de Al^{3+}, Fe^{3+} y Mn (mg/L) en el río Lebu – Elaboración propia.

Si bien el conjunto de datos se compone de sólo seis observaciones por metal, el uso de este gráfico resulta pertinente en esta etapa exploratoria, ya que proporciona una visión sintética y comparativa entre los elementos analizados, destacando especialmente la persistencia de concentraciones elevadas de hierro. No obstante, se recomienda ampliar la red de monitoreo en futuros estudios para fortalecer la robustez estadística de los análisis y permitir representaciones espaciales con mayor confiabilidad.

CONCLUSIONES

El presente estudio confirma que el drenaje ácido de minas (DAM) representa una amenaza latente para la calidad del agua en el río Lebu, debido a la presencia de metales pesados como hierro y manganeso, cuyos valores, en algunos sectores, superan las concentraciones de referencia establecidas. Si bien los valores de pH registrados fueron neutros a levemente alcalinos, lo que no evidencia condiciones ácidas, la detección de estos metales sugiere procesos geoquímicos complejos asociados al DAM, incluso en condiciones de pH moderado. Estos resultados respaldan la necesidad urgente de implementar programas de monitoreo permanente para evaluar la evolución del fenómeno y mitigar sus impactos sobre los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, se destaca la relevancia de fortalecer la educación ambiental y la participación comunitaria, fomentando la corresponsabilidad en la gestión de los recursos hídricos y en la prevención de impactos derivados del DAM. Este enfoque multidisciplinario permitirá a las autoridades locales y a la sociedad civil diseñar e implementar estrategias integrales de manejo ambiental que fortalezcan la resiliencia del territorio frente a la amenaza del drenaje ácido de minas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Católica de la Santísima Concepción, al equipo docente del Departamento de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería por el valioso apoyo técnico y académico brindado. Extiendo un especial agradecimiento a la profesora Matilde Basso por su constante orientación y enseñanzas, así como a Don Rodrigo Ceballos por su acompañamiento y colaboración en terreno. Este trabajo no habría sido posible sin el respaldo de ellos.

REFERENCIAS

Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Recuperado en http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf

Bahamóndez, H. (2012). “Importancia de la actividad microbiológica en la predicción del drenaje ácido de minas” [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/111174/bahamondez_ci.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Barón, T. (2013). Caracterización del drenaje ácido generado en una mina de oro y propuesta técnica de remediación [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Recuperado de https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ca7a574-1f04-4817-be5d-ed5972fb715d/content

Carrasco Ulloa, A. (2007). Lebu, capital provincial de Arauco. Desarrollo territorial armónico. https://www.redalyc.org/pdf/198/19801513.pdf

Chartrand, MMG, y Bunce, NJ (2003). Remediación electroquímica del drenaje ácido de minas. Journal of Applied Electrochemistry, 33(3), 259–264. https://doi.org/10.1023/A:1024139304342

Comisión Chilena del Cobre, Cochilco. (2014). Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1994-2013. https://www.cochilco.cl/web/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales/

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B. y Beeregowda, K.N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. Interdisciplinary Toxicology, 7(2), 60-72. Doi: 10.2478/intox-2014-0009

Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M. y Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. Journal of Cleaner Production, 151, 475–493. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082

Mellado, A. (2018). Guía metodológica para la identificación e inventario de minas de carbón con drenaje ácido. [Tesis de título profesional, Universidad de Concepción].

PROCEDIMENTO PARA HIERARQUIZAÇÃO DE ZONAS DE RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: APLICAÇÃO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS(SP) - ESCALA 1:50.000

Lavínia Aguiar Pereira[1], Lázaro Valentim Zuquette[1,2]
[1]Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos, SP, Brasil.
[2]Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
Mail de contacto: laviniaaguiar136@usp.br

RESUMO
As águas subterrâneas, que representam mais de 90% da água doce líquida do planeta, são essenciais à vida e requerem gestão cuidadosa. Este estudo teve como objetivo hierarquizar as áreas de recarga no municipio de São Carlos (SP), com base em fatores geológicos, climáticos, geotécnicos e de uso do solo, utilizando ponderação multicritério no QGIS em escala 1:50.000. A análise, feita em ambiente SIG com dados gerados por diferentes estudos que resultou em um mapa que classificou as áreas de recarga em cinco níveis. Constatou-se que 58% da área possui alto ou muito alto potencial de recarga. Os resultados contribuem para o planejamento territorial e conservação dos recursos hídricos subterrâneos no município.

Palavras chaves: área de recarga, águas subterrâneas, São Carlos, Brasil.

RESUMEN
Las aguas subterráneas, que representan más del 90 % del agua dulce líquida del planeta, son esenciales para la vida y requieren una gestión cuidadosa. Este estudio tuvo como objetivo jerarquizar las zonas de recarga en São Carlos (SP), basándose en factores geológicos, climáticos, geotécnicos y de uso del suelo, utilizando la metodología de ponderación multicriterio en QGIS. El análisis, realizado en un entorno SIG con datos oficiales, resultó en un mapa temático que clasificó las áreas de recarga en cinco niveles. Se constató que el 58 % del área posee un potencial de recarga alto o muy alto. Los resultados contribuyen a la planificación y conservación de los recursos hídricos subterráneos del municipio.

Palabras clave: aguas subterráneas, área de recarga, São Carlos, Brasil.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam aproximadamente 97% da água doce líquida do planeta, armazenadas em aquíferos formados por rochas e sedimentos. São fundamentais para o abastecimento humano, a manutenção de ecossistemas aquáticos e terrestres, e a sustentação do fluxo de base dos rios, especialmente em períodos de estiagem. Apesar de sua importância, esse recurso ainda é tratado como "água invisível", o que dificulta sua gestão adequada e o torna vulnerável à contaminação e à superexploração (Libardi, 2005).

A recarga dos aquíferos — parcela da água que infiltra na superficie e percola até atingir a zona saturada — é um dos processos mais relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos. No entanto, sua estimativa envolve alta complexidade e incertezas, tanto pela variabilidade dos fatores ambientais quanto pela limitação de dados disponíveis (Fagundes, 2010).

No Brasil, e em especial no município de São Carlos (SP), esse tema é estratégico. A cidade, com cerca de 1.137 km², possui clima Cwa e está inserida em um contexto geológico composto por formações sedimentares da Bacia do Paraná (como Pirambóia, Botucatu, Itaquera) e por basaltos e diabásios da Formação Serra Geral. O relevo e os materiais residuais e retrabalhados, aliados à presença de seis bacias hidrográficas, tornam o entendimento da recarga um aspecto central para o planejamento hídrico regional (Fagundes, 2010).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo hierarquizar as áreas potenciais de recarga no município de São Carlos, com base em fatores geoambientais e nas características dos materiais geológicos, conciliando dados disponíveis com um modelo conceitual.

MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, apresentam-se os materiais e fontes utilizadas para a realização do estudo, organizados por categoria:

Softwares e Ferramentas

QGIS – Software livre para geoprocessamento; SSEBop – Modelo Simplificado Operacional de Balanço de Energia da Superfície; DAEE-SP (Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo); ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico).

Fonte de Dados

Para a definição dos parâmetros, foram consultadas diversas publicações da região de São Carlos (SP) (Zuquette, 1981; Nishiyama, 1991; Leite, 1995; Muro, 2000; Palma, 2004; Zuquette, 2008, 2009; Fagundes, 2010; Lemos, 2010). Essas obras foram essenciais para a definição dos parâmetros utilizados na análise multicritério, fornecendo dados regionais, metodologias e critérios técnicos consolidados.

MÉTODOS

O estudo empregou uma abordagem quantitativa e espacialmente explícita, com o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para integrar e analisar dados geológicos, hidrológicos, climáticos e de uso do solo. O método foi desenvolvido para estimar o potencial de recarga das águas subterrâneas, considerando a interação complexa entre as características das camadas geológicas e o regime hídrico.

Este estudo foi delineado para investigar e hierarquizar as zonas de recarga de águas subterrâneas no municipio de São Carlos, São Paulo, Brasil. Para isso, foi adotada uma escala de trabalho de 1:50.000, e o processo seguiu um fluxograma sequencial (Figura 1), com base em um modelo conceitual (Figura 2).

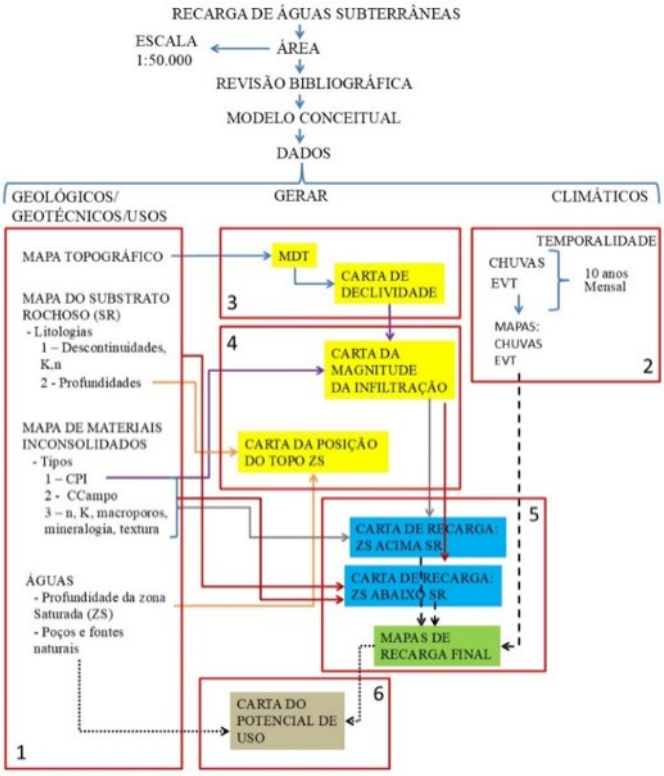


Figura 1. Fluxograma geral do estudo (Elaborado pelos autores).

Modelo Conceitual

O modelo conceitual que fundamenta este estudo (Figura 2) ilustra as complexas inter-relações entre as diferentes camadas geológicas — solo, saprólito, rocha alterada e substrato rochoso — e suas respectivas influências no processo de recarga de água subterrânea. Para isso, o modelo aborda duas condições principais para a variação da zona saturada. Na primeira, quando o topo da zona saturada se localiza abaixo de múltiplas camadas geológicas, a infiltração da água da chuva é influenciada sequencialmente pelas características do solo (como capacidade de infiltração, mineralogia e macroporos), do saprólito e rocha alterada (incluindo capacidade de campo, condutividade hidráulica, porosidade e textura) e, por fim, do substrato rochoso (considerando descontinuidades, litologia, condutividade hidráulica e porosidade). Cada uma dessas camadas exerce um controle significativo sobre a percolação da água. Na segunda condição, quando o topo da zona saturada se localiza acima do substrato rochoso, as características deste último não exercem influência direta na recarga; nesse caso, apenas as propriedades do solo e/ou saprólito são consideradas.

Essa abordagem conceitual é crucial, pois reconhece que a recarga ocorre sob diversas condições regionais, sendo influenciada por um conjunto variável de características das camadas geológicas que se encontram acima da zona saturada.

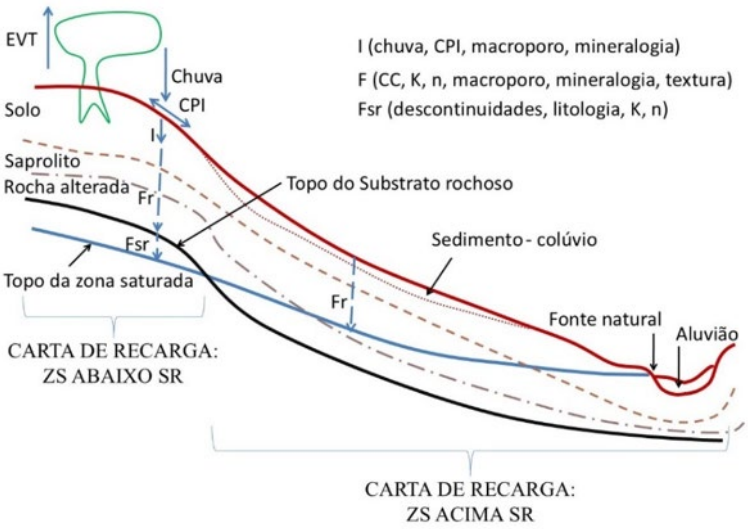


Figura 2. Modelo conceitual adotado no estudo (Elaborado pelos autores).

Atributos Considerados, Classificação e Fontes de Dados

Para a estimativa do potencial de recarga, foram considerados diversos atributos geoambientais e climáticos, organizados em cinco grupos principais: climáticos, materiais inconsolidados, substrato rochoso, geomorfológicos e relacionados à água subterrânea/superficial. A avaliação seguiu uma escala de importância de 1 (extremamente baixa) a 9 (extremamente alta), conforme adaptação de Zuquette (2004).

A obtenção dos dados foi realizada por meio de múltiplas fontes, incluindo bancos de dados oficiais, ensaios de campo e laboratório, além de relações estabelecidas entre os próprios atributos. A seguir, são descritos os principais grupos e suas respectivas fontes:

- Climáticos:

  Precipitação anual: obtida a partir do banco de dados do DAAE-SP.

  Evapotranspiração (EVT): simulada por meio do modelo SSEBop.

- Materiais inconsolidados:

Os atributos como distribuição em área, macroporosidade, taxa de infiltração, condutividade hidráulica, capacidade de campo, espessura e sequência de materiais, porosidade e textura foram obtidos por meio de trabalhos e ensaios em campo e laboratório.

- Substrato rochoso:

Dados referentes à litologia, continuidade, condutividade hidráulica, porosidade e características das descontinuidades (frequência, abertura, continuidade e condição das paredes) também foram obtidos por meio de investigações geotécnicas e ensaios específicos.

- Geomorfológicos:

A declividade do terreno foi determinada a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) com base na topografia.

- Água subterrânea e superficial:

A profundidade do topo da zona saturada foi extraída de cartas hidrogeológicas; já o número de poços de bombeamento e as fontes naturais foi obtido por meio do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA).

Essa abordagem integrada permitiu uma análise multicriterio adaptada às condições regionais, utilizando parâmetros técnica e cientificamente validados.

Etapas da Pesquisa

O estudo seguiu uma sequência de seis etapas principais, conforme o fluxograma geral (Figura 5):

1. Definição da Área e Mapeamentos Prévios: Delimitou-se o município de São Carlos e consultou-se mapas pré-existentes (geológicos, geotécnicos, uso do solo, topografia, cursos d'água, profundidade da zona saturada, poços, fontes naturais e contaminantes). Todos esses dados foram inseridos no QGIS como "shapes".

2. Coleta de Dados Climáticos: Foram reunidos dados históricos mensais de chuva (DAAE-SP e ANA) e evapotranspiração (SSEBop) de um período de 10 anos.

3. Geração de MDT e Declividade: No QGIS, um Modelo Digital de Terreno (MDT) foi criado a partir do mapa topográfico em escala 1:50.000, e a partir dele, a carta de declividade do município.

4. Elaboração de Cartas de Infiltração e Posição da Zona Saturada: A carta de infiltração foi gerada com base na capacidade de

infiltração dos materiais. A carta da posição do topo da zona saturada foi criada usando dados de profundidade da zona saturada e do substrato rochoso.

5. Geração da Carta de Recarga Final: Esta etapa integrou as cartas de infiltração, dados de materiais inconsolidados (capacidade de campo, porosidade, condutividade elétrica, macroporos, mineralogia e textura) e, quando a zona saturada estava abaixo do topo do substrato, as características litológicas (descontinuidades, condutividade elétrica, porosidade) do substrato. Dados de chuva e evapotranspiração também foram incluídos para produzir o mapa de recarga final.

Tratamento e Classificação das Unidades

A classificação das categorias para o potencial de recarga, obtida para cada pixel, foi definida com base na média e no desvio padrão dos valores.

Hierarquização das Unidades

Após a obtenção dos valores para cada pixel, uma reclassificação foi executada, utilizando a média e o desvio padrão para definir as classes. A partir dessa reclassificação e das classes geradas nas cartas de potencial de recarga, as unidades foram categorizadas de acordo com sua potencialidade de recarga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo consistem na apresentação das cartas e mapas gerados que ilustram o potencial de recarga no município de São Carlos, SP. Após a integração e hierarquização dos atributos, os potenciais foram classificados em quatro categorias: baixa, moderada, alta e muito alta, definidas com base em dados estatísticos como a média e o desvio padrão dos conjuntos de dados geoespaciais.

Mapa de Recarga Final

O Mapa de Recarga Final (Figura 3) sintetiza a combinação de todos os atributos relevantes, incluindo dados de chuva, evapotranspiração e as características geológicas do regolito e substrato rochoso. Este mapa representa o potencial integrado de recarga de água subterrânea na área de estudo.

A análise da área ocupada por cada classe neste mapa revelou que a classe “alta” domina o cenário, abrangendo 39% da área total, indicando um potencial considerável para influenciar positivamente a recarga. A classe “muito alta” também se destaca com 19% da área total, apontando para regiões de excepcional potencial de recarga, que são cruciais para a conservação hídrica. Em contraste, as classes “baixa” e “moderada” ocupam parcelas menores, cerca de 25% e 18% respectivamente, sugerindo que áreas com menor capacidade de recarga são menos comuns no município.

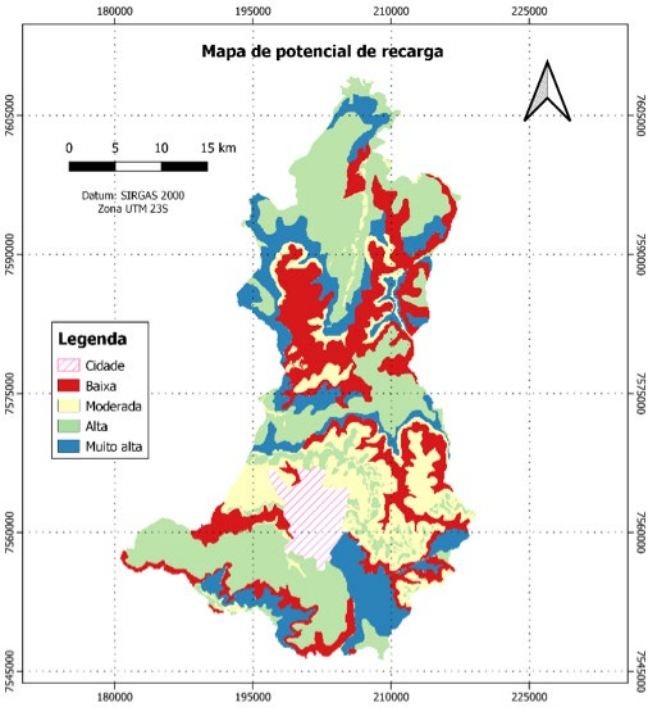


Figura 3. Mapa de potencial de recarga de águas subterrâneas no município de São Carlos (SP) (Elaborado pelos autores).

CONCLUSÃO

O estudo permitiu concluir que a integração de dados geológicos, hidrogeológicos e climáticos, aliada ao uso de ferramentas computacionais como o QGIS, é uma abordagem eficaz para a identificação e hierarquização de áreas de recarga de água subterrânea. A construção do modelo conceitual e o desenvolvimento de mapas temáticos possibilitaram uma compreensão espacial aprofundada do potencial de recarga no município de São Carlos.

Essa metodologia reforça a importância do planejamento territorial orientado por critérios técnicos, evidenciando que a gestão sustentável dos recursos hídricos depende diretamente do conhecimento das características do meio físico. Além disso, os resultados obtidos oferecem subsídios valiosos para a tomada de decisões em políticas públicas, conservação ambiental e uso racional da água subterrânea, especialmente em regiões urbanizadas ou sob pressão antrópica.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o suporte fundamental de algumas instituições e pessoas. Primeiramente, estendo meus mais sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), cujo financiamento foi crucial para a execução e sucesso desta pesquisa.

De forma especial, quero expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Lázaro Valentin Zuquette. Sua dedicação, auxílio constante e, acima de tudo, seus ensinamentos foram um pilar para meu aprendizado e para a concretização deste artigo. Sou grato por cada orientação e por todo o conhecimento que me foi transmitido.

REFERÊNCIAS

Adsorção. (s.f.). *PUC-RIO*. https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14605/14605_5.PDF

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (s.f.). *HidroWeb: Sistema de Informações Hidroweb* [Dados brutos]. https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa

Fagundes, J. R. T. (2010). *Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista a avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP.* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

Leite, J. C. (1995). *Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade à Contaminação e Poluição das Águas Subsuperficiais.* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Car-los. Universidade de São Paulo.

Libardi, P. L. (2005). Dinâmica da Água no Solo. (Vol. 61, pp. 27-41).

Lisboa, R. L. L. (2006). *Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.* [Trabalho de conclusão de curso ou similar não especificado]. https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3852/1/texto%20completo.pdf

Muro, M. D. (2000). *Carta de Zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP.* (Tese ou dissertação não especificada). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Nishiyama, L. (1991). *Mapeamento geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos - SP.* (Dis-sertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

Palma, J. B. (2004). *Avaliação integrada, em diferentes escalas, dos atributos que controlam a dinâmica das águas: aplicação para análise de risco de contaminação das águas subsuperficiais na região entre São Carlos e Ribeirão Preto.* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

QGIS Development Team. (s.f.). *QGIS Geographic Information System* (Versão 3.28) [Software]. https://qgis.org

Recarga subterrânea e Sustentabilidade. (s.f.). *PUC-RIO*. Recuperado de https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14605/14605_5.PDF

U.S. Geological Survey. (s.f.). *SSEBop: Simplified Surface Energy Balance Operational* [Interface de dados]. https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop-br-v101

Zuquette, L. V. (1981). *Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos.* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

Zuquette, L. V., Palma, J. B., & Pejon, O. J. (2006). Initial assessment of the infiltration and Overlandflow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer), State of São Paulo, Brazil. *Environmental Geology,* 50(3), 371-387.

Zuquette, L. V., Silva, E. M. J., & Garcia, A. (2008). Aspectos de Sorção para os Materiais Inconso-lidados da Região de São Carlos (SP). *Revista da Escola de Minas*, 61(2), 219-230.

Zuquette, L. V., Palma, J. B., & Pejon, O. J. (2009). Methodology to assess groundwater pollution conditions (current and pre-disposition) in the São Carlos and Ribeirão Preto regions, Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* 68(1), 117-136.

ACUÍFEROS FREÁTICOS Y ESTRÉS HÍDRICO: EL CASO DE ÁREAS BAJO RIEGO DEL SUDESTE BONAERENSE

Marino M. Puricelli[1]
[1]Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, RN 226 Km. 8, Balcarce, Argentina
Mail de contacto: puricelli.marino@inta.gob.ar

RESUMEN

El área bajo riego complementario ha crecido notablemente en la Región Pampeana argentina desde fines del siglo pasado. En la provincia de Buenos Aires la mayoría del agua para riego complementario y suplementario se extrae de acuíferos freáticos. La producción de cultivos bajo riego se orienta principalmente al maíz y la papa. El período de extracción se extiende, principalmente, entre los meses octubre y marzo. En este tipo de escenarios productivos, comprender la influencia de la variabilidad climática sobre la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo es crítico a la hora de planificar su manejo inteligente. En este sentido, el objetivo del presente trabajo es avanzar en la relación entre la variación del nivel freático y la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial a fin de detectar patrones de correlación entre ambas variables, a lo largo del tiempo.
Se analizó la relación temporal de series de evolución de los niveles freáticos medios mensuales respecto a la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial a escala mensual. En el trabajo se utilizaron mediciones de nivel freático en cuatro explotaciones en funcionamiento del sudeste bonaerense representativas de diferentes posiciones del paisaje, y el registro agroclimático disponible para el período comprendido entre agosto del 2021 y mayo del 2024. Los resultados indican que la influencia del clima sobre la evolución de los niveles freáticos afectados por bombeos se detecta, de forma estadísticamente significativa, tanto a corto como a mediano plazo. Los mismos permiten avanzar en criterios para el uso inteligente del recurso hídrico subterráneo.

Palabras clave: nivel freático, déficit de precipitación, autocorrelación, correlación cruzada.

ABSTRACT

The area under complementary irrigation has grown significantly in the Argentine Pampas Region since the end of the last century. In the province of Buenos Aires, most of the water for supplementary and irrigation is extracted from groundwater aquifers. Irrigated crop production focuses mainly on corn and potatoes. The extraction period extends primarily between october and march. In these production scenarios, understanding the influence of climate variability on groundwater availability is critical for planning its intelligent management. In this regard, the objective of this study is to advance the relationship between water table variation and the difference between precipitation and potential evapotranspiration in order to detect correlation patterns between both variables over time. The temporal relationship of series of evolution of monthly mean water tables with respect to the difference between precipitation and potential evapotranspiration on a monthly scale was analyzed. The study used groundwater level measurements from four operating farms in southeastern Buenos Aires province, representative of different landscape locations, and the available agroclimatic records for the period from August 2020 to May 2024. The results indicate that the influence of climate on the evolution of groundwater levels affected by pumping is detected, with statistical significance, both in the short and medium term. These results allow for progress in criteria for the intelligent use of groundwater resources.

Keywords: water table, precipitation deficit, autocorrelation, cross correlation.

INTRODUCCIÓN

A escala global, los acuíferos son la mayor fuente de agua dulce para uso humano y productivo (Cuthbert et al., 2019), manteniendo además los caudales básicos de la amplia mayoría de los cursos de agua superficial (Xie et al., 2024). Por otra parte, también a escala global se ha confirmado el efecto de la componente antrópica en la generación de estrés en los recursos hídricos subterráneos (Hoff, 2009, Ashraf et al., 2017). En la Región Pampeana Argentina, los recursos hídricos que soportan el consumo humano, industrial y agropecuario, particularmente el riego, son subterráneos. En este escenario, a escala regional, los acuíferos freáticos son más fácilmente explotados, dada su cercanía a la superficie del terreno, lo cual obliga a reconsiderar algunos de las variables que controlan su variación en el tiempo, a fin de asegurar que cumplan los criterios de garantía para su uso en tiempo y forma (Gómez Ramos et al., 2002). La variación temporal de sus niveles está determinada por la dinámica del balance hídrico a escala de cuenca, del cual depende de su recarga, que se define como la proporción de los excesos hídricos generados que alcanzan al acuífero, provocando la variación de sus niveles, en relación a la superficie del terreno (Scanlon et al., 2001). A esta escala, las principales variables que afectan esta dinámica son la precipitación, que constituye la principal entrada de agua y la evapotranspiración que

representa el retorno del agua a la atmósfera.

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar la variabilidad temporal de los niveles acuíferos freáticos en localidades donde son explotados, y su relación con las principales variables climáticas que los afectan, en una región con un fuerte desarrollo del riego de cultivos extensivos y hortícolas, en la Región Pampeana (Barrionuevo et al., 2023). Los resultados permitieron definir patrones de tendencia, ciclicidad y variabilidad espacial del acuífero freático analizado, así como la elasticidad de la influencia del clima sobre la variabilidad de los niveles, a fin de elaborar criterios de garantía para su aprovechamiento inteligente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolla en el sector sudeste de la provincia de Buenos Aires. En esta zona el Comité Hídrico Federal (https://www.cohife.org.ar/) definió dos regiones hidrológicas: Atlántica Oriental y Atlántica Austral (Figura 1).

Se analizaron las series de valores a lo largo del tiempo del déficit de precipitación medio (diferencia ente precipitación y evapotranspiración potencial) una variable indicadora del estado del balance hídrico (Cisneros et al., 2011), en relación a su respuesta en el acuífero freático en los cuatro puntos de explotación seleccionados, durante el período que comprende entre agosto del 2021 y mayo del 2024. La diferencia entre los valores acumulados de precipitación y la estimación de la evapotranspiración potencial total mensual según el modelo de Penman (1948) fue calculada a partir de la información provista por el Servicio Meteorológico Nacional (Tandil Aero y Mar del Plata Aero) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), correspondiente a Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce. Los datos faltantes fueron rellenados utilizando el algoritmo de imputación de valores faltantes desglosados estacionalmente, combinado con un filtro de Kalman, disponible en el paquete “impute TS y perteneciente al software R (R core Team, 2021). Se elaboró también cuatro series completas de niveles freatimétricos medios mensuales a partir de la información proveniente de la Asociación de Riego Pampeano (ARP), originalmente registrada con paso horario. Los valores de nivel freático, expresados en metros bajo boca de pozo (mbbp), corresponden a cuatro puntos de explotación del acuífero freático del sudeste bonaerense: El Portezuelo, Cinco Cerros, La Benjamina y La Esperanza . Los mismos se localizan dentro de las cuencas del Arroyo Malacara, Arroyo Grande, Arroyo Vivoratá y en terrenos localizados entre las cuencas del Río Quequén Grande y el arroyo El Moro, respectivamente (Figura 1). El acuífero en el cual se desarrollan las cuatro explotaciones se compone de sedimentos pampeanos y post pampeanos (Auge, 2022). En el caso de los tres primeros localidades registros analizados se asocian con la cercanía a áreas de recarga, mientras que el restante a un área de descarga del mencionado acuífero (González, 2005).

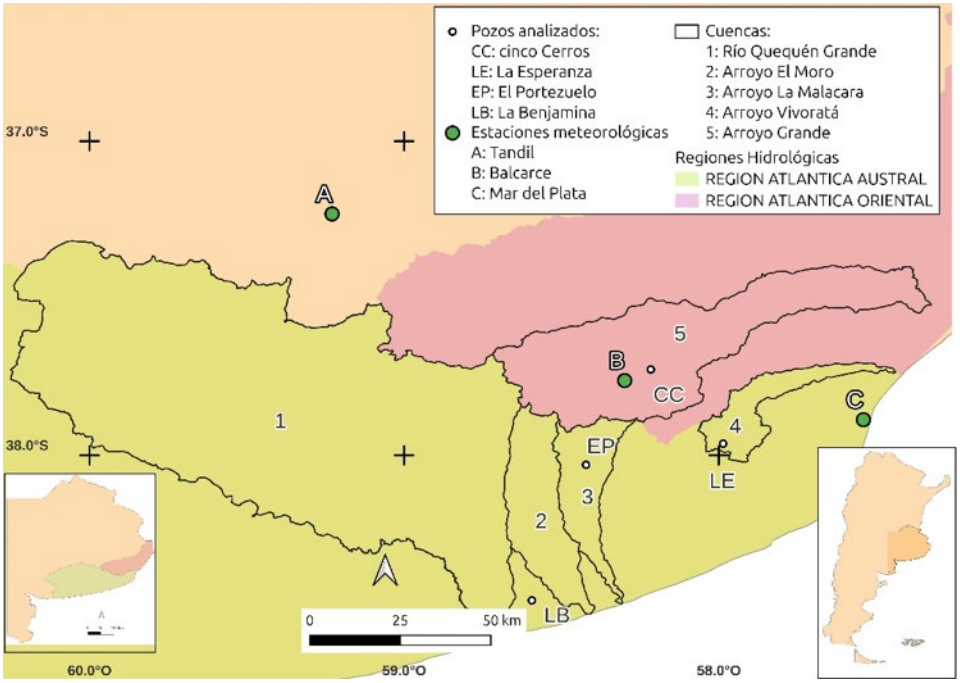


Fig. 1. Localización los pozos analizados

El valor del déficit de precipitación en cada pozo se asignó mediante el criterio de inverso al cuadrado de la distancia (Davis, 2002).

Los registros a lo largo del tiempo (conocidos como series de tiempo) pueden exhibir diferentes patrones en su evolución temporal. En primer lugar, la tendencia es un componente clave que captura cambios a largo plazo a lo largo del tiempo, pudiendo ser

éstas positivas o negativas (Davis, 2002). En el presente trabajo, la existencia tendencia se detectó mediante un análisis de regresión simple con un nivel de confianza del 95%. Además de la tendencia, la relación de dependencia entre valores registrados en diferentes momentos de la serie temporal es de utilidad para comprender cómo se comporta la variable analizada a lo largo del tiempo. En el caso de los niveles freáticos se analizó la autocorrelación entre los valores registrados en diferentes meses, en cada una de las localidades analizadas. La autocorrelación es una medida de dependencia que cuantifica la forma en que las observaciones de una serie temporal se relacionan entre sí. Permite detectar la existencia de una correlación (positiva o negativa) y estadísticamente significativa, entre mediciones de una serie de tiempo que están distanciadas entre sí por diferentes intervalos de tiempo, también conocido como "retardo" o ¨lag" (Davis, 2002). Según este autor, dada una serie temporal de valores Y, la autocorrelación de un valor respecto de otro separada por un lag τ puede definirse como la diferencia entre la covariaza para diferentes lags τ y la varianza de los valores de la serie que se analiza Y (Ec. 1).

$$r_t = \frac{cov_\tau}{varY} \qquad (1)$$

Basado en el supuesto de la normalidad de los valores de autocorrelación, el intervalo de confianza (Inferior y Superior) propuesto por Haan (1977) para un 95% de probabilidad, es la expuesta en la Ec.2) donde n es la longitud de la serie de datos analizada.

$$L_{I,S} = (-1 \pm 1.96\sqrt{n-2)/(n-1)} \qquad (2)$$

Una vez detectada la existencia o no de dependencias de la variable que se analiza a lo largo del tiempo en una determinada serie, es posible comparar entre sí a dos series de tiempo a fin de determinar la fuerza de una relación entre variables diferentes y la diferencia en el tiempo en la cual esta relación (positiva o negativa) es máxima, es decir: la correlación cruzada (Davis, 2002). Así, la autocorrelación entre dos series Y y Z, es el cociente entre la covarianza entre las series, y el producto de los desvíos estándares de cada serie (Ec. 3).

$$r_{Y,Z} = \frac{cov_{Y,Z}}{sYsZ} \qquad (3)$$

En este caso, el intervalo de confianza para un 95% de probabilidad se define individualmente para cada valor de r_(Y,Z) asociado a una distribución "t" según la Ec. 4 (Davis, 2002).

$$t \approx r_{Y,Z} \sqrt{\frac{n-2}{1-(r_{Y,Z}{}^2)}} \qquad (3)$$

Los valores de autocorrelación y correlación cruzada se calcularon utilizando el paquete "STATS", pertenecientes al software R (R core Team, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis a escala mensual permitió filtrar la variación de alta frecuencia, permitiendo conservar las señales de baja frecuencia que permiten conocer la variabilidad freática quitando la alteración impuesta por los bombeos (Davis, 2002) La Tabla 1 muestra los descensos totales registrados entre el inicio y el fin del período analizado, los valores medios de las oscilaciones a escala mensual y la existencia o no de una tendencia estadísticamente significativa (Tasa de crecimiento, en m/año) en la evolución de los niveles freáticos. Si bien los niveles iniciales y finales, así como su variabilidad es característica de cada localidad analizada, las variaciones máximas mensuales son mayores en Cinco Cerros, El Portezuelo y La Benjamina que en el caso de La Esperanza, coincidiendo con su posición en el paisaje. En las dos últimas localidades mencionadas se comprobó la existencia de tendencia temporal en los niveles tanto grafica como estadísticamente.

LOCALIDAD	INICIAL	FINAL	VARIACIÓN MÁXIMA MENSUAL (M/MES)	TASA DE CRECIMIENTO (M/AÑO)
Cinco Cerros	32,45	33,16	0,51	NO
El Portezuelo	5,64	5,9	0,98	NO
La Benjamina	2,27	3,51	0,49	0,35
La Esperanza	18,72	19,09	0,26	0,12

Tabla 1. Variación freática y tendencias en las localidades analizadas

Los valores de autocorrelación de las series freatimétricas analizadas (Figura 2) muestra una clara ciclicidad y "memoria", es decir: los valores pasados ejercen una clara influencia en los actuales (Davis, 2002). Considerando los valores de autocorrelación significativos, que son aquellos que superan los intervalos de confianza, se distinguen dos tipos de comportamientos: los correspondientes a El Portezuelo y La Benjamina, respecto de los restantes. En todas las localidades dos localidades analizadas la "memoria" se expresa en la relación positiva entre niveles freáticos en un mes dado y los observados en los dos meses posteriores, la cual se invierte cuando se los compara con los observados 6 o 7 meses después. En el caso de El Portezuelo y La Benjamina, la memoria se agota a mayores diferencias en el tiempo. Por el contrario, en Cinco Cerros y La Esperanza, los valores de autocorrelación entre valores separados 6 o 7 meses es significativa y mayor en magnitud, y presentan una "memoria" más prolongada, alcanzando los 12 o 13 meses. En estos casos, los valores observados hoy guardan relación directa y positiva con los observados el año anterior en la misma localidad. La diferencia entre los comportamientos observados, coincide con los rangos de profundidad de los niveles freáticos expuestos en la Tabla 1, lo cual sugiere los niveles freáticos en las localidades donde estos se localicen más cercanos a la superficie pueden estar más influidos por las condiciones locales que en aquellos casos donde los niveles son más profundos.

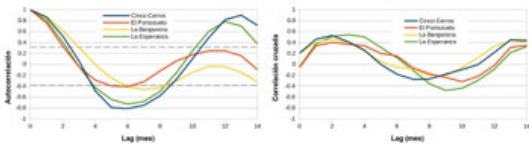


Fig. 2. Izquierda: Autocorrelación de las series de niveles freáticos analizadas. Las líneas discontinuas señalan los intervalos de confianza superior e inferior. Derecha: Correlación cruzada entre de las series de déficit de precipitación y de niveles freáticos analizadas.

La ciclicidad propia de la variación freática expuesta la autocorrelación, se explica por la relación temporal entre el balance hídrico y la variación freática, de la correlación cruzada entre ambos (Figura 2). En éste se observa que, independientemente de la localidad analizada, existe una correlación positiva entre el estado del balance hídrico y los niveles freáticos la cual, mediante el empleo del criterio expuesto en la Ec.3, se detectó a los 2 o 3 y luego a los 13 y 14 meses, respectivamente. Finalmente, la relación observada en la correlación positiva entre los valores freáticos observados tanto en momentos inmediatamente posteriores o a los 13 o 14 meses después guarda relación directa con el estado del balance hídrico en cada momento analizado, y que esta relación es independiente de las condiciones locales del caso analizado. El conocimiento de estas relaciones temporales permite la planificación de la explotación inteligente del recurso hídrico subterráneo, en función del conocimiento de la evolución del balance hídrico tanto al corto como al mediano y largo plazo.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que, independientemente de las condiciones locales, la influencia del clima sobra la evolución de los niveles freáticos afectados por bombeos se detecta, de forma estadísticamente significativa, tanto al corto plazo como al mediano o largo plazo. Los mismos permiten avanzar en criterios para el uso inteligente del recurso hídrico subterráneo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los integrantes y directivos de la Asociación de Riego Pampeano por el aporte de información y el invalorable acompañamiento en el desarrollo de tareas de análisis de la misma.

REFERENCIAS

Ashraf, B., AghaKouchak, A., Alizadeh A., Baygi, M. M., Moftakhari, H., R., Mirchi, A., Anjileli, H., y Madani, K. Quantifying anthropogenic stress on groundwater resources. Scientific Reports 7, 12910. DOI 10.1038/s41598-017-12877-4.

Auge, M. P. (2022). Ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos aires. República Argentina. En: Auge, M. P. y Albouy, R. E., Coords. XI congreso Argentino de Hidrogeología. Actas, pp.: 11-50. Bahía Blanca, Argentina.

Barrionuevo, N., Waldman, C., y Martínez, R. (2023). Análisis espacio temporal del riego por pivote central en la provincia de Buenos Aires en el período 1995-2020. IDIA21, 3, (1): 82-87.

Davis JC. (2002). Statistic and Data Analysis in Geology. John Willey & Sons.

Cisneros J, A., Degioanni, A., Cantero, A. y Videla, H. (2011). Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. 2º Reunión de la red argentina de salinidad. Tucumán. Actas.

Cuthbert, M.O, Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J. y Lehner, B. (2019). Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. Nature Climate Change 9 :137-141. DOI 10.1038/s41558-018-0386-4.

Gómez Ramos, A., Iglesias Martínez, E., y Garrido Colmenero, A. (2002). Evaluación de la garantía de suministro de agua a la agricultura. Una aplicación a la cuenca del Guadalquivir. Ingeniería el Agua, 9 (3): 279-294.

González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires. En: de Barrio, R. R. E., Etcheverry, R. O., Caballé, M. F., y Llambías, E. (Eds.). Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XV Congreso Geológico Argentina, Cap. XXII: 359-374. La Plata, Argentina.

Haan, C. T. (1977). Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State University Press.

Hof, H. (2009). Global water resources and their management. Current Opinion in Environmental Sustainability 2009, 1:141–147. DOI 10.1016/j.cosust.2009.10.001.

Penman HL. (1948). Natural evaporation from open water, bare and grass. Proc. R Soc. Lond. Ser. A 193, 120–145.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: https://www.R-project.org/.

Scanlon, B. R., Healy, R. W., y Cook, P. G. (2001). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal 10:18–39. DOI 10.1007/s10040-0010176-2.

Xie, J., Liu, X., Jasechko, S., Berghuijs, W. R., Wang, K.,Liu, C., Reichstein, M., Jung, M., y Loirala, K. (2024). Majority of global river flow sustained by groundwater. Nature Geoscience 17: 770–777.

AGUA SUBTERRÁNEA EN LA LOCALIDAD DE MÉDANOS, PARTIDO DE VILLARINO, BUENOS AIRES, ARGENTINA: FACTORES HIDROGEOLÓGICOS CONDICIONANTES DE SU EXPLOTACIÓN

Matias Rey[1,2], Andrés G. Ruffo[1,2], Rene Albouy[2, 3]
[1]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Cam. de la Carrindanga Km. 7, B8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
[2]Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, B8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
[3]Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente. San Juan 670, B8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
Mail de contacto: matiasrey@gmail.com

RESUMEN
En regiones áridas y semiáridas, el agua subterránea suele constituir el principal recurso hídrico para consumo humano. En la localidad de Médanos, partido de Villarino, el abastecimiento se realiza mediante captaciones al acuífero freático contenido en un cordón de dunas eólicas. El presente trabajo analiza los factores hidrogeológicos que condicionan su explotación, a partir de censos de puntos de agua, mediciones in situ, análisis hidroquímicos y tomografías de resistividad eléctrica (TRE). Se identificaron limitaciones tanto en la calidad del agua como en el espesor saturado del acuífero, con una marcada variabilidad a lo largo del cordón. Los mayores espesores de interés se localizaron en el flanco SO y sector central del área. En cercanías de La Mascota se reconocieron estructuras asimilables a paleocanales. En cuanto a la calidad química, la mejor aptitud se registró en alrededores de Las Escobas y La Mascota. La presencia de F y As mostró una distribución irregular, posiblemente asociada a la mineralogía de la Formación Chasicó. El análisis conjunto del espesor saturado y calidad del agua permitió identificar áreas con mejores condiciones para una explotación sostenible, aportando información valiosa para la planificación y gestión del recurso hídrico en la región.

Palabras clave: acuífero freático, cadena de dunas, calidad del agua.

ABSTRACT
In arid and semi-arid regions, groundwater is usually the main water resource for human consumption. In the town of Médanos, in the district of Villarino, the water supply is obtained from the phreatic aquifer contained in an eolian dune chain. This work analyzes the hydrogeological factors that condition its exploitation, based on water point censuses, in situ measurements, hydrochemical analysis and electrical resistivity tomography (ERT). Limitations were identified both in water quality and in the saturated thickness of the aquifer, with a marked variability along the ridge. The greatest thicknesses of interest were located in the SW flank and central sector of the area. In the vicinity of La Mascota, structures similar to paleochannels were recognized. As for the chemical quality, the best suitability was recorded in the surroundings of Las Escobas and La Mascota. The presence of F and As showed an irregular distribution, possibly associated with the mineralogy of the Chasicó Formation. The joint analysis of saturated thickness and water quality made it possible to identify areas with better conditions for sustainable exploitation, providing valuable information for the planning and management of water resources in the region.

Keywords: phreatic aquifer, dune chain, groundwater quality.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua dulce es un problema frecuente en las zonas de clima árido y semiárido, donde los cuerpos de agua superficiales son escasos o nulos (Liu et al., 2020) y el agua subterránea suele ser la única fuente de suministro para el uso de la población (Zamani et al., 2022). De esta forma, el recurso hídrico subterráneo desempeña un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico de las poblaciones allí asentadas. La localidad de Médanos se abastece a partir de captaciones que explotan un acuífero freático de espesor reducido, contenido en una cadena de dunas eólicas. Sus aguas presentan generalmente buena calidad química, si bien influyen en gran medida la ubicación de la captación y su profundidad, siendo frecuente la presencia de iones indeseables como el arsénico y el fluoruro, habituales en toda la zona, tanto en aguas superficiales como subterráneas (Puntoriero et al., 2014).

Atendiendo a esto, se llevó a cabo la recopilación de información previa y la realización de censos hidrogeológicos, mediciones hidroquímicas in situ, análisis fisicoquímicos y tomografías de resistividad eléctrica (TREs). De esta manera, el objetivo del presente trabajo es determinar las condiciones hidrogeológicas en el área que condicionan el abastecimiento de agua subterránea para la localidad de Médanos, identificando los diferentes factores que limitan la calidad y cantidad del recurso disponible.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el sector norte del partido de Villarino, en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, incluyendo a las localidades de Médanos, La Mascota y Argerich (Figura 1). Regionalmente, forma parte de la llanura bonaerense, comprendiendo una cadena de médanos continentales de suave pendiente que se extienden unos 50 km en dirección noroeste-sudeste, desde la laguna Chasicó y el arroyo homónimo al noroeste, hasta el estuario de Bahía Blanca, al sudeste. Al noreste limita con el Salitral de la Vidriera, mientras que al sudoeste bordea parcialmente la depresión de las Salinas Chicas, que alcanza una cota mínima de 42 metros bajo el nivel del mar.

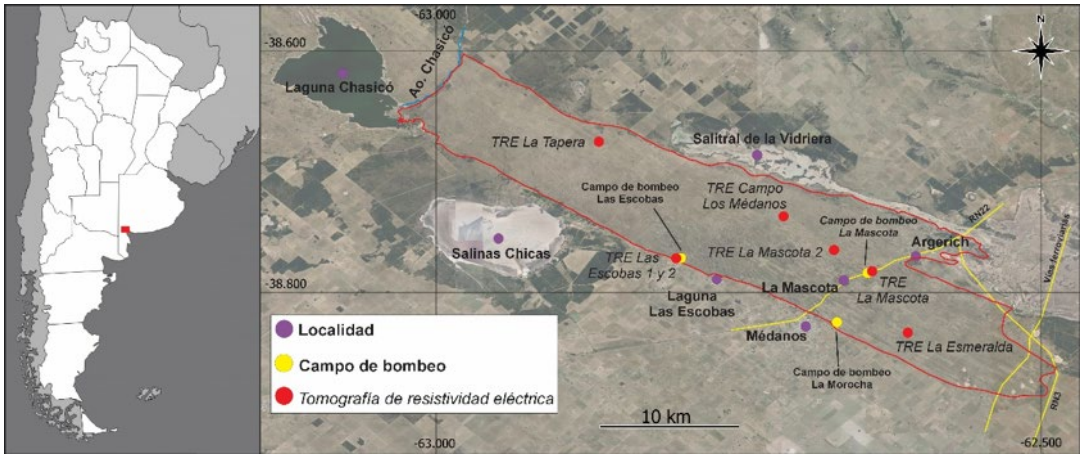


Figura 1. Ubicación del área de estudio (línea roja) y estudios geoeléctricos llevados a cabo.

Según los índices climáticos de Thornthwaite, el clima de la zona es C1 B'2 d a', es decir, subhúmedo, templado fresco mesotérmico, con nulo o escaso exceso de agua y un rendimiento térmico inferior al 48%, lindando con el sector semiárido. La precipitación media anual es de 546,8 mm (serie 1972-2005) para la localidad de Médanos, con mínimos en julio (20,8 mm) y máximos en marzo (78,2 mm). La temperatura media anual es de 14,2 °C, con medias extremas, en enero y julio, de 22,5 °C y 7 °C, respectivamente.

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

De manera simplificada, la secuencia estratigráfica del área inicia con limos arcillosos continentales de la Formación Chasicó (Pascual, 1961), sobre los que se apoyan areniscas fluviales de la Formación Río Negro (Andreis, 1965), ambas de edad pliocena. Estas unidades son cubiertas en discordancia por los «Rodados Patagónicos» (Fidalgo, 1999), y finalmente por arenas eólicas holocenas de la Formación Médanos (Bonorino, 1974) (una de las varias denominaciones para estos depósitos). Estas arenas están compuestas por cuarzo, plagioclasa, microclino, piroxeno, epidoto y magnetita titanífera, y conforman el cordón de dunas del área de estudio.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el área pertenece a la Cuenca de Bahía Blanca (Auge, 2004). Bonorino (1974, 1979) y Lexow y Bonorino (2012) determinaron el esquema hidroestratigráfico del sector, identificando cuatro unidades: (1) las arenas eólicas de la Formación Médanos, con un espesor saturado promedio de 3 m, buena permeabilidad y aguas de baja mineralización; (2) los Rodados Patagónicos, que permiten la infiltración pero no forman acuíferos; (3) la Formación Río Negro, con espesores saturados de 4 a 9 m, buena porosidad y aguas de mineralización media a alta; y (4) la Formación Chasicó, de baja permeabilidad, con aguas mineralizadas y acuíferos confinados entre 50 y 200 m. El acuífero freático en las arenas eólicas presenta conductividades eléctricas (CE) entre 400 y 1.000 µS/cm y alta capacidad de recarga (alrededor del 30% de la precipitación media anual). El flujo subterráneo sigue a grandes rasgos la pendiente del terreno (Rey et al., 2023). Este acuífero se encuentra hidráulicamente conectado con el de las unidades inferiores, que presentan CE mayores a 3000 µS/cm y elementos traza no deseados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se comenzó con la recopilación de información antecedente. Posteriormente se realizaron campañas de campo con mediciones en 40 puntos de agua. Se midieron pH, CE y temperatura in situ con una sonda LUTRON WA-2015, y se tomaron 17 muestras para análisis químicos (iones mayoritarios, F^- y As). Las determinaciones aniónicas se realizaron mediante metodologías estándar, mientras que para los cationes se realizaron por ICP-OES (Shimadzu Simultaneous 9000) según la norma EPA 200.7. A partir de estos datos se elaboraron mapas de concentración. Además, se ejecutaron siete tomografías de resistividad eléctrica (TRE) con un resistivímetro ARES (GF Instruments), empleando arreglo Wenner Alpha con 48 electrodos separados entre 3 y 5 m, alcanzando así profundidades de entre 25 y 45 m. La inversión de los datos se realizó con el software Res2DInv (Loke, 2004). Para poder darle sentido geológico e hidrogeológico a dichas imágenes, dos de las TRE se realizaron en el sector de Las Escobas, donde se parametrizó el método mediante recortes de perforación y mediciones del nivel freático y CE.

La integración de toda esta información permitió determinar las características principales del acuífero, identificando los sectores más adecuados para ubicar las captaciones que abastecen de agua a la localidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el análisis de las imágenes de resistividad obtenidas a partir de las TRE llevadas a cabo (Figura 2) se determinaron los espesores saturados de interés. De acuerdo a la parametrización realizada, valores de resistividad entre los 25 y 100 Ω.m corresponden a arenas con aguas de bajo tenor salino (alrededor de los 500 a 600 µS/cm). De la integración de los datos se determinó que el espesor saturado con agua dulce del acuífero freático es variable, presentando un promedio de aproximadamente 4 m y sectores anómalos cuyo espesor aumenta sensiblemente.

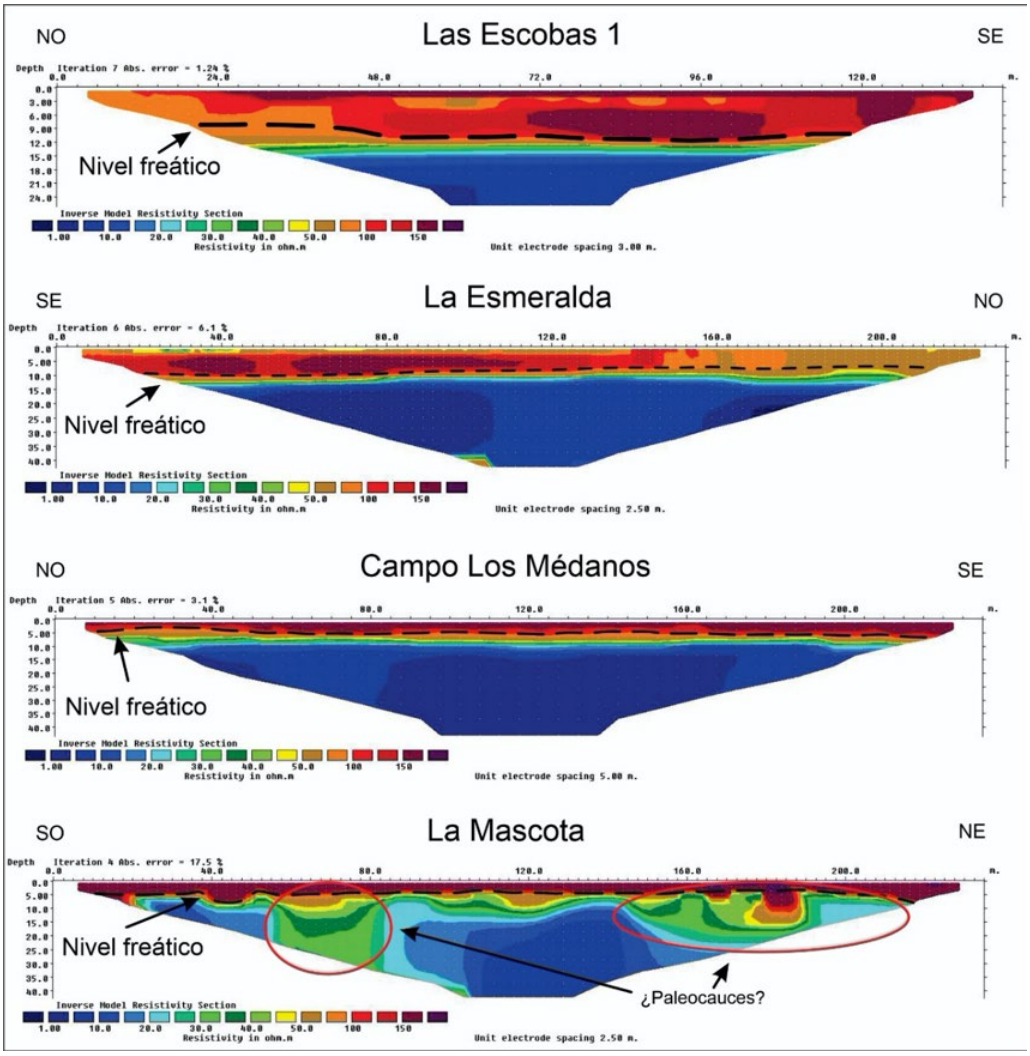


Figura 2. Imágenes de resistividad obtenidas (las restantes no fueron representadas por ser muy similares a las aquí mostradas). En la IRE La Mascota se destacan estructuras asimilables a paleocauces.

El sector de La Mascota mostró estructuras de interés hidrogeológico, con espesores saturados que, si bien promedian 5 m, superan los 30 m en zonas puntuales, posiblemente asociadas a paleocanales rellenos por arenas eólicas. Pozos cercanos a la TRE presentan CE de 600 µS/cm, lo que sugiere buena calidad de agua en estas estructuras, similares a las documentadas por Ruffo et al. (2022) en cuerpos medanosos costeros.

Con base en los análisis químicos, se elaboraron mapas de concentración iónica (Figura 3) para identificar zonas de mejor calidad del acuífero freático. La CE promedio fue de 1.890 µS/cm (máximos de 9.090 y mínimos de 385 µS/cm), con los menores valores en el SE, NO y centro del cordón de dunas (~1.000 µS/cm) y los mayores en el NE y SO (~3.000 µS/cm). Un comportamiento similar se observó para el Cl-. Tenores elevados de As y F- fueron reconocidos en la llanura que rodea la cadena de dunas y en muestras en las que la captación penetraba al menos parcialmente en la capa pelítica subyacente a las arenas, atribuidas a la meteorización de material volcánico. En el cordón dunas, generalmente ambos elementos presentaron bajos valores y distribución irregular.

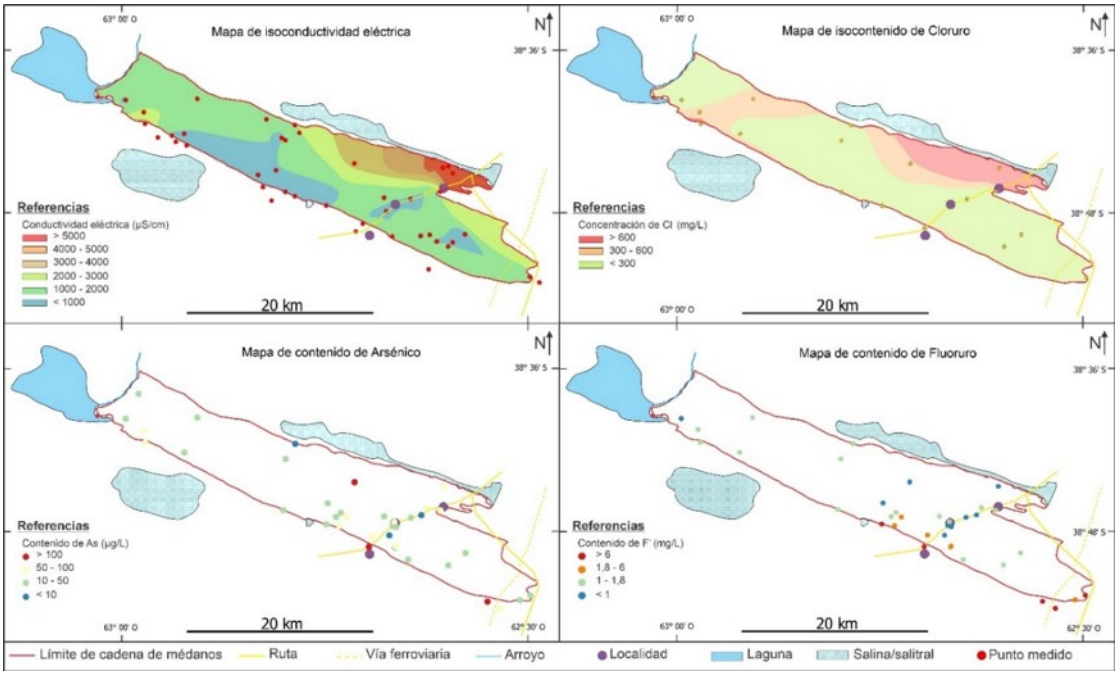


Figura 3. Mapas elaborados. En el F- y el As se plotearon además las muestras antecedentes de Lexow y Bonorino (2012) para representar de manera más clara la distribución irregular de los datos.

En las muestras analizadas, el As tiene un valor medio de 48,8 µg/L, (con máximos de 216 y mínimos de 10 µg/L), mientras que el F- presenta un valor medio de 2,5 mg/L (con máximos de 9,9 y mínimos de 1 mg/L). Estas condiciones coinciden con las descriptas por Galliari (2022) e Isla et al. (2024) en zonas similares al área de estudio.

CONCLUSIONES

La zona de estudio presenta una variabilidad significativa en espesor saturado y calidad del agua subterránea, que condicionan el rendimiento y la aptitud química de las captaciones según ubicación y profundidad. En cuanto al espesor saturado, las zonas más favorables se localizan en el flanco SO y centro del cordón de dunas, especialmente cerca de La Mascota, donde se identificaron estructuras asimilables a paleocanales. Las mejores condiciones químicas se reconocieron en las zonas de Las Escobas y La Mascota. La química del agua subterránea en el acuífero freático está fuertemente vinculada a su posición dentro de la cadena de dunas, con un aumento progresivo de la mineralización y la salinidad desde las zonas de recarga a las de descarga. Tanto el F como el As, presentaron una distribución irregular, con su presencia en el agua subterránea posiblemente relacionada con la mineralogía de la Fm. Chasicó.

REFERENCIAS

Andreis, R. (1965). Petrografía y Paleocorrientes de la Formación Río Negro. *Revista del Museo de La Plata*, *V* (36): 245-310. La Plata.

Auge, M. (2004). *Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe.* UBA. 104 pp.

Recuperado de: http://www.gl.fcen.uba.ar.

Bonorino, A. G. (1974). *Contribución al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona de Médanos, partido de Villarino (Provincia de Buenos Aires)*. Informe CIC (inédito). La Plata.

Bonorino, A. G. (1979). Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. *VI congreso Geológico Argentino (Bahía Blanca)*. Actas 443-465.

Fidalgo, F. (1999). El Cuaternario de la provincia de Buenos Aires. En Caminos, R. (Ed): *Geología Argentina*, Anales 29: 700- 703, SEGEMAR, Buenos Aires.

Galliari, M. J. (2022). *Procesos condicionantes de la calidad del agua subterránea en las zonas de borde continental del acuífero costero medanoso: aplicaciones al abastecimiento de agua en poblaciones rurales y al sustento de áreas naturales.* Tesis doctoral inédita. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, La Plata, Argentina.

Isla, F. I., Sánchez Caro, L., Carretero, S. y Rodrígues Capítulo, L. (2024). Hidrogeología de las barreras medanosas de la provincia de Buenos Aires: vulnerabilidad al aumento del nivel del mar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, 81*(2): 208-224.

Lexow, C. y Bonorino, A. G. (2012). *Estudio hidrogeológico de Médanos.* Informe FUNS (inédito).

Liu, J., Gao, M., Jin, D., Wang, T. y Yang, J. (2020). Assessment of Groundwater Quality and Human Health Risk in the Aeolian-Sand Area of Yulin City, Northwest China. *Expo Health* 12, 671–680. https://doi.org/10.1007/s12403-019-00326-8

Loke, M. H. (2004). *Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.* 128 pp. Geotomo Software.

Pascual, R. (1961). Un Nuevo Cardiomyinae (Rodentia, Caviidae) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Ameghiniana* 2(4): 57-71.

Puntoriero, M. L., Fernández Cirelli, A. y Volpedo, A. V. (2014). Geochemical mechanisms controlling the chemical composition of groundwater and surface water in the southwest of the Pampean plain (Argentina), *Journal of Geochemical Exploration*, 150, 64–72. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.011

Rey, M., Ruffo, A. G., Albouy, E. R. y Giorgi, J.M. (2023). Hidrodinámica del acuífero freático del cordón de dunas septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente, (50)*, e009. ISSN: 2422-5703. Buenos Aires. http://doi.org/10.59069/24225703ee009

Ruffo, A. G., Rey, M., Albouy, E. R., Giorgi, J. M., Carrica, L.B. y Bastianelli, N.V. (2022). Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la prospección de agua subterránea en un sector costero del sudoeste bonaerense, Argentina. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente, 49*: 29-35. ISSN: 2422-5703.

Zamani, M. G., Moridi, A. y Yazdi, J. (2022). Groundwater management in arid and semi-arid regions. *Arabian Journal of Geosciences, 15*(4), 362.

MECÁNICA DE ROCAS

DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE SUELOS

Gonzalo M. Aiassa[1], Pedro A. Arrúa[1], Marcelo G. Eberhardt[1]
[1]Departamento de Ingeniería Civil, CIGEF (Centro de Investigación en Geotecnia, Estructuras y Fundaciones), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: gaiassa@frc.utn.edu.ar

RESUMEN
Este artículo presenta una revisión del estado del arte de los sistemas de contención de suelos, enfocándose en muros de gravedad y en voladizo, analizando sus principios de diseño, ventajas y limitaciones. Posteriormente, se desarrolla una herramienta computacional en hoja de cálculo para el diseño de muros en voladizo, considerando cargas permanentes, sobrecargas y acciones sísmicas. La metodología incluye la definición de hipótesis de carga, verificación de estabilidad (vuelco, deslizamiento y capacidad portante) y el dimensionamiento estructural. La herramienta automatiza cálculos iterativos, optimizando el proceso de diseño y facilitando la determinación de factores de seguridad. Se presentan casos de estudio que validan la herramienta. Los resultados demuestran que el instrumento desarrollado mejora la eficiencia en el diseño, minimiza tiempo de cálculo y facilita la revisión de procesos y resultados. Además, se discuten recomendaciones prácticas para la selección de sistemas de contención según condiciones geotécnicas y cargas actuantes. El trabajo contribuye a la ingeniería geotécnica al integrar criterios de diseño en una herramienta accesible, facilitando su aplicación en proyectos de ingeniería.

Palabras claves: muros de contención, diseño geotécnico, hoja de cálculo, acciones sísmicas.

ABSTRACT
This paper presents a state-of-the-art review of soil retaining systems, focusing on gravity and cantilever walls, analyzing their design principles, advantages, and limitations. Subsequently, a computational spreadsheet tool is developed for the design of cantilever walls, considering permanent loads, surcharges, and seismic actions. The methodology includes the definition of load cases, stability analysis (overturning, sliding, and bearing capacity), and structural design. The tool automates iterative calculations, optimizing the design process and facilitating the determination of safety factors. Case studies are presented to validate the tool. The results demonstrate that the developed instrument improves design efficiency, minimizes calculation time, and simplifies the review of processes and results. Furthermore, practical recommendations for selecting retaining systems based on geotechnical conditions and acting loads are discussed. This work contributes to geotechnical engineering by integrating design criteria into an accessible tool, facilitating its application in practical engineering projects.

Keywords: retaining walls, geotechnical design, spreadsheet, seismic loads

INTRODUCCIÓN

La interacción entre el desarrollo de infraestructura y el entorno geológico es un desafío para la ingeniería geotécnica. La urbanización en terrenos topográficamente complejos y las redes de transporte que atraviesan paisajes montañosos son ejemplos en los que la necesidad de estabilizar taludes y modificar el relieve del terreno se vuelven imprescindibles. En este contexto, los muros de sostenimiento de suelos son estructuras geotécnicas esenciales, diseñadas para contener masas de suelo y proporcionar una transición abrupta en la elevación del terreno de manera segura (Fig. 1).

Son estructuras destinadas a contener el deslizamiento de suelos que, de alguna manera, podemos decir que materializan un talud vertical estable. En el análisis de estabilidad de un talud, el objetivo del diseño consiste en establecer el ángulo o la pendiente para la cual el suelo permanece estable. Ahora, para esto, es necesario disponer del espacio suficiente para el desarrollo longitudinal de este talud. Al construir un muro de sostenimiento, estamos reemplazando esa “naturaleza” de estabilidad de talud que el suelo logra con una determinada pendiente, por una estructura de soporte a la que se le establece una pendiente vertical. El suelo contenido genera una cuña de suelo que “desliza” y provoca el empuje lateral de suelo sobre el muro. Junto con éste empuje lateral, ocurre una interacción friccional suelo-muro que deviene en cargas verticales transmitidas a la base. La aplicación de este tipo de estructura abarca desde la construcción de subsuelos y estribos de puentes hasta la estabilización de taludes para carreteras, ferrocarriles y desarrollos residenciales.

Los tipos de muros de sostenimientos más comunes son los denominados “de gravedad”, en configuración rígida y en voladizo o ménsula (Fig. 2). La diferencia está en la configuración estructural y estrategia de estabilización del sistema.

La Fig. 2a muestra un típico muro rígido que estabiliza por el peso propio de la estructura de hormigón. En el caso del muro voladizo, Fig. 2b, la estabilidad se logra de manera combinada entre el peso propio de la estructura de hormigón armado y el peso

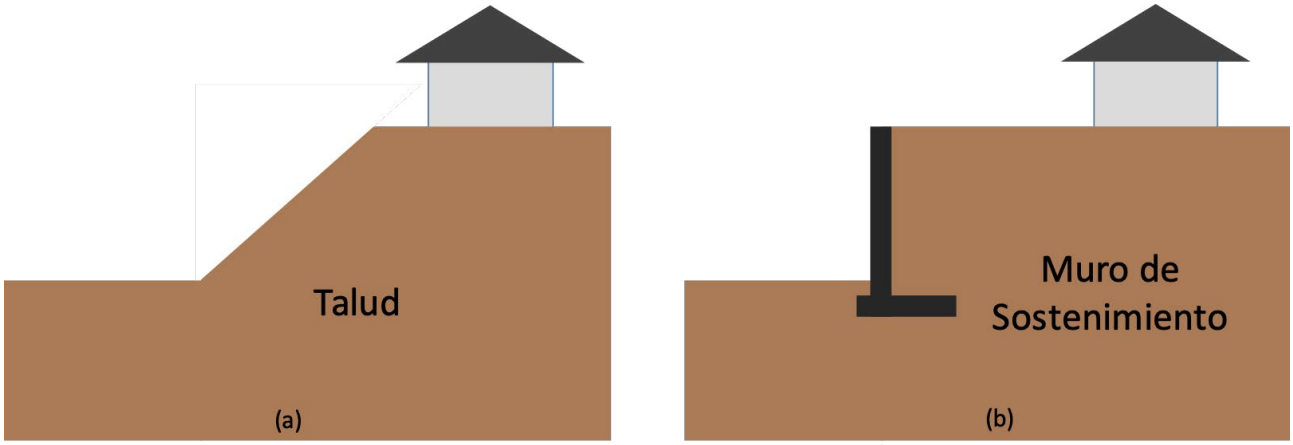


Fig. 1. Transición en la elevación del terreno mediante (a) Talud con pendiente estable y (b) Muro de Sostenimiento.

del suelo involucrado en la base del muro. Los muros voladizos están solicitados a esfuerzos de corte y flexión, por lo que debe calcularse, verificarse y disponerse la armadura necesaria. En la bibliografía se presentan criterios orientativos para el predimensionado de la geometría, en función de la altura total del voladizo o diferencia en la elevación del terreno (h), que deben confirmarse en las verificaciones de estabilidad correspondientes (Das, 2001). Los muros voladizos pueden incorporar contrafuertes con el objetivo de incrementar la rigidez del sistema estructural y reducir las solicitaciones en las piezas de hormigón.

El diseño de un muro de gravedad comprende la verificación de tres condiciones básicas de estabilidad: (i) vuelco, (ii) deslizamiento, (iii) presión máxima inducida en el suelo. Internamente, los componentes estructurales del muro voladizo (pantalla, zapata, talón) deben ser dimensionados para resistir los momentos flectores y las fuerzas cortantes generadas por los empujes del terreno y otras cargas actuantes. Las acciones típicas a considerar incluyen: empuje estático del suelo, empuje de agua, empuje originado por sobrecargas en superficies, cargas aplicadas y acciones sísmicas.

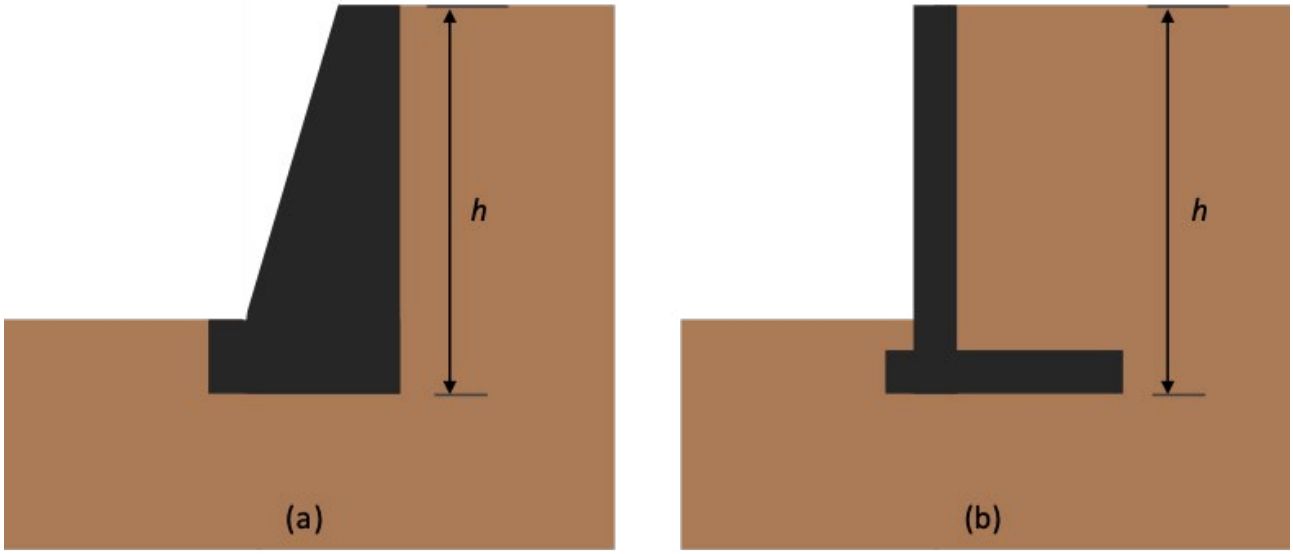


Fig. 2. Tipos de Muros de Gravedad (a) Rígido, (b) Voladizo o Ménsula.

Tradicionalmente, el proceso de diseño de un muro de sostenimiento ha sido un ejercicio manual e iterativo. En proceso puede resumirse así: se propone una geometría inicial, se calculan las fuerzas actuantes, se verifican los factores de seguridad para cada modo de falla y se dimensionan los componentes estructurales. Si alguna de las verificaciones no se cumple, la geometría debe ser modificada y el proceso se repite hasta alcanzar una solución óptima y segura. Este procedimiento, aunque didáctico, es extremadamente lento y poco práctico. Actualmente, existen en el mercado numerosos paquetes de software comercial que automatizan estos cálculos. Estas herramientas son potentes y permiten análisis sofisticados, que pueden incluir modelos constitutivos de suelo complejos y análisis dinámicos. Sin embargo, en general, presentan dos desventajas significativas: su alto costo y su naturaleza de "caja negra" (black box). El usuario introduce los datos y obtiene resultados, pero los cálculos intermedios y las hipótesis subyacentes pueden no ser completamente transparentes, lo que dificulta la verificación y la comprensión profunda del proceso por parte del diseñador. Esta opacidad puede ser un obstáculo para procesos de formación en ámbitos educativos y para la revisión por pares de propuestas de diseños.

Entre el cálculo manual y el software comercial especializado, existe un espacio para herramientas computacionales que sean a la

vez accesibles, transparentes y eficientes. Las hojas de cálculo (spreadsheet), representan una plataforma ideal para este propósito. Son herramientas de bajo costo y altamente personalizables. Permiten programar directamente las ecuaciones de diseño basadas en los códigos de referencia, visualizar cada paso del cálculo y realizar análisis de sensibilidad de manera rápida y sencilla. Numerosos autores han destacado el valor de las hojas de cálculo como herramientas para la enseñanza y la práctica de la ingeniería geotécnica (Christy, 2006; Ozcep, 2010; Airey, et al., 2012; Farook, et al., 2019; Alqarawi, et al., 2021). La hoja de cálculo es una alternativa que combina la potencia computacional con la claridad conceptual.

Este artículo presenta el desarrollo de una herramienta computacional integral basada en una hoja de cálculo para el diseño de muros de sostenimiento de hormigón armado. El objetivo principal de este trabajo es crear un instrumento que integre las virtudes de métodos manuales y software cerrado, proporcionando una solución robusta, transparente y eficiente para el diseño. La herramienta desarrollada automatiza el diseño y verificación final de estructuras de contención tipo muros de gravedad. El instrumento se orienta tanto para ambientes educativos, en la formación de ingenieros civiles (Pimienta Prieto, 2012), como para el diseño aplicado. Se describen las bases teóricas implementadas y los flujos de cálculo. Finalmente, se discuten las ventajas, limitaciones y posibles extensiones futuras del instrumento desarrollado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema conceptual de muro de sostenimiento implementado en hoja de cálculo se presenta en la Fig. 3. Se detallan variables geométricas, estratos de suelo, agua subterránea y tipos de cargas aplicadas en superficie. Las ecuaciones para determinar coeficientes y esquemas de empuje pueden consultarse en bibliografía de referencia (Das, 2001; Coduto, 2001; Budhu, 2008; CIRSOC 804-3, 2020; INPRES-CIRSOC 103-VI, 2020). En esta hoja de cálculo, para determinar empujes estáticos se adopta el método de Rankine y para empujes originados por acciones sísmicas se adopta el método de Mononobe-Okabe. Para la acción sísmica se especifica el coeficiente de aceleración sísmica horizontal (kh) y se determinan los efectos combinados, no concurrentes, de presión dinámica lateral del terreno y fuerza de inercia horizontal debida al sismo sobre la masa del muro.

En el proceso de diseño se implementan verificaciones de estabilidad frente al vuelco, el deslizamiento y la capacidad portante. Finalmente, se implementa el dimensionamiento estructural conforme a los principios del diseño de hormigón armado.

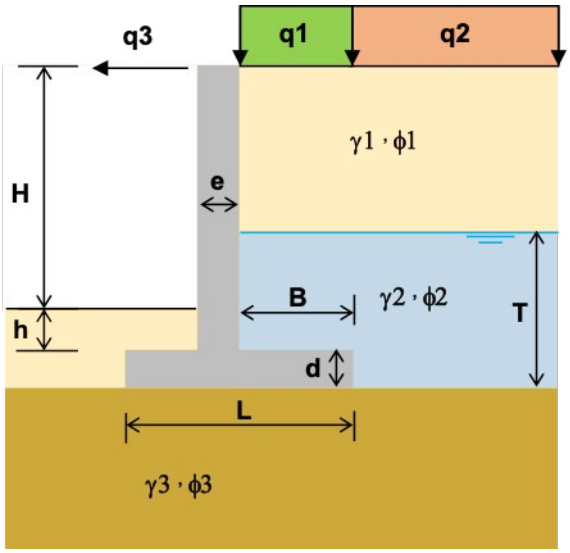


Fig. 3. Esquema Conceptual de Muros de Sostenimiento y variables definidas en hoja de cálculo.

El tablero principal se presenta en la hoja 1, e incluye: datos de entrada y resumen de verificaciones de estabilidad:

$$FS_v = \frac{\sum M_e}{\sum M_v} \qquad (1)$$

donde FS_v es el Factor de Seguridad al Vuelco, $\sum M_e$ es la sumatoria de momentos estabilizantes generado por fuerzas que resisten el vuelco (ej. peso propio), $\sum M_e$ es la sumatoria de momento de vuelco generado por fuerzas que desestabilizan el muro (ej. empuje de suelo).

$$FS_d = \frac{\sum F_e}{\sum F_d} \qquad (2)$$

donde FS_d es el Factor de Seguridad al Deslizamiento, $\sum F_e$ es la sumatoria de fuerzas estabilizantes, $\sum F_d$ es la sumatoria de fuerzas de empuje.

$$FS_\sigma = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{max}} \qquad (3)$$

donde *FS*σ es el Factor de Seguridad por Presión de Trabajo del Suelo, σ_{adm} es la presión de trabajo admisible, σ_{max} es la presión máxima inducida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta un caso de aplicación. La Fig. 4 resume los datos de entrada adoptados y un esquema a escala de la geometría predimensionada. Los resultados obtenidos se resumen en la Fig. 5. Se detallan los cálculos parciales intermedios y los resultados del análisis de estabilidad en términos de factores de seguridad al vuelco, deslizamiento y presión inducida sobre el suelo de cimentación.

La hoja de cálculo permite realizar variación de parámetros geométricos, del suelo, cargas y acciones sísmicas y analizar los efectos sobre las cuentas parciales y el resultado final de factor de seguridad. La herramienta brinda la posibilidad de optimizar el diseño de muros en forma práctica y sencilla, pero con absoluto control del proceso y secuencia de cálculos.

CONCLUSIONES

El desarrollo de herramientas computacionales, basadas en hojas de cálculo, para el diseño de muros de sostenimiento proporciona instrumentos que integren las virtudes de métodos manuales y software cerrado. El desarrollo presentado en este trabajo proporciona una solución robusta, transparente, eficiente y permite analizar alternativas de diseño con variación de los diferentes parámetros de entrada. Este tipo de instrumento presenta aplicaciones en ambientes educativos, como estrategia de enseñanza-aprendizaje que contribuye a enriquecer la formación en competencias sobre diseño, proyecto y construcción de estudiantes universitarios de ingeniería civil, y en ambientes de consultoría especializada para el análisis de alternativas optimizadas.

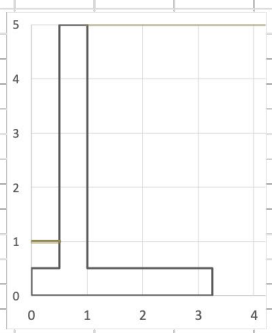
Cómo línea de trabajo futuro, se propone mejorar esta herramienta con la posibilidad de complejizar geometrías e inclusión de otros métodos para la determinación de empujes (ej. Coulomb).

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. En particular, los autores agradecen a integrantes del Centro CIGEF y al Departamento de Ingeniería Civil que colaboraron con este trabajo.

Datos

Datos de Suelo				Sobrecargas					
Suelo No Saturado			Coef. Empujes Estáticos y Sísmico	q1=	0,00	t/m2	q3=	0,00	t/m
γ1=	1,80	t/m3	Ka= 0,333						
ϕ1=	30	°	Kp= 3,000	q2=	0,50	t/m2			
			Kae= 0,397						
Suelo Saturado			Coef. Empujes Estáticos y Sísmico	Geometría del Muro					
γ2=	1,80	t/m3	Ka= 0,333						
ϕ2=	30	°	Kp= 3,000	H=	4,00	m			
			Kae= 0,397	h=	0,50	m			
				L=	3,25	m			
Suelo de Cimentación				B=	2,25	m			
γ3=	1,90	t/m3		e=	0,50	m			
ϕ3=	35	°	Kp= 3,690	d=	0,50	m			
σadm=	30	t/m2							
				γh=	2,50	t/m3			
Zona Sísmica									
		kh=	0,10						
		kv=	0,00						
Nivel freático									
T=	0,00	m							
γω=	1,00	t/m3							



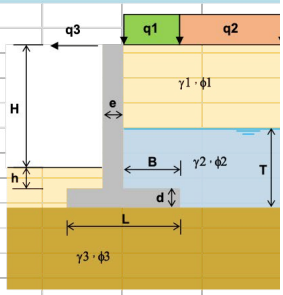


Fig. 4. Datos de entrada y esquema a escala del muro de sostenimiento.

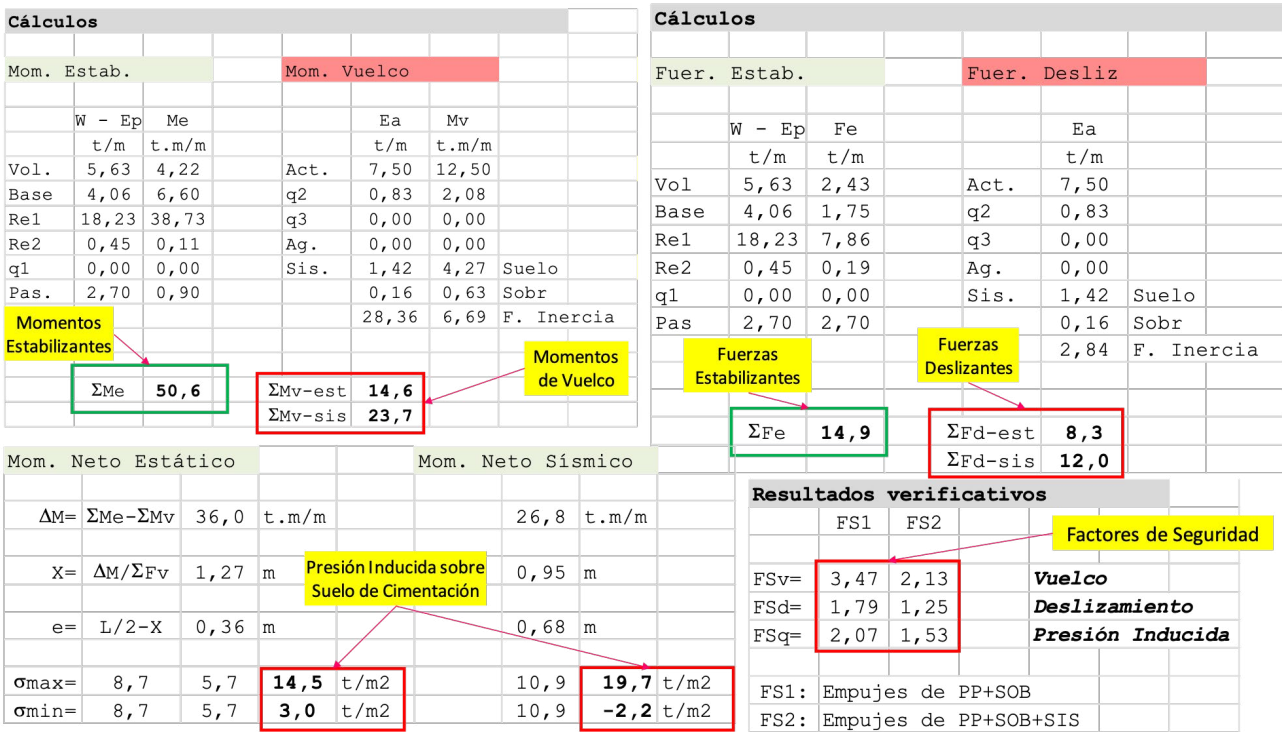


Fig. 5. Resultados del análisis de estabilidad.

REFERENCIAS

Airey, D.W., Balaam, N., Cafe, P. y El-Zein, A. (2012). Integrating a major Excel exercise in an introductory soil mechanics course. Edited By McCabe, Pantazidou, Phillips. Taylor & Francis Group. *Shaking the Foundations of Geo-engineering Education (London).*

Alqarawi, A.S., Leo, C.J., Liyanapathirana, D.S., Sigdel, L., Lu, M. y Hu, P. (2021). A spreadsheet-based technique to calculate the passive soil pressure based on the log-spiral method. *Computers and Geotechnics,* 130, 103926. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103926

Budhu, M. (2008). *Foundations and Earth Retaining Structures.* Wiley.

Christy, C.T. (2006). *Engineering with the spreadsheet.* American Society of Civil Engineers.

CIRSOC 804-3 (2020). Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros. Muros, Estribos y Pilas. INTI.

Coduto, D.P. (2001). *Foundation Design*. Second Edition. Prentice Hall.

Das, B.M. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones.* Thomson.

Farook, Z., Matthews, C., Skinner, M. y Brown, M. (2019). Automation in geotechnical design – application and case studies. *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Reykjavík, Iceland).*

INPRES-CIRSOC 103 (2020). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte VI. Puentes de Hormigón Armado. INTI.

Ozcep, F. (2010). SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© program for geotechnical and geophysical analysis of soils. Computers & Geosciences, 36(10), 1355-1361. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.015

Pimienta Prieto, J.H. (2012). *Estrategias de enseñanza-aprendizaje. Docencia universitaria basada en competencias.* Pearson.

INNOVACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN: CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS GRUESOS Y FINOS EN CÓRDOBA

María P. Cruz [1,2], Italo F. Martin-Schmädke[1,2], Darío Mindel[1,2], Ignacio Feryala[1] y Benjamín Eguia[1]
[1]Universidad Católica de Córdoba, Armada Argentina 3555, Córdoba, Argentina
[2]Facultad de Ingeniería.
Mail de contacto: 9606773@ucc.edu.ar

RESUMEN
El estudio caracteriza geo-estructuralmente áridos reciclados finos (0 a 6mm) y gruesos (6 a 19mm), obtenidos de la trituración de residuos de la construcción y demolición; obtenidos de hormigones estructurales elaborados en la ciudad de Córdoba. Se evitó incorporar otros agentes o contaminantes de obras (revoques, mampuestos, hierros, basuras de obra) para que no influyan en una correcta comparación de la trazabilidad entre las propiedades de los áridos naturales respecto de los áridos reciclados obtenidos. Es por ello que no se utiliza cualquier sobrante de hormigón sino uno elaborado con áridos naturales inicialmente caracterizados para este estudio; siendo luego triturado dicho hormigón de resistencia estructural de 21MPa para finalmente volver caracterizar sus áridos obtenidos del reciclado. Se realizan ensayos para evaluar propiedades físicas y mecánicas que permitan verificar una factibilidad de re-uso en nuevas carpetas de rodamiento como en el mejoramiento de suelos colapsables a nivel de subrasante o subase de un paquete vial.
Los principales ensayos por comparar son: granulometrías, peso unitario, absorción, ensayo de desgaste, elongación/lajosidad, contenido de terrones, límites de Atterberg, proctor estándar y California Bearing Ratio.
Finalmente este trabajo permite generar conciencia sobre la factibilidad de reciclar en la construcción en Córdoba, induce a establecer bases normativas técnicas y contribuye al desarrollo de prácticas constructivas más responsables.

Palabras clave: áridos reciclados, áridos naturales, caracterización geo-estructural.

ABSTRACT
The study geo-structurally characterizes fine (0 to 6mm) and coarse (6 to 19mm) recycled aggregates, obtained from the crushing of construction and demolition waste; being here obtained from structural concretes produced around the city of Córdoba. The incorporation of other agents or construction site contaminants (plaster, masonry, iron, construction waste) was avoided to evade influencing a correct comparison of the traceability between the properties of the natural aggregates and the recycled aggregates obtained. For this reason, not just any leftover concrete is used, but one made with natural aggregates initially characterized for this study; this concrete with a structural resistance of 21MPa is then crushed and finally the recycled aggregates obtained are characterized again. Tests are conducted to evaluate physical and mechanical properties that allow to verify the feasibility of re-use in new road pavements as well as in the improvement of collapsible soils at the subgrade or subbase level of a road package.
The main tests to be compared are: grain size, unit weight, absorption, wear test, elongation/laxity, lump content, Atterberg limits, standard proctor and California Bearing Ratio.
Finally, this work raises awareness about the feasibility of recycling in construction in Córdoba, fosters the establishment of technical regulatory frameworks, and contributes to the development of more responsible construction practices.

Keywords: recycled aggregates, natural aggregates, characterization geo-structural.

INTRODUCCIÓN

En el escenario actual de la construcción, caracterizado por una creciente conciencia ambiental y demandas regulatorias más estrictas, la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Córdoba, Argentina, emerge como un desafío factible según Zega (2018). La construcción enfrenta una paradoja: mientras la urbanización avanza, la acumulación de RCD en vertederos no controlados y escombreras ilegales genera impactos ambientales y sociales significativos. En este contexto, la innovación en el uso de áridos reciclados (AR) se posiciona no solo como una alternativa técnica, sino como un imperativo estratégico para la transición hacia una economía circular. La principal razón de ser de los AR es la enorme cantidad de residuos que genera el sector de la construcción en las grandes capitales de la Argentina, ejemplo Buenos Aires, Córdoba, Rosario, La Plata y Mendoza. Ya que los RCD, se saben depositar en basurales a cielo abierto o en el mejor de los casos en centros de disposición final habilitados periféricos a los ejidos municipales; incentivando a la continua deposición de estos residuos inertes.

El objetivo de este estudio, es analizar la viabilidad técnica de caracterizar las propiedades geotécnicas como estructurales

que presentan los áridos reciclados respecto de los áridos naturales para su implementación. Ya sea para mejoramiento de suelos problemáticos locales según Cruz et. al (2015), como para la elaboración de hormigones estructurales según Sosa (2023). Para ello, se comparan los parámetros de caracterización de un hormigón como son: granulometrías, peso unitario, absorción, ensayo de desgaste, elongación/lajosidad, contenido de terrones; juntamente con los parámetros requeridos para caracterizar un mejoramiento de suelos colapsables, como son: límites de Atterberg, proctor y California Bearing Ratio.

Además, el trabajo busca generar conciencia sobre la importancia del reciclaje en la industria de la construcción y promover el uso de áridos reciclados como una solución factible para reducir el impacto que estos acarrean y avanzar hacia un desarrollo más sostenible en el tiempo según la tecnología local según Zega (2013). Se espera que este documento contribuya a la concientización y a la difusión de buenas prácticas en el sector; fomentando, una mayor aceptación y aplicación de estos materiales en futuras obras de infraestructura en nuestra provincia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio caracterizó áridos reciclados finos, con diámetro entre 0 a 6mm y, áridos reciclados gruesos cuyo, diámetro varía de 6 a 19mm; ambos, obtenidos de la trituración de RCD de un hormigón estructural de resistencia a la compresión de 21MPa. La experimentación constó de cuatro etapas principales:

1. Caracterización de áridos naturales de la región: Se analizaron áridos naturales gruesos (piedra triturada 4.75-19 mm de Cantera San Nicolás) y áridos naturales finos (arena gruesa de Cantera Passamonte y Equipment C.B.A.). Los ensayos con fines estructurales incluyeron el muestreo y cuarteo (IRAM 1509), el análisis granulométrico (IRAM 1505), la densidad real/aparente y absorción (IRAM 1533 y 1520), la lajosidad y elongación (IRAM 1687-1 y 1687-2), la resistencia a la fragmentación por método Los Ángeles (IRAM 1532), el contenido de finos pasantes tamiz N°200 por lavado (IRAM 1540), la densidad a granel y espacios vacíos (IRAM 1548), y el contenido de terrones de arcilla como partículas deleznables (IRAM 1647). En la Figura 1, se observan algunos ensayos realizados.

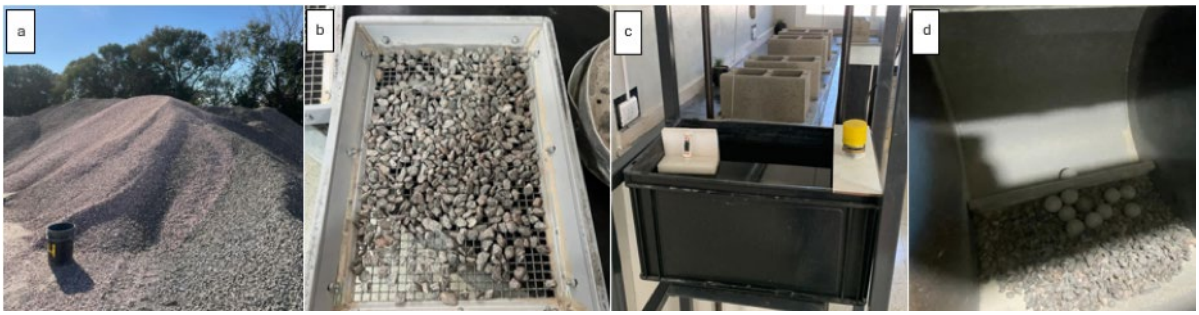


Fig. 1. Caracterización de áridos naturales regionales. a) acopio de cantera San Nicolás. b) Análisis granulométrico. c) Densidad aparente y absorción. d) Método Los Ángeles.

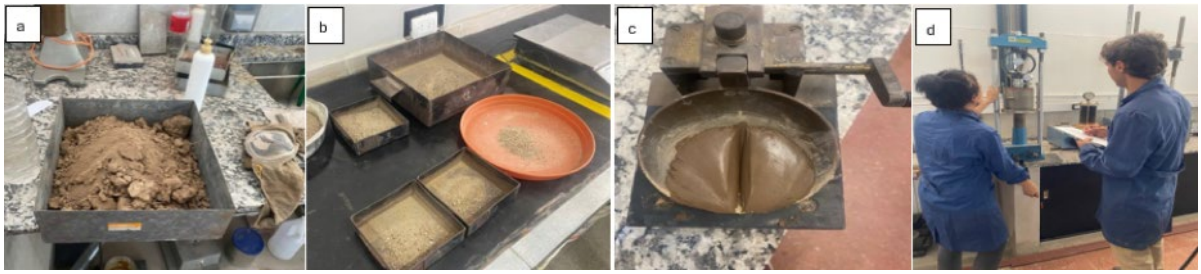


Fig. 2. Caracterización del suelo loéssico colapsable. a) Identificación visual y táctil. b) Análisis granulométrico. c) Límites de Atterberg. d) Ensayo CBR.

2. Caracterización del suelo loéssico colapsable: Se estudió el limo loéssico inorgánico del campus de la U.C.C. (Córdoba). Este suelo se clasificó como ML (limo de baja plasticidad) según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, con un 96% de pasante tamiz N°200 y en su estado saturación puede alcanzar un 3,5% de salto por colapsable. Aquí se realizaron ensayos geotécnicos como contenido de humedad (ASTM D2216), análisis granulométrico por tamices y sedimentación (ASTM D422), doble hidrómetro, límites de Atterberg (ASTM D4318), ensayo proctor estándar (ASTM D698) y ensayo California Bearing Ratio (ASTM D1883). También se analizaron parámetros químicos como la determinación del contenido de sales totales solubles y el valor de pH (ASTM D1067). En la Figura 2, se recopiló el relevamiento fotográfico de algunos de estos ensayos.

3. Construcción y trituración de blocones de hormigón estructural H-21: Se confeccionaron tres blocones de hormigón de 21 MPa de resistencia características de 1 m³ cada uno; siendo elaborados con cemento portland CPC 40, agua potable, árido grue-

so natural de la cantera San Nicolás y árido fino natural de la cantera Passamonte y Equipment. Se realizaron ensayos en estado fresco del hormigón como: asentamiento del cono de Abrams (IRAM 1536), contenido de aire con equipo Washington y medición de la temperatura de la mezcla (IRAM 1406). Complementariamente, luego de los 28 días de curado del hormigón, se realizaron ensayos en estado endurecido como son: esclerometría (IRAM 1694) y ensayo de compresión simple hasta la rotura (IRAM 1546). La trituración de los blocones se llevó a cabo con una punta fragmentadora para la trituración primaria, seguida de una trituradora de mandíbulas para obtener áridos reciclados de diámetro de 6 a 19 mm (gruesos) y áridos reciclados de diámetro de 0 a 6 mm (finos). Se emplearon sistemas de cribado para clasificación de ambas fracciones in situ. La trituradora de mandíbulas, se localiza dentro del ejido de la ciudad de Córdoba. En la Figura 3, se recopiló un relevamiento fotográfico de algunos momentos constructivos y ensayos realizados.

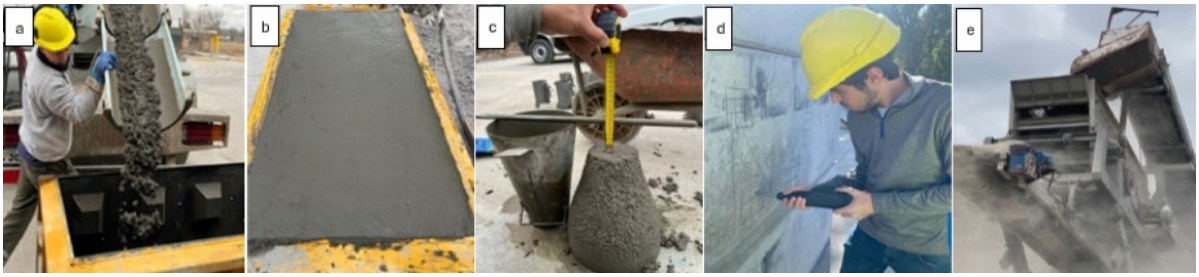


Fig. 3. Caracterización de construcción y trituración de blocones de hormigón estructural. a) Colado del hormigón en un blocón. b) Enrase y terminación del hormigonado. c) Ensayo asentamiento del cono de Abrams. d) Ensayo de esclerometría. e) Trituradora de mandíbula.

4.Caracterización de áridos reciclados: Se caracterizaron los áridos reciclados finos (0-6 mm) y gruesos (6-19 mm) siguiendo las normas IRAM de áridos naturales, dado que no existe normativa homologadas específica para áridos reciclados en Argentina. Los ensayos fueron los mismos que se mencionaron en la etapa 1. En la Figura 4 se observa el relevamiento fotográfico de algunos ensayos de esta etapa.

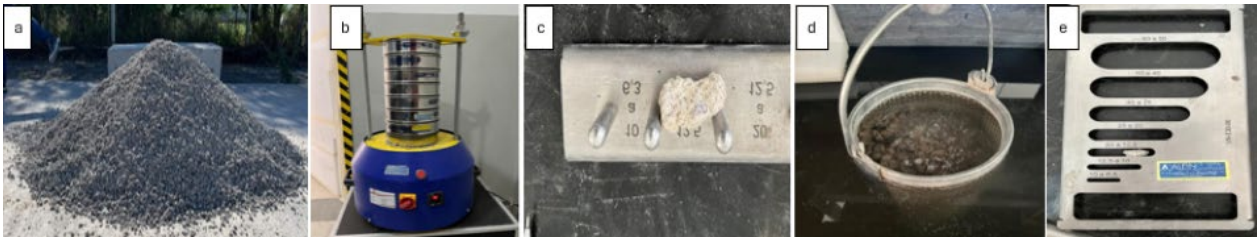


Fig. 4. Caracterización de áridos reciclados. a) Acopio de árido reciclado 6-19mm. b) Análisis granulométrico. c) Ensayo de elongación. d) Densidad aparente y absorción. e) Ensayo de lajosidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se analiza la viabilidad técnica de caracterizar las propiedades geotécnicas como estructurales que presentan las dos fracciones de áridos reciclados obtenidos (gruesos y finos) respecto con dichas fracciones que presentaban los áridos naturales utilizados para conformar los blocones triturados.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros resultantes de los AR y los valores admisibles (o esperados) según la normativa de hormigones estructurales vigentes. Los parámetros que presentan valores mayores respecto de los áridos naturales son el porcentaje de absorción y resistencia a la fragmentación; siendo esto debido a la porosidad del mortero adherido en los AR según Villagrán Zaccardi et. al (2021).

Por su parte en la Tabla 2 se comparan los resultados entre el AR fino cuyo diámetro de partícula va de 0-6mm con los suelos limos de baja plasticidad. Desde allí se valora el bajo potencial de colapso del AR fino frente al riesgo de medio a alto potencial de colapso; siendo factible estudiar una dosificación para mejorar los suelos finos problemáticos de una subrasante y/o subase de un paquete estructural vial.

CONCLUSIONES

La transición hacia una construcción sostenible en Córdoba exige superar barreras técnicas. A partir de la caracterización geo-es-

Ensayo Realizado		Árido Natural (A.N.)		Árido Reciclado (A.R.)		Valores límites o de referencia para hormigones estructurales		
		Fino	Grueso	Fino	Grueso	Fino	Grueso	
Diámetro de partícula		0-6 (mm)	6-19 (mm)	0-6 (mm)	6-19 (mm)	0-6 (mm)	6-19 (mm)	
Determinación de la densidad a granel y espacios vacios	Mét. A (kg/m^3)	1666,6	1497,4	1300,0	1292,3	-		
	Mét. B (kg/m^3)	1588,9	1421,5	1254,5	1216,0			
Lavado de tamiz N°200 (%)		3,33	0,29	2,33	2,64	3,00	1,00	
Determinación de la resistencia a la fragmentación, Mét. de los Ángeles (%)		-	24,10	-	43,97	-	50% Común	
							30% Pavimiento	
Densidad relativa real	γ1 (gr/cm^3)	2,63	2,75	2,50	2,47	2,00 - 3,00	Natural	Reciclado
Densidad relativa apartente S.S.S.	γ2 (gr/cm^3)	2,58	2,70	2,24	2,21		2,4 - 3,5	-
Absorción (%)	A	0,88	0,66	4,65	4,88	-	-	-
Determinación del índice de lajosidad y elongación (%)	Lajosidad	-	9,82	-	8,81	-	L + E = 40%	
	Elongación		12,18		13,62			
Contenido de terrones de arcilla y partículas friables		-	0,14	-	4,40	3,00%	2,00%	
Módulo de finura - Análisis mecánico granulométrico		3,44	6,90	4,09	5,86	Se debe analizar las curvas granulométricas según IRAM		

Tabla 1. Parámetros estructurales de los áridos reciclados vs. los áridos naturales.

Ensayo realizado		Suelo natural	Árido reciclado	Valores de referencia según DNV	
		0 a 0,075 (mm)	0-6 (mm)		
Clasificación	A.A.S.H.T.O. :	A-4	A-3	Subrasante	Subase
	S.U.C.S.:	ML	SC		
Lavado de tamiz N°200 (%)		94,3	3,3	-	-
Análisis granulométrico	Grava y arena (%)	6	80	-	-
	Limo (%)	69	5	-	-
	Arcilla (%)	25	15	-	-
	D_{10} (mm)	<0,002	<0,002	-	-
Límites de Atterberg	ω_{LL} (%)	25,1	35,8	-	≤25
	ω_{LP} (%)	22,2	NP	-	-
	IP (%)	2,8	0	≤12	≤6
Sales solubles (%)		<0,1	5,5	-	≤1,5
Doble hidrómetro	Dispersivo	X	X	-	-
	No dispersivo	-	-		
Carbonato de calcio	$CaCO_3$ (%)	Baja	Muy Alta	-	-
pH	( )	9,29	11,46	-	-
Compresión confinada	Salto por colapso, ε_ω (%)	3,53	0,2	-	-
	Potencial de colapso	Medio a alto	Bajo		
	Pf_{sat}(MPa)	0,0493	2,4		
	Relación de vacíos inicial, e_0	1,133	0,42		
	$\gamma_{ss\ inicial}$ (gr/cm^3)	1,24	1,54		
Proctor estándar	$\omega_{óptima}$ (%)	19	16,5	-	
	$\gamma_{ssmáx}$(gr/cm^3)	1,59	1,6		
California Bearing Ratio ASTM D1883	CBR $_{2,5mm}$ (%)	0,2	1,1	≥3	≥40
	Hinchamiento (%)	29,9	0,85	1	2

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de los áridos reciclados finos vs. el suelo colapsable local.

tructural de los áridos reciclados (gruesos y finos), se confirma en este trabajo la factibilidad técnica de incorporarlo en nuevos hormigones estructurales como en mejoramientos de suelos de paquetes viales.

Las principales conclusiones y recomendaciones son:

- Elaboración de nuevos hormigones estructurales: los áridos reciclados gruesos de 6-19mm permiten reemplazar el árido natural en distintas proporciones en nuevos hormigones estructurales. Como futura línea de investigación, se deberá determinar la dosificación óptima de los áridos reciclados gruesos y finos a mezclar con los áridos naturales.
- Mejoramiento de subrasante de suelos colapsables: La incorporación de árido reciclado fino de 0-6mm con limo de baja plasticidad colapsable, mejoraría sustancialmente su compacidad, granulometría y principalmente el potencial de colapso del limo. Demanda esto, un estudio posterior al presente trabajo. Ya que se debe determinar el porcentaje de áridos reciclados finos a incorporar para verificar este mejoramiento físico-mecánico del tipo vial.

Finalmente, la adopción masiva de estos áridos reciclados (gruesos y finos) indistintamente de su aplicación, requiere la implementación de certificaciones específicas (como las Declaraciones Ambientales de Producto), incentivos fiscales, y normativas técnicas específicas comprobables al medio. Por ende, la variabilidad inherente de los AR exige un enfoque metodológico continuo en el tiempo que garantice la obtención de parámetros geo-estructurales claros para garantizar la uniformidad del producto final en cada aplicación demanda. Es esencial avanzar en el desarrollo de normativas propias adaptadas a las características de cada región.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la empresa Tejamax S.A. por aportar los materiales como la aparatología en la elaboración del hormigón elaborado H-21 y, a la empresa Federico e Hijos S.R.L. por la trituración de los blocones para obtener los áridos reciclados (gruesos y finos).

REFERENCIAS

Cruz, M.P. Martin Schmädke, I.F. Arnaudo, C.E., De Juan M. y Rossi Piccolo A. (2015). Durabilidad de subrasantes loessicas estabilizadas con silicato de sodio sólido y cal hidratada. XXIV Camsig (Salta).

Sosa, M. E. y Zega, C.J. (2023) Gestión y valorización de agregados reciclados de hormigón en obras viales. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Ciencia y Tecnología de los Materiales, 17-29.

Villagrán Zaccardi, Y. A., Pico Cortes, C. M.; Zega, C. J. (2021). Aspectos de la carbonatación del hormigón con agregado reciclado, Federación Interamericana del Cemento, Cemento & Concreto, 110-117.

Zega, C. J., Casuccio, M. L.; Giaccio, G. M.; Zerbino, R. L. (2013). Propiedades de transporte en hormigones elaborados con agregado reciclado de pavimento. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Ciencia y Tecnología de los Materiales, 43-52.

Zega, C. J; Sosa, M. E.; Di Maio, A. A. (2018). Agregados reciclados de hormigón: Comportamiento mecánico del hormigón reciclado. Comisión de Investigaciones Científicas. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Ciencia y Tecnología de los Materiales, 39-50.

EVALUACIÓN DEL ASENTAMIENTO DE ESTRUCTURAS PILOTADAS SOBRE SUELOS LOÉSSICOS COLAPSABLES BAJO CONDICIONES DE HUMEDECIMIENTO

Franco M. Francisca[1, 2], Clara A. Mozejko[1,2], Ignacio Giomi[2, 3]
[1]Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), CONICET y Universidad Nacional de Córdoba, Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina
[2] Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina.
[3] eCampus University, Departamento de Ciencias Teóricas y Aplicadas, Via Isimbardi 10, Novedrate, Italia.
Mail de contacto: franco.francisca@unc.edu.ar

RESUMEN
Se presenta un estudio de caso realizado en la ciudad de Córdoba, Argentina, orientado al análisis del comportamiento de fundaciones profundas ante humedecimiento progresivo del perfil de suelo. El trabajo integra investigaciones in situ mediante ensayos DPSH y SPT, junto con modelaciones numéricas en PLAXIS 2D utilizando modelos constitutivos Mohr-Coulomb y Básico de Barcelona (BBM) en entorno hidro-mecánico acoplado. El caso abordado corresponde al Barrio SEP 2 segunda etapa, donde se identificaron asentamientos diferenciales relevantes con afectación estructural en las edificaciones. Los resultados evidencian la presencia de suelos colapsables de origen eólico, conformados por limos sueltos con estructura frágil frente al aumento de humedad. Las simulaciones arrojan asentamientos entre 20 y 35 cm en escenarios de infiltración, sin detección de estratos competentes hasta los 30 m de profundidad. El estudio permitió diagnosticar con rigor las causas geotécnicas de los daños, cuantificarlas y establecer criterios técnicos para la toma de decisiones en remediación. Se destaca la importancia de incorporar el comportamiento no saturado del suelo y herramientas de modelación avanzada para la evaluación de fundaciones profundas en contextos con suelos colapsables.

Palabras clave: loess, pilote, asentamiento.

ABSTRACT
This paper presents a case study from Córdoba, Argentina, focused on the behavior of deep foundations subjected to vertical loads under progressive wetting of loessic subsoil. In-situ investigations included DPSH and SPT testing on buildings in the SEP Neighborhood 2nd Stage, where severe differential settlements and structural damage were documented. Based on site characterization, numerical modeling was conducted in PLAXIS 2D using Mohr-Coulomb and Barcelona Basic Model (BBM) constitutive laws, allowing for simulation of unsaturated soil behavior through coupled hydro-mechanical analysis. The results revealed collapsible, wind-deposited silty soils with low compaction and dispersed nodules, exhibiting structural instability and substantial strength loss with increased moisture. Settlements between 20 and 35 cm were observed and simulated under infiltration scenarios. No competent layers were found up to 30 m depth, reducing the fea-sibility of traditional reinforcement strategies. The study allowed for clear identification of failure mechanisms, quantification of settlements, and provided solid technical support for remediation planning. It also highlights the importance of integrating unsaturated soil behavior and advanced modeling tools in geotechnical analysis, especially in metastable loessic environments.

Keywords: loess, pile, settlement.

INTRODUCCIÓN

Los suelos loéssicos del centro de Argentina han sido objeto de estudio durante más de cinco décadas debido a su comportamiento metaestable frente a variaciones en el contenido de humedad (Reginatto et al., 1973; Francisca, 2007). Se caracterizan por su alta porosidad, estructura frágil y baja cohesión natural, presentando fenómenos de colapso al saturarse, lo que puede generar asentamientos diferenciales de gran magnitud y comprometer seriamente la integridad estructural de edificaciones fundadas sobre ellos (Rocca et al., 2006; Rinaldi et al., 2007; Francisca et al., 2024).

El presente estudio se desarrolló a partir de una necesidad urgente planteada por el Ministerio de Hábitat y Economía Familiar de la Provincia de Córdoba, ante el deterioro progresivo de los edificios del barrio SEP 2 (Sindicato de Empleados Públicos, segunda etapa), situado en la zona sur de la ciudad. Este complejo habitacional, que alberga más de 800 familias distribuidas en 18 bloques, fue construido a principios de los años 1980 sobre un terreno clasificado geotécnicamente como planicie loéssica (Rocca et al., 2013). La tipología estructural está basada en pórticos de hormigón armado colado in situ, fundados sobre pilotes de fricción sin

ensanche terminal de aproximadamente 11 m de profundidad.

Desde hace dos décadas los vecinos reportan manifestaciones crecientes de asentamientos diferenciales, incluyendo grietas en mampostería, fisuras en vigas y columnas, desniveles en pisos, deformación de escaleras premoldeadas y, en algunos casos, afectación directa de elementos resistentes. Esta sintomatología, que impacta tanto en la seguridad estructural como en la habitabilidad de las viviendas, dio origen al presente estudio.

El objetivo principal del trabajo fue diagnosticar con rigurosidad el estado del sustrato de fundación, evaluar la influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico del suelo, y determinar los mecanismos de asentamiento y colapso involucrados. Para ello se realizaron campañas de prospección geotécnica, ensayos de laboratorio, modelaciones numéricas y estudios hidro-mecánicos mediante el modelo BBM (Giomi y Francisca, 2022), en tres bloques particularmente afectados: G, I y V. La caracterización de la zona de estudio incluyó la evaluación estratigráfica mediante sondeos de hasta 30 m de profundidad, el modelado estructural del sistema de pilotes bajo distintos estados de saturación y el diagnóstico sobre el tipo de fundación, mecanismo resistente predominante y limitaciones frente al colapso inducido por humedad.

Este artículo expone los resultados del estudio, su correlación con antecedentes históricos de comportamiento de suelos loéssicos en Córdoba y las implicancias técnicas para el diseño, monitoreo y mantenimiento de estructuras fundadas en este tipo de formaciones geológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló como parte del relevamiento técnico del Barrio SEP 2, focalizado en las roscas G, I y V, donde se observaron los mayores asentamientos y deterioro estructural en las edificaciones.

La campaña de relevamiento incluyó cinco perforaciones con ensayos DPSH y cuatro SPT con recuperación de muestras hasta los 30 m. Las perforaciones se realizaron tanto en los sectores afectados por presuntos humedecimientos del subsuelo como en zonas de control, permitiendo identificar variaciones en la compacidad, resistencia y estado de humedad del perfil estratigráfico. Las muestras obtenidas mediante el muestreador Terzaghi fueron posteriormente analizadas en laboratorio. Los ensayos consistieron en determinaciones de contenido de humedad (ASTM D2216), límites de consistencia (LL y LP) (ASTM D4318), pasante tamiz #200 (ASTM D422), clasificación SUCS (ASTM D2487) y ensayos de compresión confinada a humedad natural e inundada (ASTM D2435) que permitieran evaluar el potencial de colapso relativo del suelo.

Los resultados de campo fueron complementados con simulaciones numéricas en PLAXIS 2D (versión 23.1), empleando como modelos constitutivos Mohr-Coulomb (MC) y el Modelo Básico de Barcelona (BBM) (Fig. 1). La Figura 1 muestra un esquema del modelo de pilote simulado utilizando el método de elementos finitos, considerando condiciones axisimétricas y se presentan un perfil tipo con los resultados del ensayo SPT.

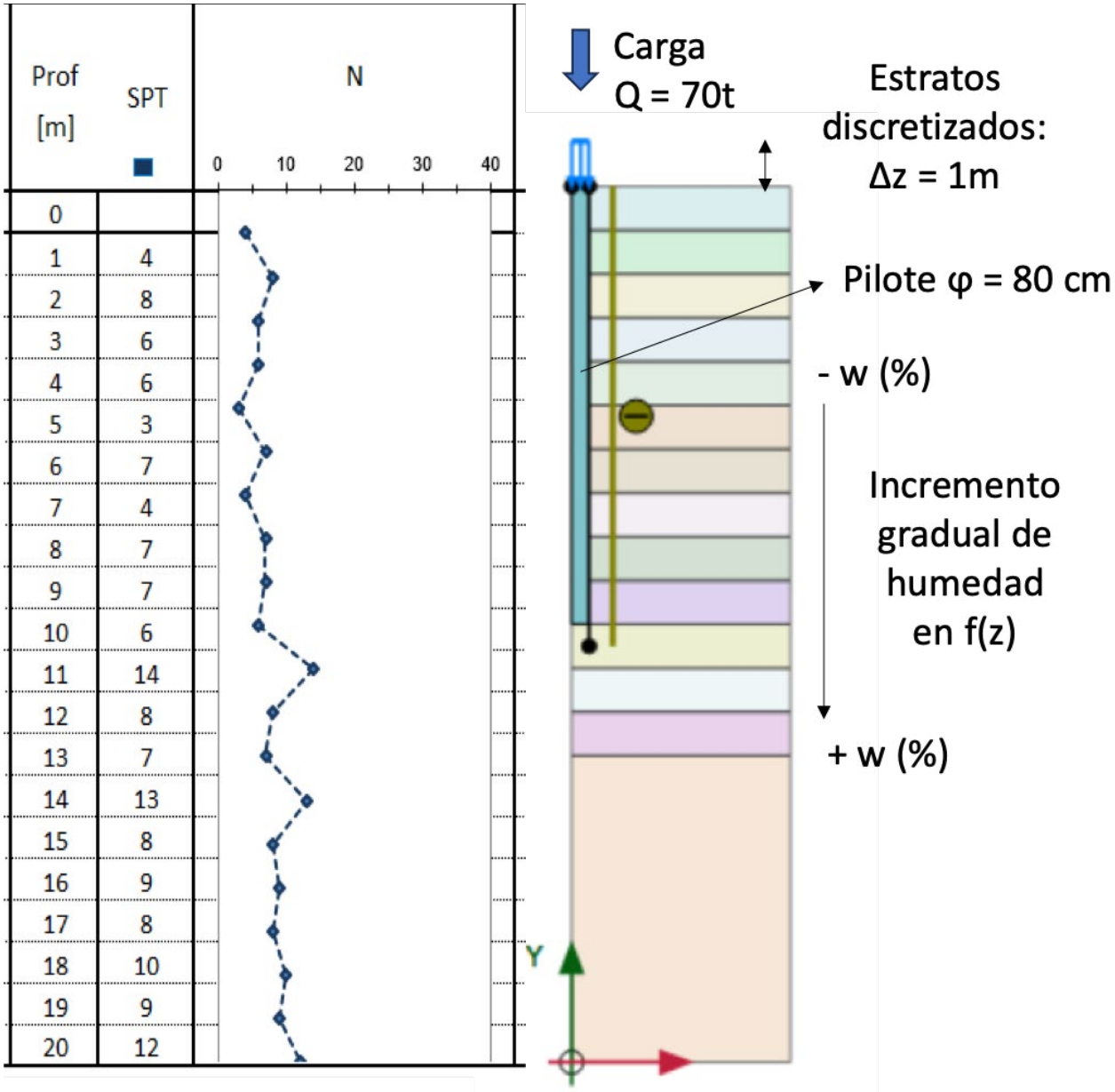
Las simulaciones numéricas fueron realizadas desarrollando un modelo hidro-mecánico acoplado, que incorpora la succión como variable de estado y permite simular la evolución del comportamiento tenso-deformacional del suelo, a través de tensiones de Bishop, en función del contenido de agua (Giomi y Francisca, 2022; Francisca et al., 2024). Se simularon escenarios de humedecimiento progresivo desde la superficie hasta 20 m de profundidad, evaluando la capacidad portante de los pilotes, los desplazamientos inducidos y la aparición de mecanismos de fricción negativa. Las cargas aplicadas, con valores entre 30 y 70 t, se definieron en función de columnas típicas y representativas de los bloques afectados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron elevada variabilidad en el contenido de humedad entre bloques, confirmando la presencia de zonas saturadas en profundidad que inducen colapsos estructurales por pérdida de rigidez y resistencia del terreno. Los perfiles geotécnicos revelaron limos colapsables (ML/ML-CL) con humedades naturales entre 9% y 13%, mientras que las zonas afectadas alcanzan valores superiores al 20%. En los ensayos de compresión confinada se observaron deformaciones por colapso en los primeros metros desde 12,5% a 1 m de profundidad, reduciéndose hasta alcanzar 2,2% a los 5 m, lo cual genera asentamientos diferenciales incompatibles con la rigidez de las estructuras fundadas.

Las simulaciones numéricas mostraron que el mecanismo principal de soporte de las fundaciones es la fricción lateral de los pilotes, la cual se reduce significativamente con el aumento de humedad (Redolfi y Oteo Mazo, 1992). La pérdida de resistencia friccional genera una redistribución de cargas hacia la punta del pilote, pero el suelo subyacente también presenta baja rigidez, lo cual deriva en asentamientos importantes. La Figura 2 muestra un resultado típico de desplazamiento del suelo alrededor de un pilote empleando el criterio MC cuando se humedece el suelo y se produce transferencia de carga hacia estratos inferiores. Los parámetros empleados fueron correlacionados a través de los ensayos in-situ realizados a humedad natural e inundados.

Adicionalmente, la Figura 3 muestra la respuesta esperada carga-deformación de un pilote en limo a humedad natural y saturado. El modelado numérico muestra que los pilotes resistían adecuadamente en condiciones naturales, con deformaciones moderadas. Sin embargo, ante humedecimiento progresivo, se observa un colapso friccional y una transferencia de carga a la punta del pilote con baja capacidad resistente, provocando desplazamientos verticales superiores a los 35 cm para cargas aplicadas de 70 t. Esta



Prof [m]	SPT
0	
1	4
2	8
3	6
4	6
5	3
6	7
7	4
8	7
9	7
10	6
11	14
12	8
13	7
14	13
15	8
16	9
17	8
18	10
19	9
20	12

Fig. 1. SPT obtenido para uno de los bloques en estudio, junto con la configuración del modelo de pilote con elementos de interfaz y carga progresiva.

magnitud de asentamiento es suficiente para producir daños estructurales, fisuras, pérdida de verticalidad y colapso de elementos no estructurales cuando el humedecimiento es localizado y genera asentamientos diferenciales.

Un estudio avanzado consistió en modelar el frente de humedecimiento de manera de poder determinar los asentamientos a medida que avanza el mismo. Para ello se empleó el modelo BBM, con parámetros calibrados a partir de muestras de suelo tomadas en proximidades del área de estudio (Giomi y Francisca, 2022). Se humedecieron los sub-estratos que se observan en la Fig. 1 cada 1 m, determinando los asentamientos esperados para cada nivel de carga. La Tabla 1 presenta los asentamientos que sufre un pilote a medida que se satura de manera incremental la longitud del fuste, cuando la carga aplicada se mantiene constante e igual a 70 t. Las curvas de capacidad de carga revelaron una disminución progresiva de la rigidez del sistema fundacional a medida que el frente de humedad avanzó en profundidad.

LONGITUD DEL PILOTE INUNDADO (FRICCIÓN NEGATIVA) (M)	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
INCREMENTO DE ASENTAMIENTO POR HUMEDECIMIENTO (CM)	0,0	0,2	0,7	2,1	4,7	8,1	14,6

Tabla 1. Asentamientos inducidos en pilotes en loess colapsables, con una carga constante de 70 tn, producido por el humedecimiento del suelo a lo largo del fuste (BBM).

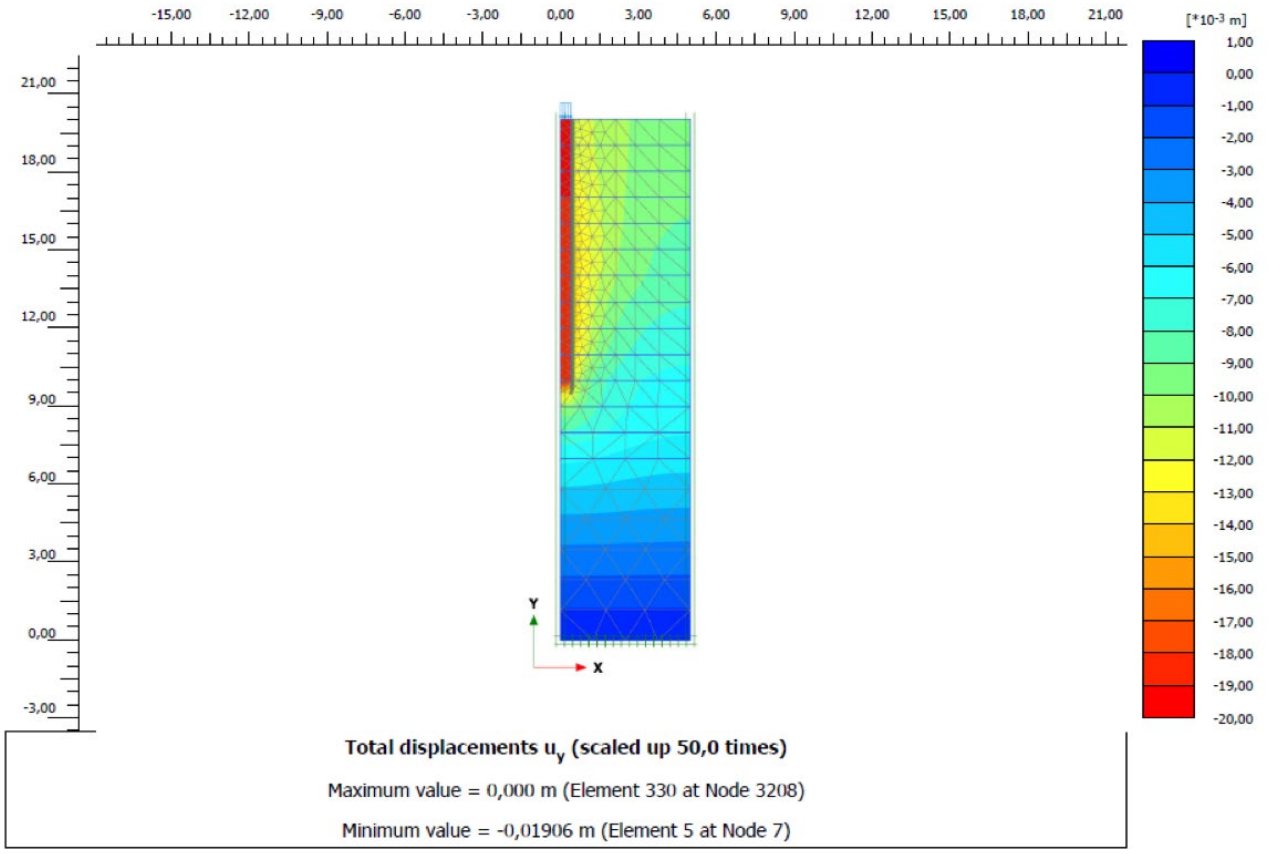


Fig. 2. Resultado de la modelación de los pilotes en limos colapsables sometidos a humedecimiento (MC).

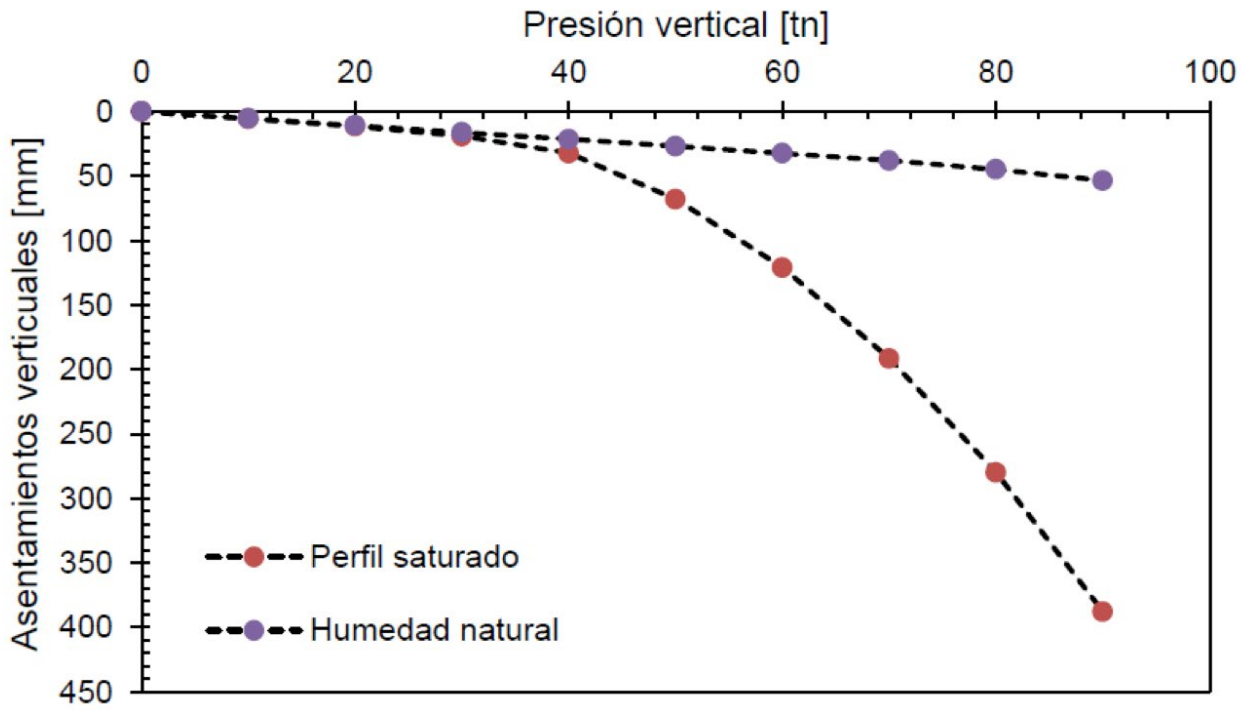


Fig. 3. Curva de carga-deformación para pilote con humedad natural vs. perfil saturado (MC).

Es importante destacar que estos resultados resultaron consistentes con las observaciones de campo. En particular, los daños registrados en vigas, columnas y escaleras de hormigón premoldeado en las roscas G, I y V, se corresponden con los asentamientos determinados con los modelos, que al ser diferenciales por la naturaleza del humedecimiento indujeron severos daños estructurales

en las construcciones. Este comportamiento responde a la alteración del estado metaestable del loess por ingreso prolongado de agua, ya sea por fallas en redes pluviales, sanitarias o cloacales. La reducción de succión matricial y la disolución de sales cementantes debilitan los enlaces entre partículas, generando pérdida de rigidez y colapso volumétrico (Francisca et al., 2024).

La redistribución de esfuerzos internos por asentamientos diferenciales provoca fisuración en nudos estructurales, pérdida de verticalidad y daño en aberturas, escaleras y elementos portantes. La presencia de fricción negativa, por colapso del suelo alrededor del pilote, incrementa la carga aplicada, profundizando los desplazamientos (Abbona et al., 1990; Redolfi y Oteo Mazo, 1992).

La aplicación del modelo BBM permitió simular acoplamientos hidro-mecánicos y entender el comportamiento tenso-deformacional del sistema en distintos escenarios. El análisis revela que los asentamientos no se deben a cargas extraordinarias, sino a modificaciones en las condiciones de humedad y consecuentemente mecánicas del suelo de fundación de los bloques.

CONCLUSIONES

El estudio geotécnico desarrollado permitió identificar con precisión las causas de los asentamientos diferenciales que afectan varias roscas del Barrio SEP 2. Se concluye que el incremento sostenido del contenido de humedad en el perfil del suelo ha reducido significativamente la capacidad portante de las fundaciones existentes, generando asentamientos incompatibles con la rigidez estructural de las construcciones.

Las condiciones del subsuelo hasta 30 m de profundidad no presentan estratos competentes, lo que limita severamente la viabilidad de soluciones de recalce tradicionales. Las simulaciones confirmaron que, bajo humedecimiento, los pilotes funcionan como elementos flotantes sin apoyo efectivo en punta. Los modelos numéricos desarrollados, incorporando análisis acoplados hidro-mecánicos permitió generar nuevos conocimientos y concluir de manera certera sobre las causas y magnitud de éstas que provocaron los danos estructurales de las edificaciones.

Los resultados de los modelos pueden ser utilizados para priorizar medidas preventivas que eviten nuevas infiltraciones y monitorear sistemáticamente la evolución de asentamientos. Este caso destaca la necesidad de incorporar criterios de comportamiento hidro-mecánico en el análisis de fundaciones profundas en suelos colapsables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Municipalidad de Córdoba por el financiamiento de las investigaciones realizadas y a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por el apoyo económico.

REFERENCIAS

Abbona, P. V., Terzariol, R. E. y Redolfi, E. R. (1990). Fallas de viviendas fundadas con pilotes cortos en loess. XI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol. II, 198-212.

Francisca, F. M. (2007). Evaluating the constrained modulus and collapsibility of loess from stand-ard penetration test. International Journal of Geomechanics, 7(4), 307-310.

Francisca, F. M., Giomi, I., & Rocca, R. J. (2024). Inverse analysis of shallow foundation settle-ments on collapsible loess: Understanding the impact of varied soil mechanical properties during wetting. Computers and Geotechnics, 167, 106090.

Giomi, I. y Francisca, F. M. (2022). Numerical modeling of the oedometrical behavior of collapsi-ble loess. Geotechnical and Geological Engineering, 1-12.

Redolfi, E. R. y Oteo Mazo, C. (1992). A model of pile interface in collapsible soils. VII Internation-al Conference on Expansive Soils, Texas, Vol. 1, 483-488.

Reginatto, A. y Ferrero, J. C. (1973). Collapse potential of soils and soil-water chemistry. III Int. Conf. Soil. Mech. Found. Eng., Moscow, 2(2), 177-183.

Rinaldi, V. A., Rocca, R. J. y Zeballos, M. E. (2007). Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 2259-2286.

Rocca, R. J., Redolfi, E. R. y Terzariol, R. E. (2006). Características geotécnicas de los loess de Argentina. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2), 149-166.

Rocca, R. J., Terzariol, R. E. y Demarchi, M. Z. (2013). Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loéssicos de la ciudad de Córdoba. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, (30), 67-76.

CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS, ESTRUCTURALES Y MICROTECTÓNICAS DE LAS ROCAS DEL SISTEMA DE VENTANIA

Ezequiel T. Martinez[1], Sebastián Oriolo[2]
[1]Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
[2]CONICET-Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Intendente Güiraldes 2160 C1428EHA Buenos Aires, Argentina.
martineze85@gmail.com

RESUMEN

El comportamiento de rocas foliadas está controlado por las estructuras presentes en ellas como foliaciones y laminaciones. Estos materiales son anisotrópicos, o bien transversalmente isotrópicos si las estructuras son regulares y bien desarrolladas, con propiedades que dependen de la dirección de aplicación de la carga, dado que las estructuras mencionadas determinan planos de debilidad que son las responsables de las propiedades geomecánicas de las rocas. Las estructuras mencionadas están asociadas a distintos mecanismos de deformación como *kinking*, deslizamiento de borde de grano y recristalización dinámica, que modifican la estructura de la roca debido a distintos procesos, entre los cuales se destacan el aplastamiento y elongación, y la formación de subgranos y nuevos granos.

Una de las características fundamentales del Sistema de Ventania es, en la mega- y meso-escala, el plegamiento que afecta a toda la cubierta sedimentaria paleozoica. En escalas menores, se reconocen diversas estructuras como foliaciones y estructuras tipo "S-C", y en escala microscópica, sombras de presión, *mica-fish*, microfracturación, entre otros. Estos procesos son producto de la deformación bajo condiciones variables de presión y temperatura que la columna experimentó durante su historia, que influenciaron su respuesta ante estos factores.

Se estudiaron las características resistentes de las rocas presentes en esta región, particularmente de las formaciones Napostá, Providencia, Lolén y Sauce Grande, mediante ensayos de campo con esclerómetro y ensayos de laboratorio de compresión simple. Se analizaron, además, cortes delgados de muestras de sectores seleccionados y se estudió la deformación mediante un modelo de plasticidad friccional. Se analizaron los resultados de acuerdo al ángulo de la aplicación de la carga con respecto a las estructuras presentes, la posición de las muestras en el plegamiento (charnela o limbos normales e invertidos) y su relación con las microestructuras reconocidas.

Palabras clave: resistencia, esclerómetro, microtectónica

ABSTRACT

The behavior of foliated rocks is controlled by their structures, such as foliations and laminations. These materials are anisotropic, or transversely isotropic when the structures are regular and well-developed, with properties that depend on the direction of load application, since the aforementioned structures define planes of weakness that are responsible for geomechanical properties of rocks. These structures are associated with different deformation mechanisms such as kinking, grain boundary sliding and dynamic recrystallization, which modify the rock structure through various processes, including flattening and elongation, and the formation of subgrains and new grains.

One of the fundamental characteristics of the Ventania System, at the mega- and meso-scale, is the folding that affects the entire Paleozoic sedimentary cover. At smaller scales, various structures are recognized, such as foliations and S-C structures, and at the microscopic scale, pressure shadows, mica-fish, and microfracturing, among others. These processes result from deformation under varying pressure and temperature conditions that the rock column experienced throughout its history, influencing its response to these factors.

The strength parameters of the rocks present in this region were studied, particularly those of the Napostá, Providencia, Lolén, and Sauce Grande Formations, through field tests using a Schmidt hammer and laboratory uniaxial compression tests. Thin sections from selected areas were also analyzed, and the deformation was studied using a frictional plasticity model. The results were analyzed according to the angle of load application with respect to the existing structures, the position of the samples within the fold (hinge or normal/inverted limbs), and their relationship to the recognized microstructures.

Keywords: strength, Schmidt hammer, microtectonics

INTRODUCCIÓN

Estructuras tales como foliaciones constituyen anisotropías que determinan planos de debilidad en la fábrica de la roca a lo largo de los cuales las rocas pueden fallar. En este trabajo, se estudian las características estructurales, a diferentes escalas, y cómo afectan las propiedades geomecánicas medidas en ensayos de campo y laboratorio de formaciones seleccionadas de la provincia geológica de Ventania.

GEOLOGÍA REGIONAL

El Sistema de Ventania (Sierras Australes de Buenos Aires) está constituido por cordones subparalelos de desarrollo noroeste - sudeste, con una geometría de arco característica. El rasgo estratigráfico más sobresaliente es el predominio de sedimentitas silicoclásticas paleozoicas, compuestas por los Grupos Curamalal, Ventana y Pillahuincó (e.g., Sellés-Martinez, 2001, y referencias allí citadas).

En este trabajo, se estudiaron unidades del Grupo Ventana y Pillahuincó: las formaciones Napostá, Providencia y Lolén del primero, y la Formación Sauce Grande del segundo. Las rocas de la Formación Napostá corresponden a ortocuarcitas blancas y blancas grisáceas de grano fino, en general foliadas, aunque en algunos sectores masivas o con foliación muy pobre, mientras que la Formación Providencia está compuesta por ortocuarcitas rosadas y blancas, de grano fino en bancos potentes, con una foliación pobremente desarrollada. La Formación Lolén corresponde a meta-areniscas micáceas castañas, y la Formación Sauce Grande está constituida por diamictitas grises verdosas foliadas, con presencias de clastos cuarzosos de mayor tamaño (*dropstones*). Estas unidades se encuentran fuertemente plegadas, característica destacada del sistema serrano de Ventania.

Ventania se destaca por el arqueamiento del sistema serrano y el intenso plegamiento que afectó a la cubierta sedimentaria paleozoica, que disminuye hacia el sector oriental. Las estructuras de mayor orden corresponden a lineamientos de escala regional y plegamiento, y las mesoestructuras corresponden a pliegues menores, fracturas, foliaciones, y lineaciones minerales, además de otras de escala local como bandas *kink*, zonas de cizalla frágil-dúctil y brechas de tracción (hidráulicas).

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

Las unidades del Grupo Ventana analizadas en general se presentan plegadas con formas asimétricas y flancos normales largos y cortos invertidos, con rumbo de eje en general noroeste-sudeste y vergencia hacia el noreste (algunos volcados con plano axial subhorizontal), mientras que el plegamiento de la Formación Sauce Grande es menos intenso, con pliegues de tipo paralelo de longitudes de onda y amplitudes menores, planos axiales subverticales y clivaje menos desarrollado.

Se reconocen dos foliaciones, denominadas S1 y S2, formando una fábrica tipo “S-C”, con S1 representando los planos de cizalla (C) y S2 la esquistosidad (S), y lineaciones minerales de estiramiento (L) sobre los planos S1, de orientaciones en general noreste-sudoeste e inclinaciones hacia el sudoeste. La foliación S1 es la más desarrollada y paralela a la orientación del plano axial del plegamiento. Las lineaciones de estiramiento presentan en general una disposición paralela a la dirección de inclinación de la foliación S1 (tipo *downdip*).

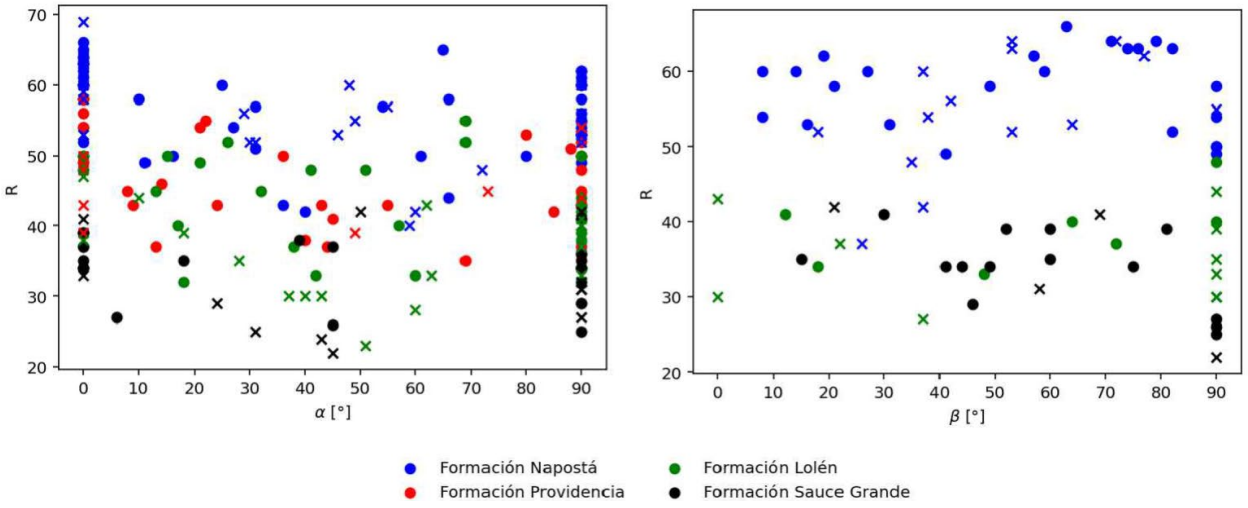
CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS

Se midió, en sitios seleccionados de los pliegues (charnelas y limbos), la resistencia mediante el uso de un esclerómetro. En la Figura 1 se muestran los resultados del rebote del martillo (R) en relación a los ángulos α y β (ángulo entre la aplicación de la carga y las foliaciones S1 y S2, respectivamente). Se tomaron, además, muestras para la ejecución de ensayos de compresión simple que se muestran en la Tabla 1 junto a valores de trabajos anteriores de otros autores.

Para analizar el comportamiento reológico bajo un régimen de bajas temperaturas, se utilizó el modelo elastoplástico desarrollado por Leroy y Sassi (2000), que describe las deformaciones plásticas dadas por desplazamientos en planos de debilidad distribuidos en un volumen de roca, teniendo en cuenta su endurecimiento por deformación. Se calibró el modelo con las curvas de los ensayos de laboratorio de Di Nardo y Dimieri (1988; Figura 2a), para obtener parámetros de resistencia (ángulo de fricción, cohesión inicial y coeficiente de endurecimiento) y deformabilidad (módulo de deformación) de los materiales y analizar el comportamiento de las foliaciones S1 y S2 ante la aplicación de cargas (Figura 2c).

CARACTERÍSTICAS MICROTECTÓNICAS

Las rocas de la Formación Napostá están constituidas mayoritariamente por cuarzo, que forma granos relícticos aplanados y con recristalización dinámica, con sericita subordinada en cantidades variables, mientras que la Formación Lolén está constituida



(a) (b)

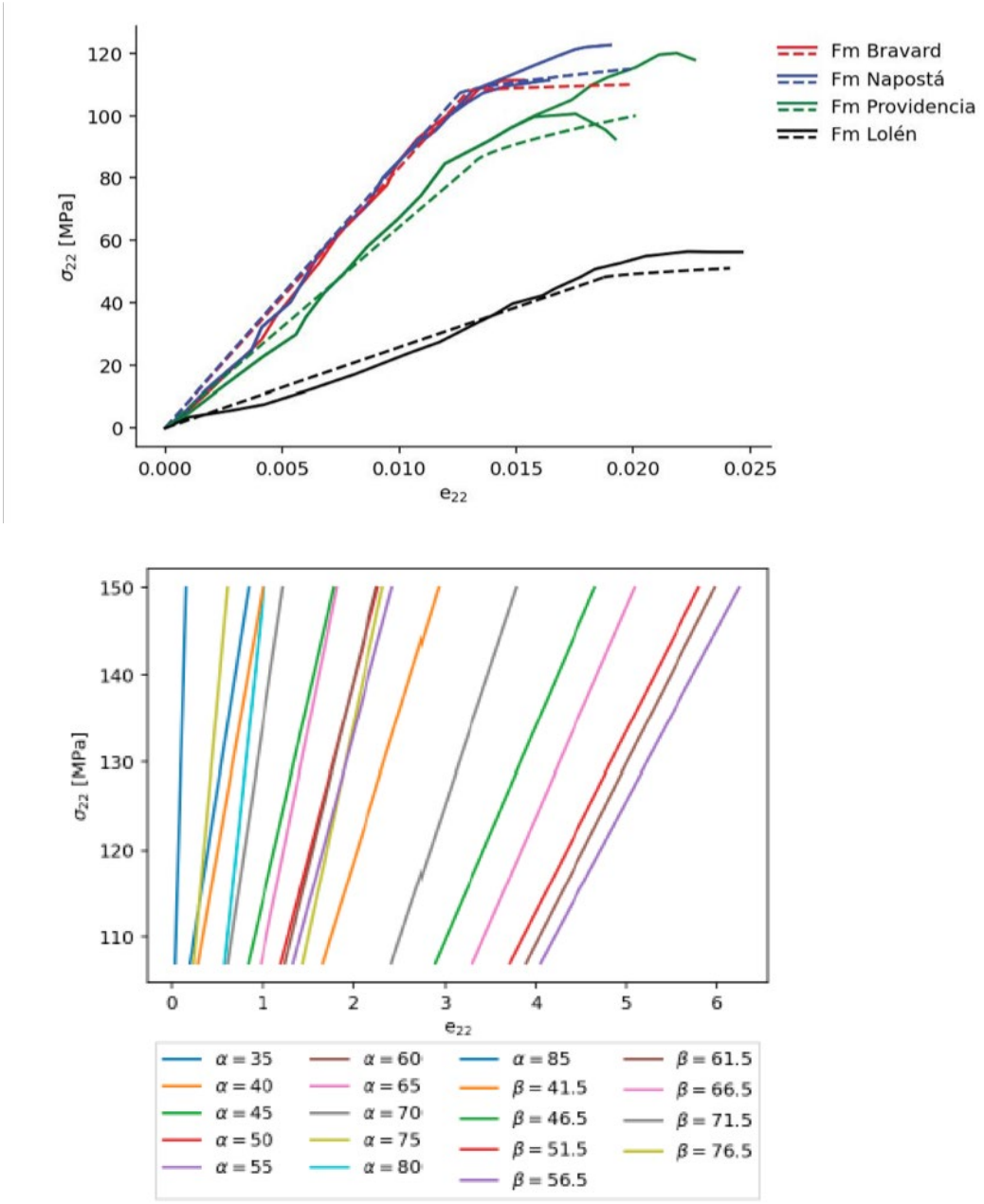
Fig. 1. Gráfico de la resistencia de campo R en relación a los ángulos α (a) y β (b). Con cruces se marcan mediciones en las charnelas y en círculos en limbos.

Muestra	Formación	Posición pliegue	Orientación	σ_{UCS} [Mpa]	Fuente
I	Bravard	-	Normal techo	110	Di Nardo y Dimieri (1988)
I	Napostá	-	Normal techo	123	Di Nardo y Dimieri (1988)
II				111	
M1E	Napostá	Limbo	α = 34°	147	Este trabajo
				177	
				106	
				140	
M2E	Napostá	Charnela	α = 59°	105	Este trabajo
				129	
				118	
I	Providencia	-	Normal techo	100	Di Nardo y Dimieri (1988)
II				119	
I	Lolén	-	¿α = 90°?	39	Di Nardo y Dimieri (1988)
II				56	
M4E	Sauce Grande	Limbo	α = 9°	77	Este trabajo
				69	
				81	
				85	

Tabla 1. Valores de resistencia a la compresión simple (σ_{UCS}) obtenidos en laboratorio.

por cuarzo (granos relícticos y rescristalizados), feldespato potásico y micas en cantidades variables. La Formación Sauce Grande corresponde a una diamictita compuesta por clastos cuarcíticos y feldespáticos, en una matriz sericítica y cuarzosa con feldespatos y minerales opacos.

Los granos de cuarzo de las formaciones Napostá y Lolén deformación intracristalina, con extinción ondulosa, lamelas de deformación y subgranos, mientras que en la Formación Lolén se observan micas deformadas en kinks y en estructuras sigmoidales mica-fish. En algunos sectores, además, se reconoce una foliación oblicua de granos de cuarzo, a veces con formas sigmoidales. Con respecto a la Formación Sauce Grande, los filosilicatos y los minerales opacos se disponen paralelos a S1. En las formaciones Lolén y Sauce Grande se observan estructuras de deformación frágil (fracturas), mientras que en las tres formaciones se observan sombras de presión simétricas con cuarzo y sericita recristalizada alrededor de granos de cuarzo. La (Formación Napostá), filosilicatos (Formación Lolén) o minerales iso-orientados y por presión-solución (Formación Sauce Grande); mientras que S2 por foliación oblicua de cuarzo y filosilicatos (formaciones Lolén y Napostá) o similar a S1 (Formación Sauce Grande).



Formación	phi [°]	c1 [MPa]	c2 [MPa]	E [MPa]
Bravard	30.0	31.0	3.0	8332
Napostá	30.0	31.0	21.0	8520
Providencia	30.0	25.0	60.0	6425
Lolén	30.0	14.0	10.0	2563

Fig. 2. a) Resultados de la calibración de los parámetros de las rocas a partir de los ensayos de Di Nardo y Dimieri, 1988 (línea continua curvas de ensayos y línea punteada resultados de la modelación). b) Curvas de tensión-deformación para distintos valores de α y β. c) Parámetros de resistencia y deformabilidad obtenidos (phi ángulo de fricción interna, c1 cohesión inicial, c2 coeficiente de endurecimiento y E módulo de deformación).

DISCUSIÓN

En las Figuras 1 y 3a se puede observar que, en general, para las formaciones Lolén y Sauce Grande, la resistencia en la charnela es menor que en los limbos, para valores similares de α y β, mientras que en las formaciones Napostá y Providencia no se observa una relación clara. A su vez, se puede observar que en general la resistencia con α=90° (normal a S1) es menor que con α=0° (paralelo a S1), siendo la única excepción las mediciones en las charnelas de la Formación Providencia (aunque los valores son similares, 46 y 45, respectivamente). Además, para el mismo α, la charnela suele mostrar resistencia menor, salvo en la Formación Sauce Grande con α=0° y Providencia con α=90°, donde muestran valores similares. Este comportamiento se explica por la influencia de la foliación S2, ya que con α=0° las fábricas minerales presentes en los microlitones (i.e. foliación oblicua de cuarzo y/o mica-fish) se oponen a la carga aplicada y aumentan su resistencia, mientras que disminuyen su resistencia al reactivarse cuando α=90° (Figura 3.b; Ali et al., 2020).

Los resultados del modelo de plasticidad muestran que la deformación por discontinuidades es máxima con α= 55°, y no se deforma con valores menores de α= 35°; valores cercanos a α= 90° siguen acumulando deformación (Figura 2.b). Este comportamiento es consistente con los datos de resistencia obtenidos en laboratorio (Tabla 1), donde para α=59° el valor de resistencia ($\sigma_{UCS_promedio}$ = 117 MPa) es marcadamente menor que con α=34° ($\sigma_{UCS_promedio}$ = 142 MPa).

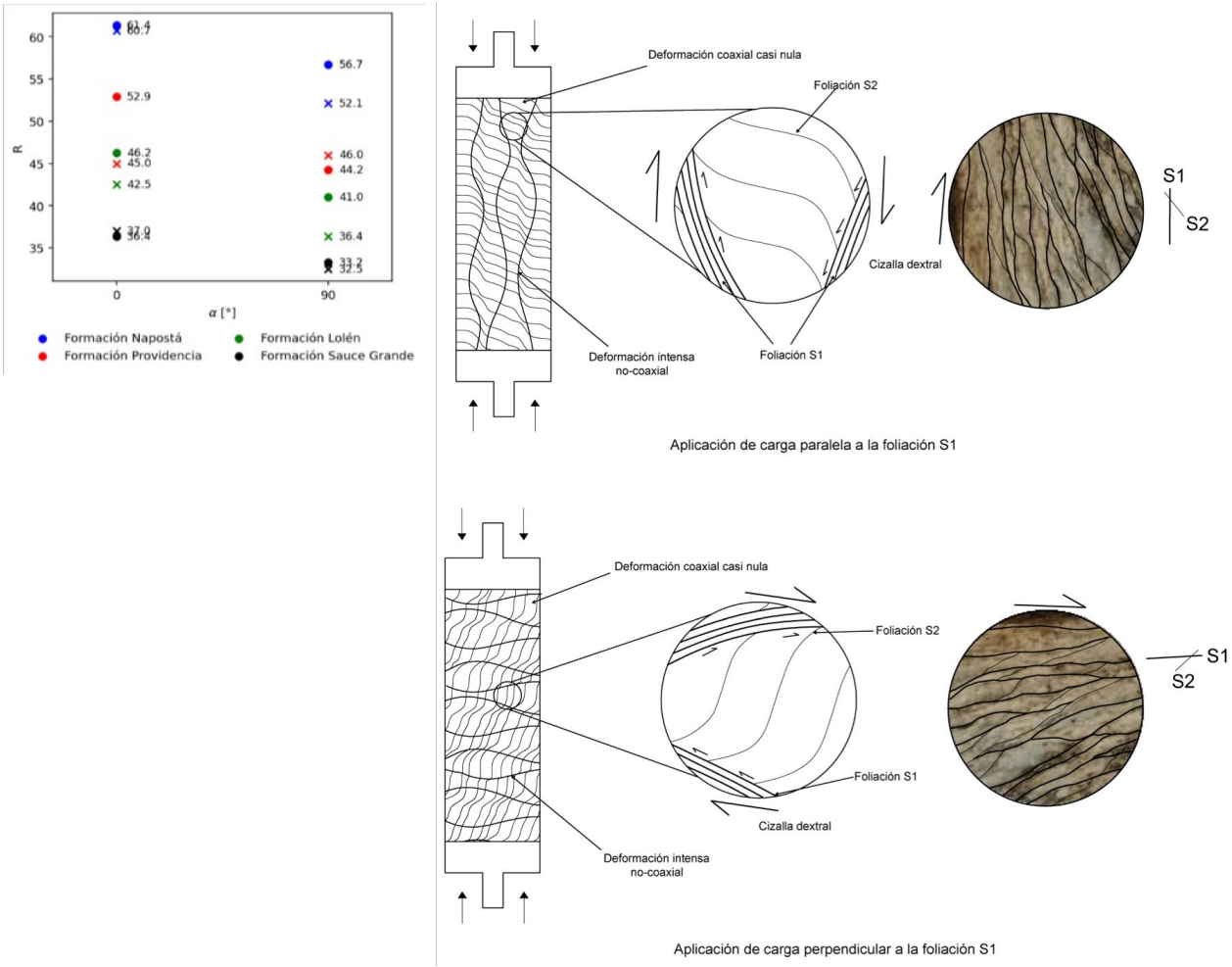


Fig. 3. a) Resistencia (R) media cuando α=90° y α=0° (cruces: mediciones en charnela; círculos: limbos). b) Influencia de las foliaciones en la resistencia (basado en Ali et al.).

CONCLUSIONES

Se midió la resistencia de distintas formaciones en el sistema Ventania, y se han encontrado diferencias en relación a su posición en el plegamiento y el ángulo de la aplicación de la carga con respecto a las foliaciones S1 y S2. Las foliaciones (composición y orientación) y el sitio de medición, con relación al plegamiento, ejercen un control de primer orden sobre las características geomecánicas de los materiales.

REFERENCIAS

Ali, A., Hussain, S., Khan, S., Khan, A. S., Mabood, S., y Ahmad, R. (2020). Effects of tectonically induced fabrics on geomechanical properties of rocks, NW Pakistan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(9), 4905-4916.

Di Nardo, L., y Dimieri, L. (1988). Mesoestructuras formadas en el campo del comportamiento rígido, abra de la Ventana, Sierras Australes de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 43(2), 140-152.

Leroy, Y. M., y Sassi, W. (2000). A plasticity model for discontinua. En: *Aspects of Tectonic Faulting: In Honour of Georg Mandl*, 77-107. Springer.

Sellés-Martínez, J. (2001). Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Journal of Iberian Geology, 27*, 43-69.

ALTERABILIDADE DE BASALTO: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADE FÍSICAS E EM CONDIÇÕES DE CICLAGEM ESPECÍFICAS

Patricia C. Oliveira[1,2], Nicole L. Gallego[1], Lázaro V. Zuquette[2]
[1]Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cristo Rei 19, Toledo, Paraná, Brasil
[2] Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, São Carlos, São Paulo, Brasil.
Mail de contacto: patriciac@utfpr.edu.br

RESUMO
A velocidade dos processos de alteração é influenciada por características intrínsecas da rocha parental e pela agressividade do meio em que o material rochoso se encontra. Ensaios de ciclagem, tanto naturais quanto laboratoriais, são ferramentas eficazes para simular diferentes condições ambientais e direcionar a escolha de materiais de construção. Este estudo teve como objetivo avaliar a alterabilidade de dois litotipos basálticos, com foco nas modificações das propriedades físicas dos agregados. As amostras foram coletadas em uma pedreira localizada em Toledo, Paraná, Brasil. Os agregados analisados, com dimensões entre 6,3 e 9,5 mm, foram diferenciados em basalto maciço e basalto com microamígdalas de montmorilonita. Nove tipos de ensaios acelerados foram realizados, incluindo ciclagem natural, ambientes saturados e ciclos de saturação-secagem, com controle de temperatura e pH da água, e um ensaio específico de saturação com CO_2. A utilização de metodologias de ciclagem acelerada proporcionou uma melhor compreensão do comportamento dos materiais sob condições adversas. Os resultados ressaltam a influência da mineralogia na alterabilidade dos basaltos, evidenciando que a agressividade do meio de exposição afeta de forma específica os parâmetros físicos do basalto.

Palavras-chave: alterabilidade, basalto, ciclagem.

RESUMEN
La velocidad de los procesos de alteración está influenciada por las características intrínsecas de la roca madre y por la agresividad del medio en el que se encuentra el material rocoso. Los ensayos de ciclado, tanto naturales como de laboratorio, son herramientas eficaces para simular diferentes condiciones ambientales y orientar la elección de materiales de construcción. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la alterabilidad de dos litotipos basálticos, con énfasis en las modificaciones de las propiedades físicas de los agregados. Las muestras fueron recolectadas en una cantera ubicada en Toledo, Paraná, Brasil. Los agregados analizados, con dimensiones entre 6,3 y 9,5 mm, fueron diferenciados en basalto macizo y basalto con microamígdalas de montmorillonita. Se realizaron nueve tipos de ensayos acelerados, incluyendo ciclado natural, ambientes saturados y ciclos de saturación-secado, con control de temperatura y pH del agua, además de un ensayo específico de saturación con CO_2. El uso de metodologías de ciclado acelerado permitió una mejor comprensión del comportamiento de los materiales bajo condiciones adversas. Los resultados destacan la influencia de la mineralogía en la alterabilidad de los basaltos, evidenciando que la agresividad del medio de exposición afecta de forma específica los parámetros físicos del basalto.

Palabras clave: alterabilidad, basalto, ciclado.

INTRODUÇÃO

Os materiais geológicos rochosos, quando utilizados como agregados finos em filtros de drenagem, estão sujeitos a variações na agressividade das águas (como mudanças no pH e nos componentes químicos) e na temperatura. Essas condições afetam o comportamento geotécnico da rocha, resultando em mudanças químicas nos minerais e modificações em suas propriedades físico-mecânicas.

Em algumas barragens, já foram observados processos de precipitação e cimentação em filtros e drenos, com diminuição na capacidade de drenagem e elevação das cotas piezométricas, fato que motivou o presente estudo (Gints et al., 2016; Sterpejkowicz-Wersocki, 2014) .

Entre os fatores intrínsecos da rocha que interferem na alterabilidade, destacam-se o estado microfissural, a textura dos minerais, a estabilidade química, a reatividade e a solubilidade dos minerais constituintes, bem como a presença de argilominerais expansivos, como os do grupo das montmorilonitas (Ahmad et al., 2017; Leyland et al., 2015). Sobre os agentes de intemperismo,

a variação de temperatura pode ocasionar desintegração física devido à diferença nos coeficientes de dilatação de cada mineral constitutivo, como interferir na velocidade das reações químicas. Os processos de formação de minerais secundários também estão bastante associados a mudanças de pH e o dióxido de carbono (CO2) emerge como o principal regulador deste parâmetro em ambientes de águas subterrâneas. Por ser uma fonte estável de carbonatos, a rocha basáltica tem sido valorizada no ciclo do carbono e nas taxas de intemperismo continental (Li & Ji, 2016). Para acelerar as reações de carbonatação e mitigar os efeitos dos gases de efeito estufa, têm ganhado destaque em estudos sobre intemperismo aprimorado; e sobre a injeção de CO_2 em formações geológicas (IPCC, 2005; Milani et al., 2025; Pas et al., 2023; Olivera e Zuquette, 2025). Alguns estudos analisam a influência do armazenamento de dióxido de carbono na porosidade do meio rochoso, que pode ser aumentada nas regiões com predominância de dissolução da rocha, ou diminuída em poros estreitos pela precipitação de carbonatos (Tang et al., 2021).

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é analisar a alterabilidade de agregados de basaltos a partir de diferentes contextos geoquímicos de alteração e por meio de ensaios de laboratório de baixo custo e simples execução, incluindo saturação com CO2. Os ensaios de ciclagem foram conduzidos de maneira a simular diferentes contextos geoquímicos, e os resultados indicam modificações nos parâmetros de absorção de água e de densidade do agregado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foram selecionados agregados de basalto da região de Toledo, Paraná, Brasil. Este local está inserido no contexto geológico da Província Magmática Paraná-Etendeka, Grupo Serra Geral, Formação Paranapanema (Fig. 1-A). Foram selecionados dois litotipos basálticos, sendo um basalto maciço rosado de matriz extremamente fina (T1) e um basalto rosado com microamígdalas de montmorilonita (T2), conforme Fig. 1-B.

Para os ensaios foram selecionados os agregados com dimensões entre 6,3 e 9,5 mm (fração grossa da areia artificial de filtros granulares). As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos inertes à solução, com aproximadamente 400g de agregados e submersos em 400 ml de água de abrasão. Foi desenvolvida uma série ensaios de ciclagem, com foco nos diferentes ambientes de exposição de agregados aplicados em filtros granulares, conforme exposto na Fig. 2. Antes e após ciclagem foram medidos os valores de massa seca em estufa (24 horas à 105°C), massa saturada superfície seca (após 48 horas de saturação) e massa submersa, para cálculo da densidade na condição seca (ρ_s) e absorção de água (α_a). Esses parâmetros foram medidos nos agregados individualizados, agregado por agregado, em balança de pesagem hidrostática de precisão, para melhor análise dos eventos de alteração. Cada conjunto amostral foi composto por dez unidades, diferenciados por litotipo e método de ciclagem.

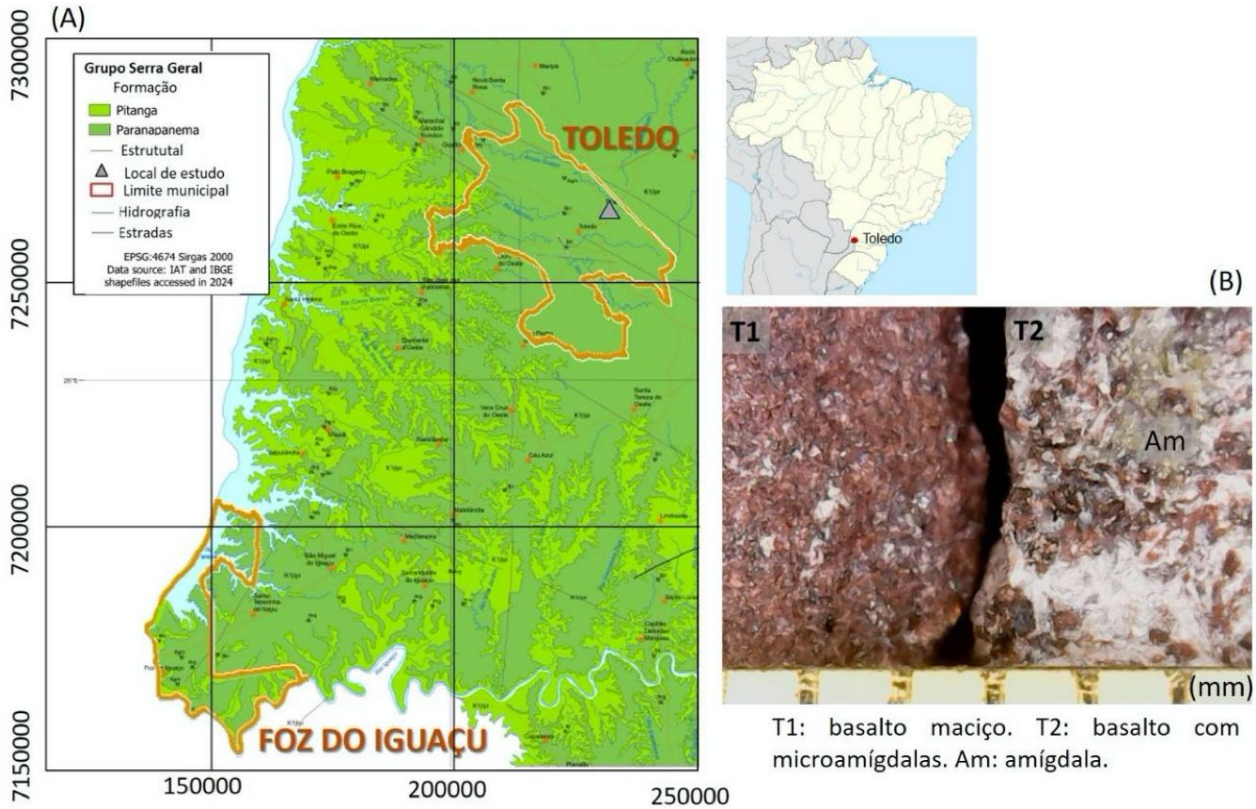


Fig. 1. Área de estudo. (A) Contexto geológico e localização. (B) Superfície dos agregados em escala milimétrica.

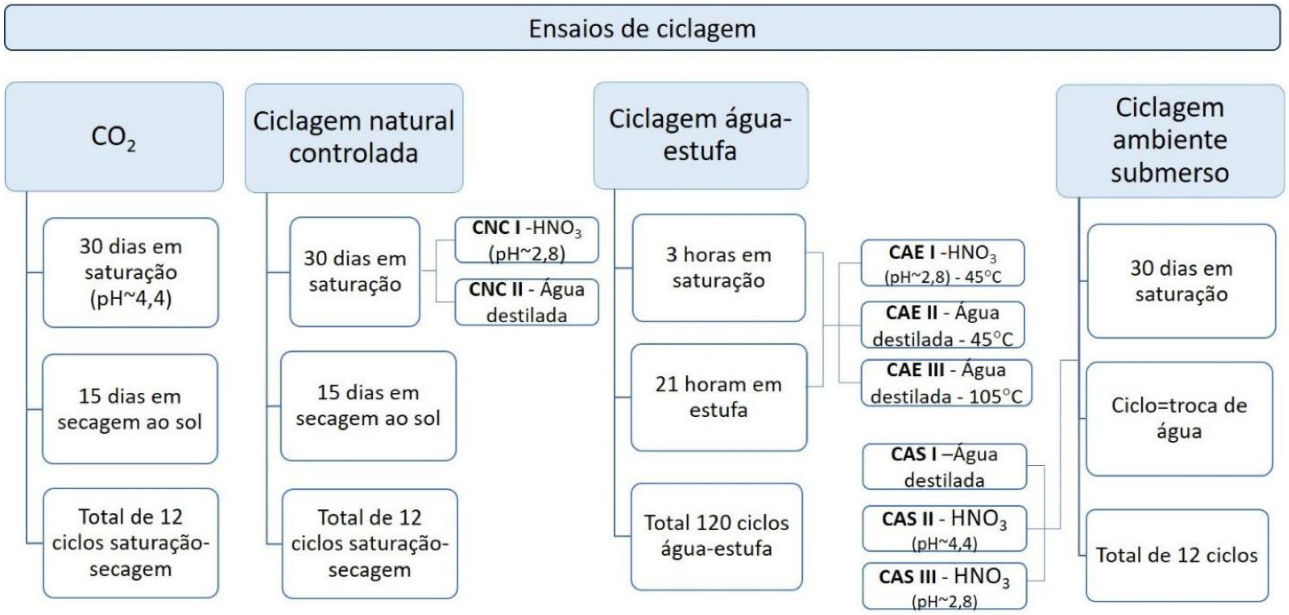
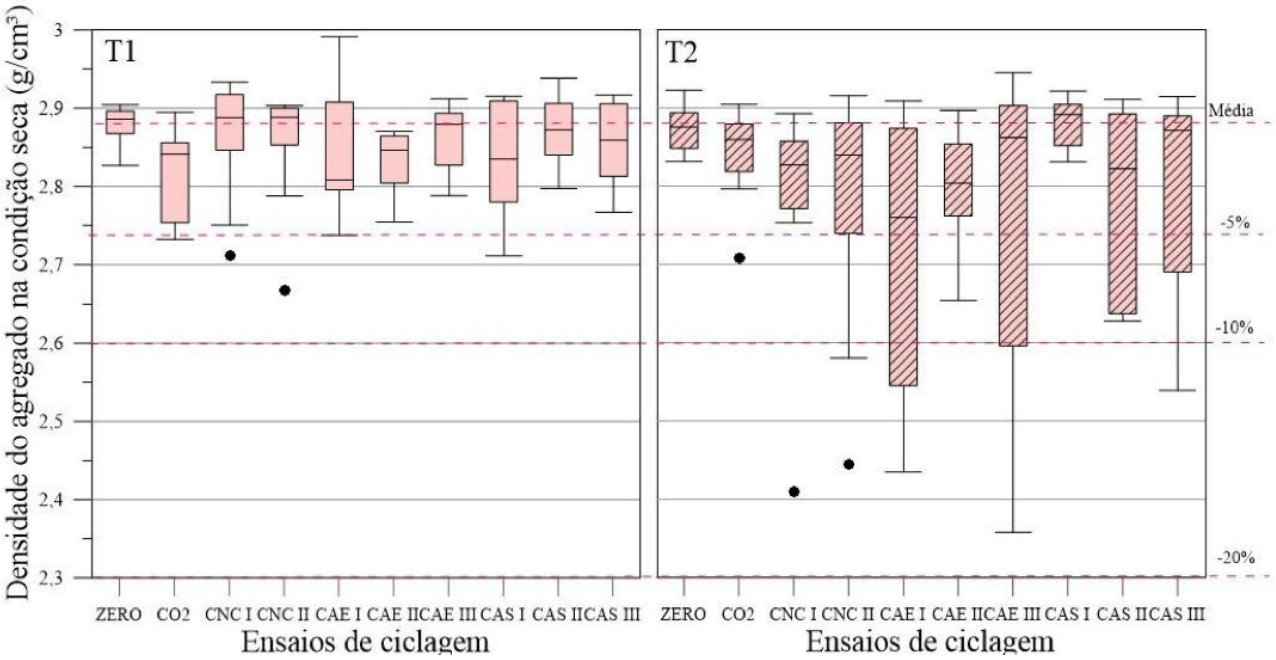


Fig. 2. Ensaios de ciclagem realizados em agregados de basalto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade seca na condição inicial "zero" (sem ciclagem) é semelhante entre os litotipos, com uma média de 2,88±0,03 g/cm³, conforme mostrado na Fig. 3. Ao analisar o intervalo entre quartis, que corresponde a 50% dos dados, observa-se uma tendência de redução na densidade seca, especialmente para a ciclagem com CO_2, que apresentou um valor médio de ρ_s= 2,79±0,1 g/cm³ e limite inferior de 2,6 g/cm³ para o basalto maciço (T1). Para o basalto microamigdaloidal (T2), os ensaios de ciclagem água-estufa (CAE) mostraram resultados mais negativos, com ρ_s= 2,74±0,17g/cm³, e agregados apresentando valores de até 2,4 g/cm³, correspondendo a uma taxa de depreciação de até 20% em relação à condição inicial de ensaio.

Em termos de absorção de água, sem ciclagem, a média para os dois litotipos foi de 1,85±0,5%. No basalto maciço rosado T1, após ensaios de ciclagem, os valores de α_a aumentam para até 3%, o que representaria uma elevação de 50% (Fig. 4). No basalto microamigdaloidal T2, foi verificado aumento na dispersão dos dados e amostras chegam a ter aumento de mais de 300%, ao ultra-



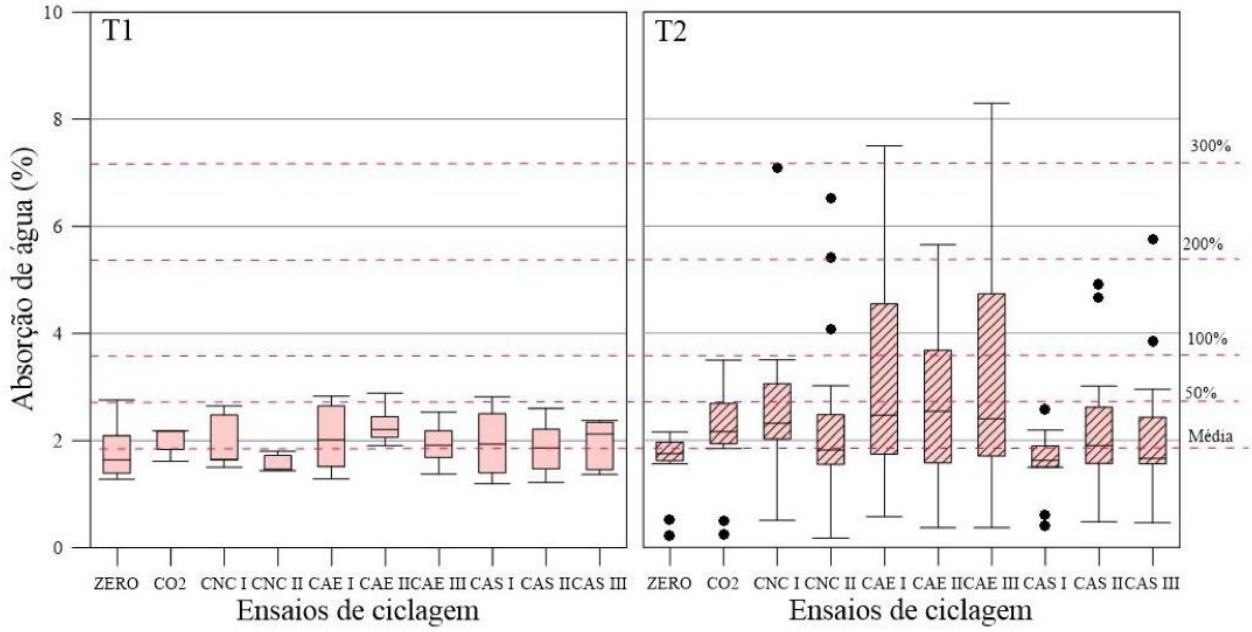
*Legenda de ensaios, ver Fig. 2.

Fig. 3. Resultados de absorção de água em basalto maciço (T1) e amigdaloidal (T2).

passar o valor de 7,2% de absorção de água. Neste litotipo, o ensaio que promoveu maior alteração foram as ciclagem água-estufa (CAE).

A pesquisa revela que a agressividade do meio de exposição, como a variação de pH, temperatura e a presença de CO_2, impacta diretamente as propriedades físicas dos agregados. A análise dos dados mostra que o basalto maciço rosado (T1) e o basalto com microamígdalas de montmorilonita (T2) reagem de maneira diferente sob condições de ciclagem, com o T2 apresentando uma maior taxa de absorção de água e uma redução significativa na densidade.

Esses achados são consistentes com a literatura existente, que aponta que a presença de minerais secundários e a interação com o CO_2 podem alterar as propriedades das rochas (Li & Ji, 2016; Pas et al., 2023). A utilização de ensaios de ciclagem, tanto naturais



*Legenda de ensaios, ver Fig. 2.
Fig. 4. Resultados de absorção de água em basalto maciço (T1) e amigdaloidal (T2).

quanto laboratoriais, se mostrou eficaz para simular as condições adversas que os materiais enfrentam em aplicações práticas, corroborando a importância de metodologias de teste que reflitam cenários reais.

CONCLUSÕES

O estudo realizado sobre a alterabilidade de agregados de basaltos, com foco nas modificações das propriedades físicas sob diferentes condições de ciclagem, oferece contribuições tanto para a engenharia civil, quanto para a área ambiental. Os resultados obtidos demonstram que a mineralogia (presença de argilominerais) e a estrutura dos basaltos (maciço ou amigdaloidal) influenciam sua performance como materiais de construção, especialmente em relação à utilização de filtros, e para técnicas de armazenamento de CO_2.

A agressividade do meio de exposição, como variações no pH e a presença de CO_2, altera as propriedades físicas dos agregados. Os resultados indicam que a injeção de CO_2 em formações rochosas, embora promissora, requer estudos específicos a longo prazo para avaliar o impacto dessas técnicas sobre a densidade e a integridade das rochas. A modificação da densidade da rocha pode influenciar não apenas a capacidade de armazenamento, mas também a estabilidade geotécnica das formações rochosas. (de Oliveira & Zuquette, 2025)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Itaipu Parquetec pelo apoio financeiro na pesquisa.

REFERÊNCIAS

Ahmad, M., Ansari, M. K., Singh, R., Sharma, L. K., & Singh, T. N. (2017). Estimation of petrographic factors of Deccan basalt using petro-physico-mechanical properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76*(4), 1521–1534. https://doi.

org/10.1007/s10064-017-1061-0

Gints, A. V., Lopatina, M. G., Gusakova, I. N., & Gerasimova, E. V. (2016). Impact of the formation and accumulation of homogeneous ferriguinous compounds on the condition and efficiency of earthen dam drainage at Nizhegorodskaya HPP. *Power Technology and Engineering, 49*(6), 412–418. https://doi.org/10.1007/s10749-016-0638-2

IPCC. (2005). *Carbon Dioxide Capture and Storage* (B. Mets, O. Davidson, H. Coninck, M. Loos, & L. Meyer (eds.)). Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Leyland, R. C., Verryn, S., & Momayez, M. (2015). Smectite clay identification and quantification as an indicator of basic igneous rock durability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74*(3), 981–989. https://doi.org/10.1007/s10064-014-0669-6

Li, C., & Ji, H. (2016). Chemical weathering and the role of sulfuric and nitric acids in carbonate weathering: Isotopes (13C, 15N, 34S, and 18O) and chemical constraints. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences, 121*(5), 1288–1305. https://doi.org/10.1002/2015JG003121

Milani, D., McDonald, R., Fawell, P., Weldekidan, H., Puxty, G., & Feron, P. (2025). Ex-situ mineral carbonation process challenges and technology enablers: A review from Australia's perspective. *Minerals Engineering, 222*(December 2024). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109124

Pas, E. E. E. M., Hagens, M., & Comans, R. N. J. (2023). Assessment of the enhanced weathering potential of di erent silicate minerals to improve soil quality and sequester CO. *Frontiers in Climate, 4*, 15. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fclim.2022.954064

Oliveira, P. C. & Zuquette, L. V. (2025). Prediction of physical-mechanical properties, CO2 capture, and storage in accelerated weathering of basaltic rocks from the Serra Geral Group. *Journal of South American Earth Sciences,* 165(105677), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105677

Sterpejkowicz-Wersocki, W. (2014). Problem of clogging in drainage systems in the examples of the Żur and Podgaje dams. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics*, 61(3–4), 183–192. https://doi.org/10.1515/heem-2015-0012

Tang, Y., Hu, S., He, Y., Wang, Y., Wan, X., Cui, S., & Long, K. (2021). Experiment on CO2-brine-rock interaction during CO2 injection and storage in gas reservoirs with aquifer. *Chemical Engineering Journal, 413*(July 2020), 127567. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127567

SUBSIDENCIA DE SUELOS EN MÉDANO DE ORO, DEPARTAMENTO RAWSON, SAN JUAN

Julio F. Ortiz[1,2], Pablo A. Ormeño[1]
[1]Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina.
[2]Glencore Pachón. San Juan, Argentina.
Mail de contacto: ormenopablo@unsj-cuim.edu.ar

RESUMEN
En la parte distal del abanico aluvial del río San Juan, pocos kilómetros al este de la ciudad capital homónima, se desarrolló una extensa zona de descarga, por el efecto combinado de los altos niveles de los acuíferos del valle de Tulum (Rocca, 1969, Suvires y Luna 2008), en el sector distal del abanico, con suelos finos de baja permeabilidad relativa (Liotta, 2011), y de la configuración tectónica de su basamento. La presencia de lagunas y bañados permitió una fuerte colonización vegetal, que generó suelos orgánicos, con intercalaciones de suelos limosos. Actualmente el nivel freático se encuentra a más de 10 metros de profundidad.
En este trabajo se analizaron los daños sufridos por obras civiles tales como viviendas, entubación de pozos, postes y pasantes. También se describieron grietas en el suelo.
Además, se recopilaron los registros de niveles freáticos de pozos de agua al momento de la perforación (década del 60) (perfiles de INA-CRAS), y se consultó la información de diarios locales que reportaban incendios subterráneos.
También se recabó el testimonio de un poblador de la zona.
La información referida a la variación del nivel freático se utiliza para hacer un perfil en función del tiempo.
Se concluye que, en 30 años a partir del 1990, la superficie del suelo estudiado sufrió una subsidencia variable entre 1,20 y 1,50 metros, debido a múltiples factores, entre ellos el marcado descenso del nivel freático, los incendios subterráneos de niveles orgánicos del suelo, y la ocurrencia de fenómenos de licuefacción.

Palabras clave: subsidencia de suelos, asentamiento, descenso freático

ABSTRACT
In the distal part of the alluvial fan of the San Juan River, a few kilometers east of the capital city of the same name, an extensive discharge zone developed due to the combined effect of the high levels of the aquifers of the Tulum Valley in the distal sector of the fan, with fine soils of low relative permeability, and the tectonic configuration of its basement. The presence of lagoons and marshes allowed for strong plant colonization, which generated organic soils, interspersed with silty soils. The water table is currently more than 10 meters deep.
This work analyzed the damage suffered by civil works such as housing, well casings, poles, pipelines, and roads. Cracks, bending, tilting, and undermining were observed. Cracks in the ground were also described.
In addition, records of groundwater levels from water wells at the time of drilling (1960s) were collected, and information from local newspapers reporting underground fires was consulted.
The testimony of a resident of the area was also collected.
Information regarding the variation in the water table is used to create a profile over time.
It is concluded that, in the 30 years since 1992, the studied soil surface suffered a variable subsidence between 1.20 and 1.50 meters, due to multiple factors, including the marked drop in the water table, underground fires in organic soil levels, and the occurrence of liquefaction phenomena.

Keywords: soil subsidence, settlement, water table descent

INTRODUCCIÓN

Este trabajo resume parte de los estudios realizados durante el año 2021 y 2022 por el autor, con el objetivo de cumplir con los requisitos de su tesis de Licenciatura en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan (Ortiz, 2022).

Estos estudios fueron realizados con el objetivo de conocer la causa de los severos daños sufridos por las obras civiles del área de estudio, tales como bases de postes de hormigón, pasantes, viviendas, caminos asfaltados, etc. Al observar los efectos sobre la infraestructura asentada sobre el terreno, o con profundas bases en este, es evidente que sus daños reflejan la acción de un fenómeno lento y permanente, identificado como subsidencia del suelo. Este, estaría vinculada a un proceso de deshidratación asociado al

descenso del nivel freático, el que durante la década del 80 se encontraba aflorando, formado extensos humedales (Salvioli, 2012).

La zona de estudio representa un área aproximadamente rectangular de rumbo NE/SO, de 2 km en sus lados mayores, por 0.78 km en sus lados menores, cubriendo una superficie de 156 hectáreas. Se encuentra comprendido entre las calles Santa Teresa (por el Norte), Labrador (por el Oeste), Las Mercedes (por el Sur) y la Ruta Prov. N°5 o Alfonso XIII (por el Este) (Figura 1). Corresponde a un sector distal del abanico del río San Juan.



Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio

Por ser un área periódicamente inundable, en la zona de Médano de Oro no se construyó la red de canales de riego que distribuyen el agua del río San Juan, y también de algunos pozos, que cubren el resto del área cultivable del valle de Tulum. La perforación de pozos para el abastecimiento de agua, y las acequias para su distribución local, se hicieron necesarias en periodos de sequía, tal como aquel que afectó la zona en la década del 60.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos planteados se realizan las siguientes tareas:

1. Se recopilan los niveles freáticos de pozos perforados durante los años 1961, 1968 y 1969, a partir del registro de seis (6) perfiles geológicos brindados por el Instituto Nacional del Agua subgerencia Centro Regional de Aguas Subterráneas (INA-CRAS) delegación San Juan, que se dedica a la investigación integral de los recursos hídricos subterráneos de la provincia.
2. Se confecciona un mapa indicando la posición de los pozos sobre una imagen satelital Google Earth.
3. Se realiza un relevamiento de los daños estructurales que afectan a distinta infraestructura, tanto pública como privada.
4. Se hacen observaciones de fallas en el suelo, y mediciones tanto superficiales, como de nivel freático de pozos.
5. Se recaba información publicada en diarios locales y de Capital Federal, acerca de los incendios subterráneos.
6. A efectos de determinar la presencia de agua en superficie, se analizan fotos aéreas del año 1973, de vuelos realizados por el Instituto Foto Topográfico Argentino, provistas por el Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.
7. Se incorporan datos de medición del nivel freático en 1976 por el INTA, en la clasificación de los suelos del Complejo Médano de Oro en el Valle de Tulum.
8. El testimonio de un poblador de la zona, Sr. José Bibiloni (70 años), aportó información precisa y verificable acerca de las obras, y la problemática hídrica de la zona.
9. Mediante freatímetro eléctrico se procede a la medición del nivel freático del pozo de agua ubicado en calle Las Mercedes antes de calle Alfonso XIII.
10. A partir de la información recabada se elabora una gráfica mostrando el nivel freático en el tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recopilación de perfiles de pozos

Como primera actividad se recopila a la información de perfiles del INA-CRAS, de 6 pozos perforados en el área entre los años 1961 y 1968, a partir de la que se realiza el siguiente mapa (Figura 2).



Figura 2. Distribución de los pozos de agua en la zona de estudio. Se destacan los dos utilizados para hacer mediciones en terreno para este trabajo, el pozo 1146 (1968) (abandonado) y la perforación privada (en producción).

Evidencias de la subsidencia de suelos

Obras civiles afectadas

Se realiza la medición de la altura del caño horizontal, destinado a la salida del agua extraída, de dos pozos de agua, uno de ellos en actividad, ubicado en una zona donde aparentemente no existe, o no se puede verificar, subsidencia del terreno (a 2,8 km al norte del área estudiada), y el otro, abandonado, en el sector central de la zona de estudio. El primero, pozo Nº 1233 que se ubica en calle Alfonso XIII y calle 5 (Figura 3), se encuentra a una altura de 1,15 m desde la superficie del suelo. En el segundo, referenciado como pozo N° 1146, perforado por el INA-CRAS (Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Agua Subterránea), se midió una altura relativa de 2,20 m (Figura 3), estimándose entonces una subsidencia del suelo en este sector de aproximadamente 1 metro.

Otras evidencias observadas se relacionan a la pérdida de la contención de la base de columnas de hormigón del tendido eléctrico ubicado sobre calle Alfonso XIII, entre calle Mayorga y la continuación oriental de calle 7. Se realizó la medición entre la parte superficial del bloque, y el nivel actual del suelo, obteniendo como resultado 1,42 m (Figura 4).

El Sr. José Bibiloni (70 años) manifiesta que los postes de hormigón del tendido eléctrico fueron instalados en el año 1971, con la parte superior de los bloques de fundación a nivel del terreno.

En la edificación abandonada que se ubica sobre calle Alfonso XIII entre calle Mayorga y la extensión oriental de calle 7, se observa a simple vista, la fuerte inclinación hacia el oeste del baño exterior de una vivienda, por asentamiento diferencial del suelo.

En el sector central de la zona de estudio, se observa un pasante, que permitía el paso, por debajo de calle Alfonso XIII, del agua de un canal que seguía calle Mayorga. Esos canales actuaban como desagües superficiales del exceso hídrico provocado por el elevado nivel del acuífero libre, y conducían las aguas hacia sectores topográficamente más bajos.

Este pasante de hormigón muestra su pared sur vencida hacia adentro por el peso del relleno del terraplén y subsidencia diferencial.



Figura 3. Comparación de la altura del caño horizontal de dos (2) pozos de perforación de agua, respecto al nivel del suelo.

Grietas en el suelo

Las grietas se presentan en el suelo, en el borde centro-oriental de la zona de estudio. Su distribución es lineal (entre 3,00 m y 4,00 m), se cortan de manera perpendicular, con bordes irregulares (Figura 6).

Otras no se evidencian sobre la superficie del terreno, hasta que se camina por el sector y el peso propio genera el hundimiento. Pueden llegar a tener una profundidad de un metro aproximadamente.

Podrían ser manifestaciones de escape de agua de procesos de licuefacción local, asociados a la ocurrencia de sismos.



Figura 4. Altura del terraplén de calle Alfonso XIII y la base del poste de hormigón, respecto al nivel del suelo (2021).

Otros antecedentes ordenados de forma cronológica

Del análisis de fotos aéreas de 1973 pertenecientes al CEFOCCA, se verifica la ausencia de zonas inundadas, pantanos o ciénagas, que pudieran indicar que el nivel freático estuviera por sobre la superficie del suelo en este sector.

En 1976, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en su informe final sobre el estudio de los suelos y drenaje del Valle de Tulum, realiza una clasificación de los suelos, mencionando que corresponden al Complejo Médano de Oro, indicando que son suelos turbosos de hasta 1,50 metros de profundidad, asentados sobre subsuelo de distinta granulometría y en algunos casos limitado por capas calcáreas o yesosas. Además, tiene otra característica distintiva y es la presencia de una capa freática muy cercana a la superficie, que llega en limitados sectores hasta la superficie misma.

El aporte testimonial realizado por José Bibiloni indica que: “durante el año 1979 había agua por todos lados”.

Respecto al incendio subterráneo que se ocasionó en el mes de abril de 1997 en el Médano de Oro, el diario Clarín realiza una nota periodística titulada “San Juan: ya se perdieron 800 ha muy fértiles: se propagan los incendios por grietas bajo tierra”. En el



Figura 5. Asentamiento diferencial sobre el suelo producto de la subsidencia del terreno.

desarrollo de la noticia indica: "Varias son las causas que originan el problema surgido a mediados de 1996, aunque los expertos se inclinan fundamentalmente por el descenso de las napas de agua (de 50 centímetros bajo el suelo a más de cuatro metros en los últimos cinco años)".

Medición de Nivel Freático

Por último, se realizó la medición del nivel freático sobre el pozo de agua, ubicado sobre calle Las Mercedes. La profundidad verificada fue de 8,50 m.

Esquema de ascensos y descensos del nivel freático

Con la información recabada de antecedentes varios, del testimonio de poblador local y de las mediciones realizadas en terreno, se confeccionó un esquema que representa la variación histórica del nivel freático con respecto al nivel del suelo, desde 1960 hasta el año 2021 (Figura 7). Se considera Nivel 0 al nivel del suelo desde la década del 60 (en que se perforaron los pozos para el abastecimiento de agua) a 1990, periodo en que no se conocen las variaciones que el mismo pueda haber sufrido.

Asimismo, se incorporan los incendios subterráneos que fueron registrados por diarios provinciales y/o nacionales durante los años 1997, 2012 y 2015.

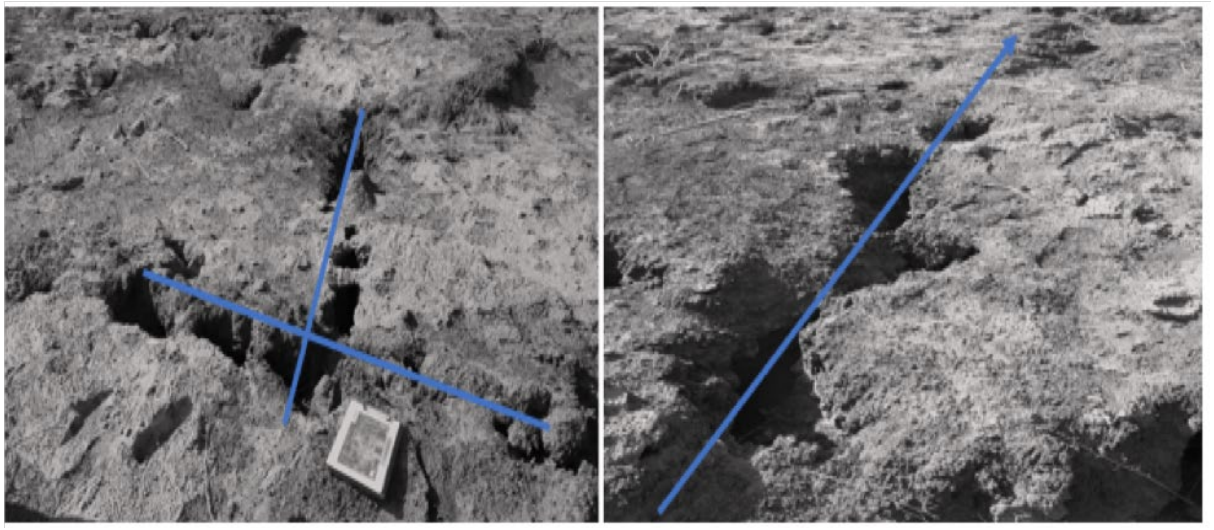


Figura 6. Grietas sobre el suelo.

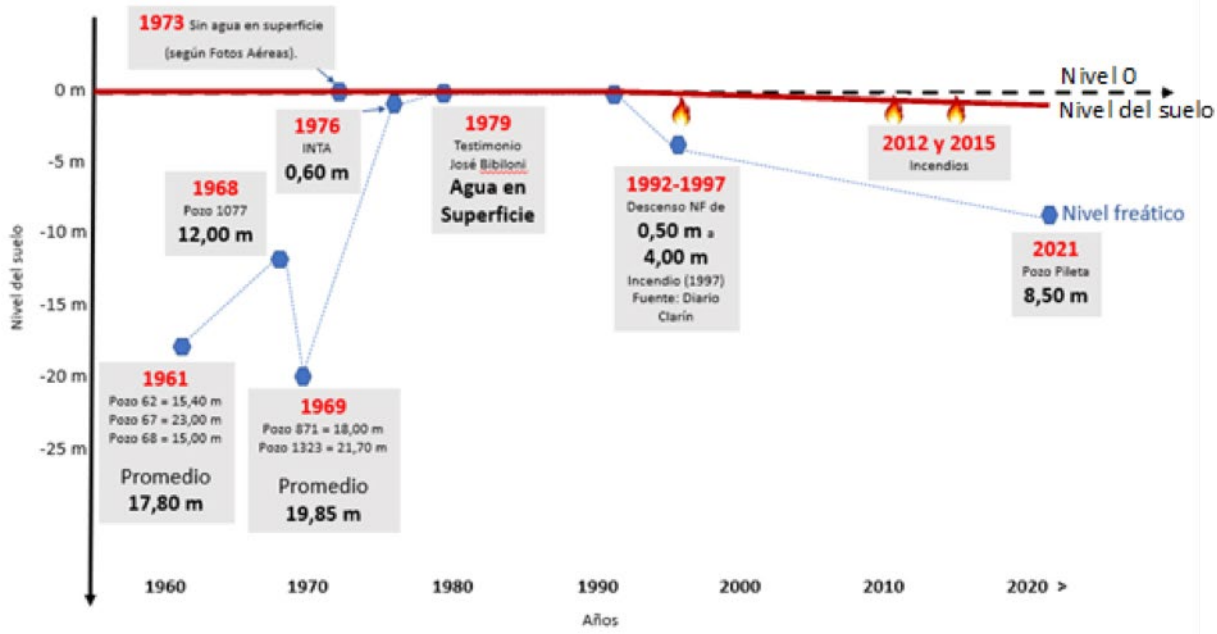


Figura 7. Registros de variación histórica del nivel freático de la zona de estudio, desde 1960 hasta la actualidad.

CONCLUSIONES

Del análisis realizado, se concluye que:

1. Desde 1960 el nivel freático de este sector del Médano de Oro, ha sufrido fuertes variaciones, desde más de 15 metros bajo la superficie, pasando por un periodo de más de una década, al menos desde 1978-1979 hasta 1990 en que afloraba. A partir de 1990 comienza la etapa actual de descenso.

2. Desde el año 1990, en que el nivel freático ha ido descendiendo en forma paulatina, el suelo ha sufrido una subsidencia lenta producida por la pérdida de volumen por deshidratación, hasta alcanzar 1,20 a 1,50 metros en la vertical (al año 2021).

3. La ocurrencia de fenómenos de licuefacción, con asociado escape de agua y fracciones limo-arena fina, y posterior colapso de niveles superiores del suelo, es otro proceso que podría haber contribuido a la subsidencia.

4. Los incendios subterráneos son evidencia de que el nivel freático se encuentra al menos 2 metros por debajo de la superficie del suelo. La combustión elimina la estructura vegetal que forma el soporte estructural de los niveles turbosos, generando el colapso de los niveles superiores en los sectores afectados, y acentuando la subsidencia general.

5. La zona estudiada ha sido afectada por una marcada desertificación, producto de la falta de agua, causada por el descenso del nivel freático y la falta de mantenimiento de los pozos perforados para su provisión. A lo mencionado se agrega la migración de antiguos pobladores, quienes perdieron viviendas e instalaciones agrarias debido a las fallas en el terreno, y a los incendios subterráneos que además de la combustión, tornaban el aire irrespirable por el humo generado.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. José Bibiloni, quién muy amablemente brindo información valiosa de la problemática de suelos, hídrica y agrícola del área estudiada.

A Leandro Salvioli (INA-CRAS) por posibilitar el acceso a los perfiles geológicos de pozos perforados por esa institución.

REFERENCIAS

Diario Clarín (1996). San Juan: ya se perdieron 800 ha muy fértiles. https:// www.clarin.com/ sociedad/propagan-incendios-grietas-tierra_0_rkHeV7W-Rtl.html

Diario Tiempo de San Juan (2012). El fuego invisible arrasa el Médano. https:// www.tiempodesanjuan.com/sanjuan/2012/4/7/fuego-invisible-arrasa-medano-8486.html

Diario Tiempo de San Juan (2015). https://www.tiempodesanjuan.com/sanjuan/2015/4/2/ definen-protocolo-contra-fuegos-subterraneos-84133.html

Fotos Aéreas (1973). Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan

INA-CRAS (1961-1968). Perfiles geológicos de pozos. Biblioteca de INA-CRAS

INTA (Estación Experimental San Juan) 1976: Estudio de suelos y drenaje de los valles de Tulum, Ullum y Zonda, San Juan.

Liotta, M. (2011). Los suelos en los Valles de Tulum, Ullum y Zonda. San Juan. Argentina

Ortiz, J. (2022). Propuesta de fundaciones para obras civiles en un sector con subsidencia de suelos en Médano de Oro, Rawson, San Juan. Tesis de Licenciatura en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. 183 pp.

Rocca. J. (1969). Geología de los valles de Tulum, Ullum y Zonda, Prov. de San Juan. Argentina. Plan de Agua Subterránea. PAS: 1-132.

Salvioli, G. (2012). El agua en la provincia de San Juan. Cátedra libre del agua. INTA-UNSJ.

Suvires, G. y Luna, P. (2008). Unidades geomorfológicas ambientales del sur del oasis del Tulum, Andes Centrales de Argentina. San Juan, Argentina.

TOMOGRAFÍA SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS DE SUPERFICIE PARA LA EVALUACIÓN DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE UN MACIZO

Víctor A. Rinaldi[1], German R. Molina[2]

[1]Laboratorio de Geotecnia, Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

[2]Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611 – Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

Mail de contacto: rmolina@unc.edu.ar

RESUMEN

Los métodos geofísicos de prospección, Tomografía Sísmica de Refracción (SRT - Seismic Refraction Tomography) y el Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves), son métodos ampliamente utilizados en el campo de la geotecnia y de la mecánica de rocas, para determinar modelos geotécnicos estructurales y parámetros geomecánicos de macizos rocosos a profundidades someras.

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir de la evaluación de dos tendidos sísmicos (sísmica de refracción y MASW) y una perforación rotativa con recuperación de testigos de roca hasta 20 m de profundidad, ejecutados a la altura de la progresiva 21+300 del proyecto ejecutivo de la Autovía Punilla. El sector de estudio se encuentra en el tramo final habilitado de dicha autovía, en la localidad de Molinari, Departamento Punilla de la Provincia de Córdoba.

A través de los métodos geofísicos utilizados se pudieron obtener los modelos sísmicos de SRT, los perfiles de velocidad de onda de corte e inferir algunos módulos dinámicos de interés. Adicionalmente, los resultados geofísicos en conjunto con los datos de la perforación permitieron identificar la estratigrafía y complejos litológicos presentes. Asimismo, se pudieron evaluar los parámetros geomecánicas del macizo, con el objeto de definir su calidad y sus condiciones de ripabilidad. Finalmente, en función de las clasificaciones y análisis previos, se establecieron los parámetros de cálculo para la modelación geotécnica estructural y de estabilidad, de los taludes en roca proyectados en el plan de obra en ese tramo de la autovía.

Palabras clave: geofísica, macizos rocosos, caracterización geomecánica

ABSTRACT

The geophysical survey methods, Seismic Refraction Tomography (SRT) and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) are widely used in the field of geotechnics and rock mechanics to determine structural geotechnical models and geomechanical parameters of rock masses at shallow depths.

This work shows the results obtained from the evaluation of two seismic surveys (refraction seismic and MASW) and a rotary drilling with recovery of rock cores up to 20 m depth, executed at the height of the progressive 21+300 of the Punilla Highway executive project. The study sector is located in the final section of the highway, in the town of Molinari, Departamento Punilla, Provincia de Córdoba.

Through the geophysical methods used, it was possible to obtain the SRT seismic models, shear wave velocity profiles and to infer some dynamic modules of interest. Additionally, the geophysical results together with the drilling data allowed us to identify the stratigraphy and lithological complexes present. Likewise, the geomechanical parameters of the massif could be evaluated in order to define its quality and rippability conditions. Finally, based on the previous classifications and analyses, the calculation parameters for the geotechnical structural and stability modeling of the rock slopes projected in the work plan for this section of the highway were established.

Keywords: geophysics, rock mass, geomechanical characterization.

INTRODUCCIÓN

La caracterización geomecánica de macizos rocosos es un paso fundamental en el diseño de obras de infraestructura, particularmente en regiones con geología compleja como las Sierras de Córdoba. Entre las metodologías más empleadas, la Tomografía

Sísmica Refracción y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) (Kearey, et al., 2002) han demostrado ser herramientas efectivas para identificar discontinuidades, contrastes litológicos y cambios en la calidad del macizo (Jacob, et al., 2005; Barton, 2007; Park, et al., 2007; García Aráoz, et al., 2017).

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir de la evaluación de dos tendidos sísmicos (sísmica de refracción y MASW) y una perforación rotativa con recuperación de testigos, ejecutados a la altura de la progresiva 21+300 del proyecto ejecutivo de la Autovía Punilla (ver Fig. 1 y Tabla 1). El sector de estudio se encuentra en el tramo final habilitado de dicha autovía, en la localidad de Molinari, en el Departamento Punilla de la Provincia de Córdoba.

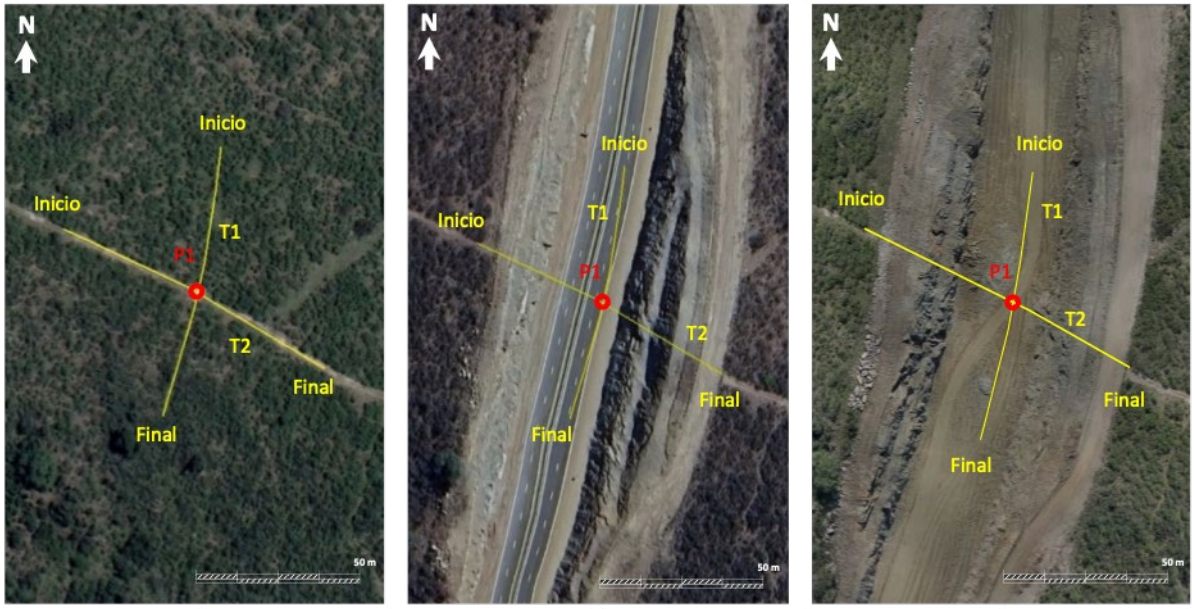


Fig. 1. Ubicación de los tendidos sísmicos y perforación realizados. a) Imagen de Google Earth previo a la obra. b) Imagen de Google Earth finalizada la obra. c) Fotografía aérea al momento de la construcción de los taludes.

El entorno geológico está dominado por el Complejo Metamórfico La Falda. El complejo está constituido en su mayor por paragneises con intercalaciones de ortogneis tonalítico, en porcentajes estimados 80-20% respectivamente. Los gneises están acompañados por muy escasos bancos de mármol y rocas calcosilicáticas.

El objetivo general del trabajo fue determinar los parámetros geomecánicos del macizo rocoso mediante la integración de datos geofísicos (tomografía sísmica de refracción y MASW) con los resultados de una perforación y ensayos geotécnicos. Se busco establecer un modelo de caracterización que permita definir la ripabilidad del material y los parámetros para el cálculo de estabilidad de los taludes en roca proyectados en el plan de obra en ese tramo de la autovía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña de Exploración Geotécnica In-Situ

La campaña de exploración geotécnica in-situ incluyó la ejecución de una perforación rotativa, designada como P1, en la progresiva 21+300 m (ver Tabla 1). Esta perforación fue estratégica para obtener información litológica directa y muestras representativas del subsuelo. Para la perforación en roca se empleó un equipo rotativo Acker de mesa giratoria mecánica y empuje con accionamiento hidráulico, utilizando un sacatestigo de tubo doble con corona diamantada tipo NQ, lo que asegura la recuperación de testigos de alta calidad. La perforación alcanzó una profundidad máxima de 20,30 m.

Prospecciones Sísmicas

Las prospecciones sísmicas consistieron en la ejecución de dos tendidos sísmicos de 115 m de longitud cada uno de ellos. Las coordenadas geográficas de ubicación de cada uno de estos perfiles sísmicos se indican en la Tabla 1. Para realizar las prospecciones sísmicas se utilizó un sismógrafo GEODE de 24 canales de Geometrics Inc., una batería como fuente de energía eléctrica del sismógrafo, un cable sísmico con separación de 5 m para 24 geófonos, 24 geófonos de 4.5 Hz, una masa de 15 kg junto a su cable de disparo o trigger y una PC portátil para el control y almacenamiento de los datos sísmicos provistos por el sismógrafo. El levantamiento de los datos sísmicos se realizó a partir de 5 golpes o tiros de trigger por perfil sísmico. El primer golpe (T1) se efectúo a -10 m de distancia del geófono 1, el segundo golpe se efectuó entre los geófonos 6 y 7 (T2), el tercer golpe se efectuó entre los geófonos 12 y 13 (T3), el cuarto golpe se efectuó entre los geófonos 18 y 19 (T4), finalizando con el quinto golpe a 10 m de distancia del geófono 24 (T5). Los registros sísmicos obtenidos en cada operación servirán más tarde para el procesamiento de los datos

y la obtención de los modelos de tomografía sísmica de refracción y los perfiles de velocidad de onda de corte a través de MASW.

NOMBRE DEL PERFIL SÍSMICO		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		LONGITUD DEL PERFIL [M]
		LATITUD	LONGITUD	
T1	Inicio	31°11'44.40"S	64°29'32.92"O	115
	Final	31°11'46.10"S	64°29'29.13"O	
T2	Inicio	31°11'43.38"S	64°29'30.63"O	115
	Final	31°11'46.70"S	64°29'31.50"O	
Nota: En la intersección de ambos perfiles se realizó la perforación P1 con coordenadas: 31°11'45.16"S, 64°29'30.96"O.				

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de los perfiles sísmicos prospectados y perforación realizados.

Estudios de Laboratorio

Para los estudios de laboratorio, se seleccionaron tres testigos de roca, extraídos de la perforación P1, a profundidades de 10,0 m, 14,5 m y 18,0 m. Sobre estas muestras se realizaron ensayos de compresión simple (CS) siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D7012. Estos ensayos permitieron determinar la resistencia a la compresión simple o UCS (por sus siglas en ingles de Uniaxial Compressive Strength) de la roca intacta. Además, se pudo hacer una descripción del tipo de roca y determinar las condiciones de las discontinuidades.

Caracterización Geomecánica y de Estabilidad para los taludes

En primera instancia se efectuó una descripción geológica de la estratigrafía encontrada, se realizó una determinación del RQD (Rock Quality Designation) según el criterio de Deere et al. (1967), para cada uno de los estratos determinados, teniendo en cuenta los datos provistos por la perforación y los resultados sísmicos. La clasificación del macizo se realizó según el sistema de RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989) y GSI (Geological Strength Index) de Hoek y Brown (1997), incorporando también criterios de ripabilidad basados en el sistema de Weaver (1975) y Chevassu (1976).

La modelación de la estabilidad de los taludes se realizó bajo una condición de equilibrio límite, utilizando el método de Bishop, un método de dovelas ampliamente aceptado para superficies de falla circulares. Se asumió que el macizo rocoso se comporta como un medio continuo, donde los parámetros de resistencia utilizados representan un promedio ponderado de la roca intacta y los sistemas de discontinuidades. Los parámetros resistentes para el modelado de estabilidad de los taludes se determinaron según el criterio empírico de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Fig. 1 y Fig. 2, se muestran los resultados obtenidos de las prospecciones sísmicas (ver Fig. 2 y Fig. 3), indicando los sectores ripables para ambos tendidos. Obsérvese en dichas tomografías que los valores de velocidad obtenidos aumentan en profundidad. Este comportamiento es una clara indicación de una mejora en la calidad del macizo rocoso.

En la Tabla 2, se muestran los resultados sobre la identificación estratigráfica y los parámetros geomecánicas obtenidos para los tres estratos identificados. Queda de manifiesto por los resultados, que el macizo rocoso en el estrato II, es de baja calidad. Mientas que en el estrato III, el macizo rocoso es de calidad media, conformado por roca masiva con sectores fracturados.

ESTRATO	PROFUNDIDAD [M]	VP [M/S]	VS [M/S]	UCS [MPA]	RQD [%]	GSI	RMR
I	0,0 – 0,90	< 600	< 254	-	-	-	-
II	0,9 – 3,50	~1.600	~740	-	< 20	22	Clase IV
III	3,5 – 20,3	~3.400	~1.650	55 - 78	50 – 65	37	Clase III

Estrato I: Sedimentos de arenas limosas con clastos.
Estrato II: Roca muy fracturada y alterada.
Estrato III: Roca masiva con sectores puntuales fracturados.
Ensayos de compresión simple (CS): Muestra A (profundidad 10,0 m): UCS = 55 MPa. Muestra B (profundidad 14,5 m): UCS = 78 MPa. Muestra C (profundidad 18,0 m): UCS = 71 MPa.

Tabla 1. Identificación estratigráfica y parámetros geomecánicas obtenidos.

Finalmente, en la Fig. 4 se muestran los resultados de las modelaciones de los taludes, para el estado inicial y luego de las modificaciones por cortes. En ambos casos se evaluó la condición dinámica con agua. Puede allí observarse la mejora en la estabilidad en el modelado con corte (inclinaciones 1H:2V, bermas de 4 m cada 6 m de altura). Los parámetros de Hoek-Brown para el modelado de los taludes fueron: Estrato II: m = 0,102, s = 3×10^{-6}, a = 0,531. Estrato III: m = 0,458, s = 9×10^{-5}, a = 0,515.

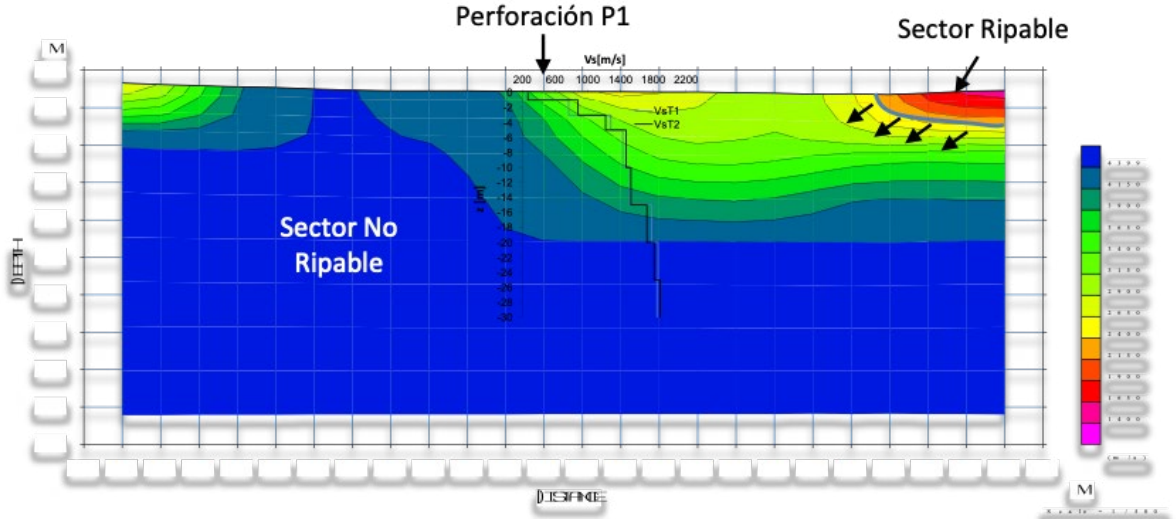


Fig. 2. Tomografía sísmica de refracción y perfil de velocidad Vs, para el tendido T1.

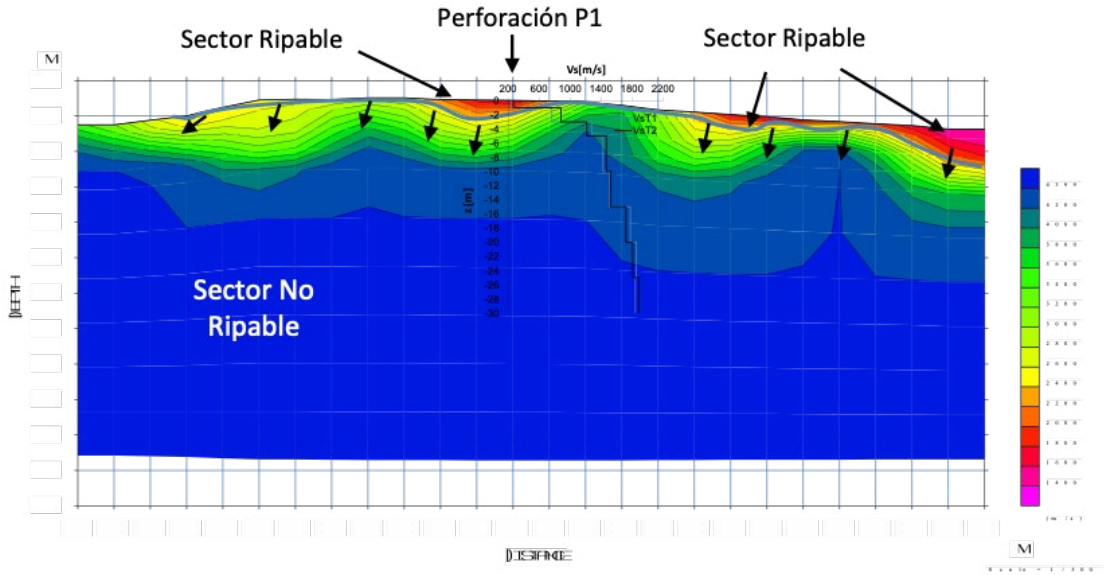


Fig. 3. Tomografía sísmica de refracción y perfil de velocidad Vs, para el tendido T2.

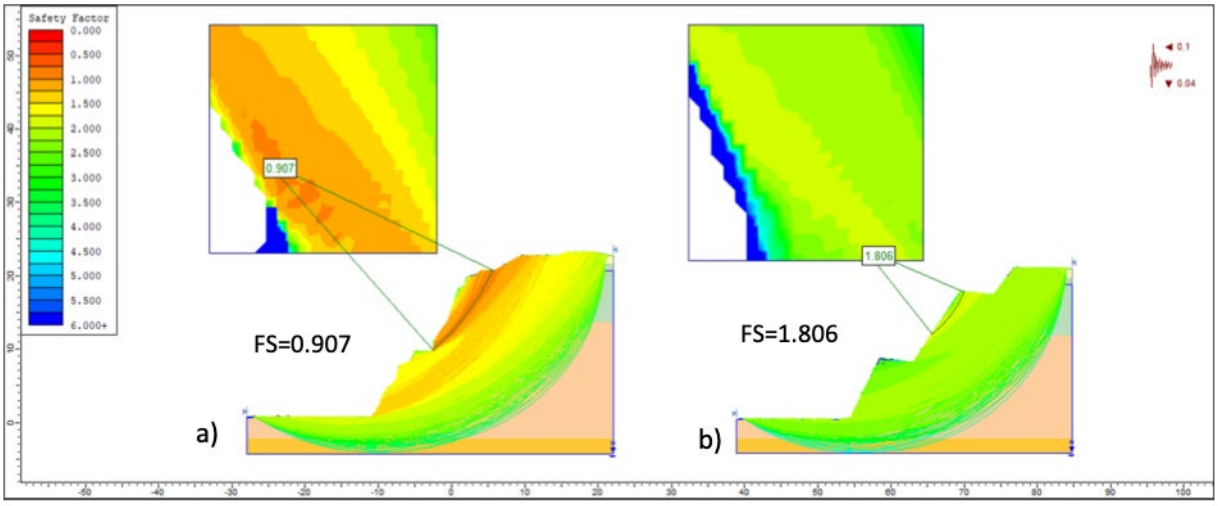


Fig. 4. Resultados de la modelación de la estabilidad de taludes en la progresiva 21+300. a) Estado inicial: condición dinámica con agua (Factor de seguridad 0,907). b) Estado modificado: condición dinámica con agua (Factor de seguridad 1.806). Sismo: aceleración horizontal (0,10g) y vertical (0,04g).

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha demostrado la eficacia de los métodos geofísicos utilizados (Tomografía Sísmica de Refracción y MASW), junto a los datos obtenidos de la perforación P1, para la evaluación geomecánica de macizos rocosos en el contexto de proyectos de infraestructura vial de gran envergadura. La caracterización estratigráfica y la determinación de las velocidades de onda P y S permitieron identificar y diferenciar claramente las unidades geológicas presentes, correlacionando estas unidades con sus respectivas calidades de macizo rocoso y valores de RQD.

La aplicación de los criterios de ripabilidad, basándose en las velocidades sísmicas obtenidas y el criterio de Weaver, resultó fundamental para la planificación operativa de las excavaciones en los cortes profundos cercanos a la progresiva 21+300. Dichos resultados mostraron que gran parte del material rocoso en esta sección no era ripable.

La clasificación del macizo rocoso mediante RMR y GSI, en conjunto con los resultados de los ensayos de compresión simple en roca intacta, proporcionó una base robusta para la determinación de los parámetros geomecánicos de diseño de los estratos. Estos parámetros permitieron realizar la modelación de la estabilidad de taludes, considerando un escenario sísmico, así como los efectos de la descompresión por excavación y la presencia de agua.

REFERENCIAS

Barton, N., 2007. “Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy”. Taylor & Francis Group, London, UK, p.p. 756.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons. ISBN: 978-047160172-2.

Chevassu, G. (1976). La méthode sismique appliquée a l’étude de la rippabilité des roches. Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées, N°83.

Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., & Cording, E. J. (1967). Engineering Classification of Rock Masses for Prediction of Tunnel Support. Technical Report AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico.

García Aráoz, E., Rinaldi, V., Molina, G. R, y Cioccale, M. (2017). Aplicación de la Tomografía Sísmica para la Evaluación de los Parámetros Geomecánicos y Geoestructurales de un Macizo Rocoso. XX Congreso Geológico Argentino, Agosto 2017, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina. DOI: 10.13140/RG.2.2.25097.90725

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. *Proceedings NARMS-TAC Conference*, Toronto.

Jacob, R., Sheehan, William E. Doll, y Wayne A. Mandell, 2005. An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis, Journal of Environ. Eng. Geophysics, V. 10 N° 1: 21-34.

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002) An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd., Oxford.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. The Leading Edge, 26 (1), 60-64.

LA INSUFICIENCIA DEL APORTE TENSIONAL DE EDIFICIOS EN LOS SISMOS INDUCIDOS POR ACTIVIDAD ANTROPOGÉNICA

Ricardo J. Rocca[1], Roberto E. Terzariol[1], Marcelo E. Zeballos[1]
[1]FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba,V.Sarsfield 161, Córdoba, Argentina
Mail de contacto: rjrocca@unc.edu.ar

RESUMEN

La ocurrencia de sismos atribuidos a la actividad humana es motivo de estudios en distintas partes del mundo. Existe una base de datos HI Quake (Human Induced Quake) que los va compilando y tratando estadísticamente. Se basa en fuentes bibliográficas de distintos autores, alguno de los cuales son de baja verosimilitud.

En el caso de las construcciones, HI Quake ha introducido dos casos, el rascacielos Taipei 101 y el túnel ferroviario de Baja Altura de San Gotardo. El caso de San Gotardo está mal asignado, porque se trata de un caso de minería (rockburst).

En el otro caso, el rascacielos Taipei 101, los propios autores de la base tienen dudas pero igualmente lo introducen en HI Quake (en forma conjunta con otros casos muy dudosos).

En este trabajo se plantea el escaso aporte tensional generado por las fundaciones de edificio en la profundidad donde se pueden inducir sismos. Consecuentemente, el aparente aumento de sismicidad en Taiwan, luego de la construcción, se debe a otras causas ajenas al edificio Taipei 101.

Palabras clave: sismos inducidos, actividad antrópica, construcciones.

ABSTRACT

The occurrence of earthquakes attributed to human activity is the subject of study around the world. There is database, Human Induced Quake (HI Quake) that compiles and statistically processes these earthquakes. It is based on bibliographic sources from various authors, some of which are of low likelihood.

In the case of buildings, HI Quake has introduced two cases: the Taipei 101 skyscraper and the Gotthard Low-base Railway Tunnel. The Gotthard case is misassigned because it is a mining case (rockburst).

In the other case, the Taipei 101 skyscraper, the authors of the database themselves have doubts but nevertheless include it in HI Quake (along with other highly dubious cases).

This paper discusses the limited stress contribution generated by building foundations at the depths where earthquakes can be induced. Consequently, the apparent increase in seismic activity in Taiwan after construction is due to causes other than the Taipei 101 building.

Keywords: induced earthquakes, human activity, construction

INTRODUCCIÓN

Los sismos inducidos por actividad antrópica son muy conocidos desde hace varias décadas y están siendo estudiados por organismos como el USGS (Cochran et al 2024), o centros de investigación en distintos lugares del mundo.

Algunas actividades como las petrolíferas son analizadas exhaustivamente por la sociedad (Rubinstein and Mahami, 2015), aunque también hay seguimiento de algunos embalses de ciertas características como volumen y altura (Icold, 2016). La Figura 1 presenta los casos más comunes de sismos inducidos antropogénicamente. Dentro de las alternativas de fuentes de generación de sismos, las menos controversiales son las actividades mineras y geotermales.

Existe una base de datos HI Quake (Human Induced Quake) que ha compilado distintos sismos atribuidos a la actividad humana (Wilson et al, 2017). Se basa en fuentes bibliográficas de distintos autores, alguno de los cuales son de baja verosimilitud.

Cuando se escribió el artículo de presentación en 2018 (Global review of human-induced earthquakes) había unos 700 casos. Foulger (2024) indica que la base contiene algo más de 1300 casos.

La Figura 2 presenta un resumen de casos incluidos en la base HI Quake. Dentro de ella aparecen dos datos de construcciones cuya inclusión puede calificarse como cuestionables.

El caso del túnel de San Gotardo, Suiza, está mal asignado, porque se trata de un tema de minería (rockburst).

En el otro caso, el rascacielos Taipei 101, los autores de la base tienen ciertas dudas en cuanto a su posibilidad de inclusión, pero igualmente lo introducen en la base HI Quake.

En este artículo se trata el tema de la influencia de las construcciones de grandes edificios, que son los que transmiten las cargas

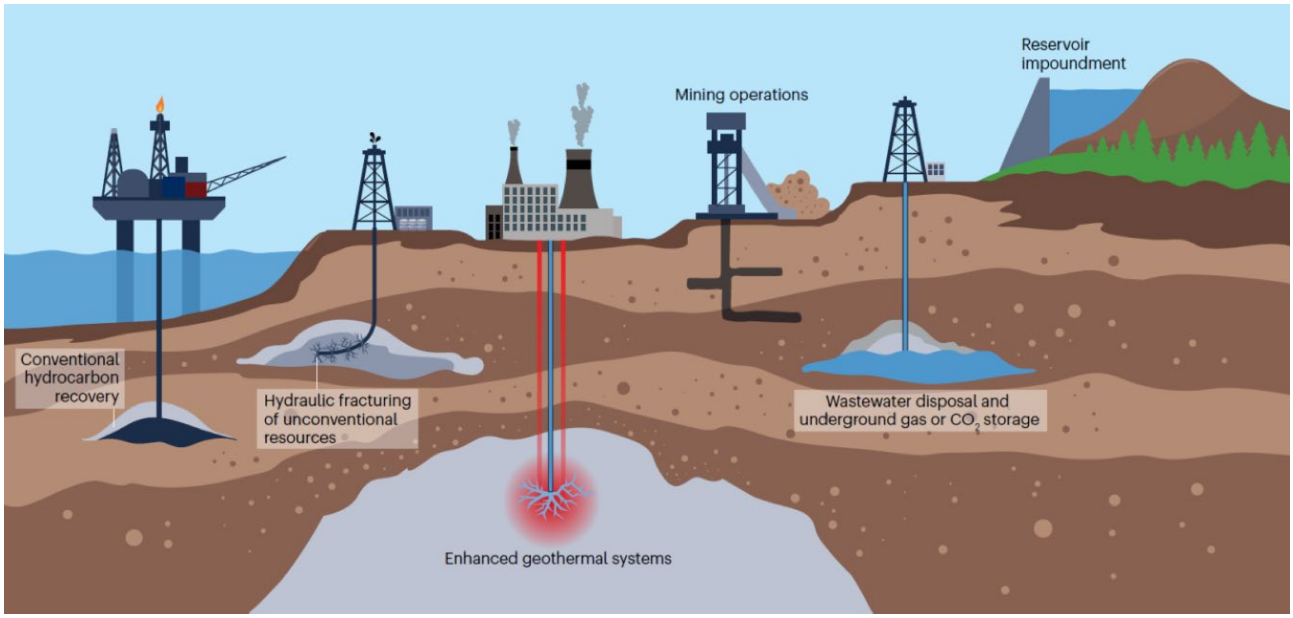


Fig. 1. Generadores antropogénicos de sismos (Moein et al, 2023)

más elevadas al terreno.

Los rascacielos son cada vez más altos y se puede hablar de una competencia entre ciudades para llegar a los 1000 metros de altura (Poulos, 2017). No obstante ello, como la capacidad portante de los terrenos no es ilimitada, lo que va variando son sus fundaciones de manera de transmitir adecuadamente las tensiones (a través de cimentaciones superficiales o profundas). Se discute la posibilidad de que esas tensiones inducidas al terreno puedan incrementar la potencialidad de activar sismos en las proximidades.

Por otra parte, los sismos tectónicos no tienen hipocentros muy superficiales, debido a que es necesaria cierta rigidez de los macizos rocosos para poder acumular la energía de deformación que se libera en un sismo. Las profundidades mínimas están en el rango de 3 a 5 km. (Bullen, 1985).

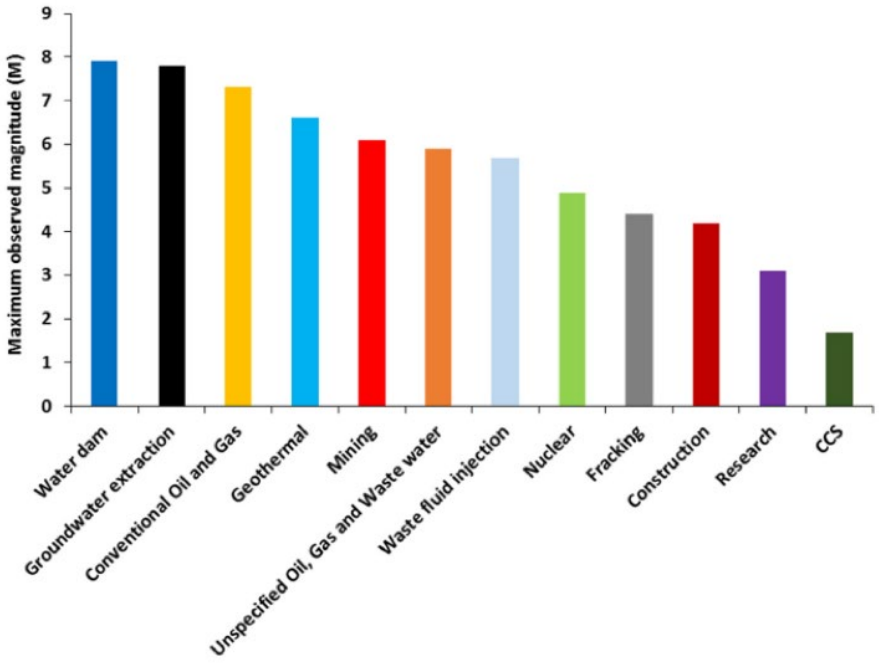


Fig.2. Resumen de casos de la base HI Quake (Foulger et al 2018).

EL CASO DEL RASCACIELOS TAIPEI 101

El edificio Taipei 101 es un rascacielos de 508 metros de altura, que forma parte de un complejo con edificios menores. Es un ícono de Taiwan de 101 pisos y 5 niveles subterráneos. Fue construido en el período comprendido entre 1999 y 2004 (Figura 3), en una región considerada de alta sismicidad.



Fig. 3. Taipei 101 (Lin 2005).

El complejo edilicio tiene una planta de 158 m x 160 m. donde está emplazado el rascacielos cubriendo 87 m x 98 m. separado por una junta vertical (Chin et al, 2009).

Este rascacielos tiene un mecanismo de amortiguamiento de sismos, que ha sido probado exitosamente con movimientos fuertes.

El edificio está fundado con pilotes excavados dentro de sedimentos blandos cuaternarios hasta alcanzar el macizo rocoso terciario (Fm. Kuechulin), situado a profundidades variables de 42 a 69 metros. Los 380 pilotes de 1,5 m de diámetro penetran entre 15 a 30 m de profundidad dentro de las areniscas del macizo, transmitiendo cargas del orden de 14 MN en compresión. El diseño estuvo verificado por numerosos ensayos de carga in-situ hasta 40 MN.

En la base HI Quake el Taipei 101 ha sido introducido como dato tomando en cuenta un supuesto incremento de la actividad sísmica que se habría generado luego de la construcción (Figura 4).

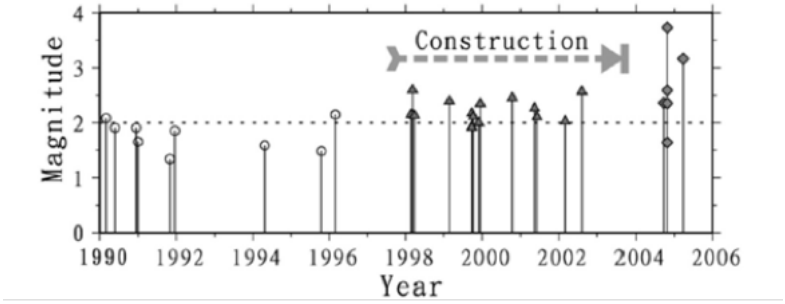


Fig. 4. Sismicidad en Taiwan (Lin 2005).

MECANISMOS DE INDUCCIÓN DE SISMOS

La mecánica de generación de los sismos tectónicos está relacionada con un exceso de tensiones en un plano de falla, por sobre la resistencia al deslizamiento de la misma.

En la Figura 5 se presenta la interpretación de los sismos inducidos graficados en el espacio de Mohr. Las tensiones están graficadas por un círculo, mientras la resistencia de la falla por una recta. Para que se genere el sismo, es necesario que el círculo se intercepte con la recta de resistencia de la falla.

Cuando interviene el agua, se produce un desplazamiento del círculo hacia el origen por aumento de las presiones de poros. Ese es el caso más común de inducción de sismos, por ej. la insumisión de agua en el terreno (Rubinstein et al 2015) o infiltraciones desde un embalse de gran altura (ICOLD 2016, Bullen et al 1985).

En el caso de sólo actúen variaciones de tensiones sin agua, para generar el sismo es necesario incrementar el diámetro circulo de la Figura 5.

El rascacielos Taipei 101 con su planta con un B (lado) = 98 m. transmite a través de los pilotes tensiones que se disipan en profundidad. A unos 10B, las tensiones son inferiores al 10% de la transmitida por los pilotes.

Si se compara con las tensiones existentes en el terreno a la profundidad que se generan los sismos, serian inferiores a 1%. En otras palabras, no se altera el círculo de la Figura 5. Consecuentemente, no es mecánicamente factible inducir sismos con un edificio y el incremento de sismicidad planteado en la figura 4 no puede ser atribuida al Taipei 101.

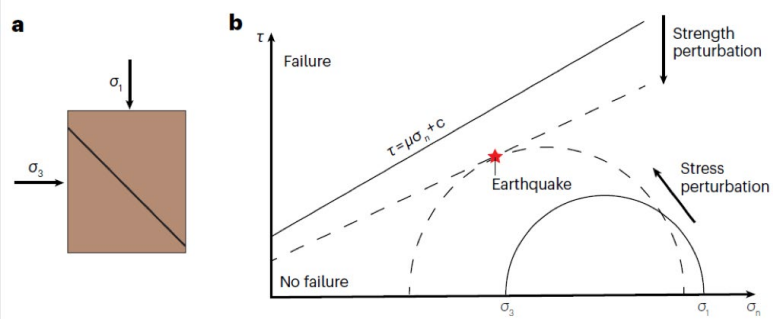


Fig. 5. Interpretación tensional de la inducción de un sismo (Moein et al, 2023)

CONCLUSIONES

Se ha podido documentar numerosos casos de sismos inducidos por actividad antropogénica en los últimos 80 años. La mayoría de ellos están relacionados con insumisión de agua. Se destacan la actividad petrolera, la generación geotermal, y la presencia de presas de gran altura en zonas muy tensionadas.

En el caso de los rascacielos de gran altura, las tensiones de sus fundaciones están restringidas por la capacidad portante de los macizos rocosos. Al disiparse en profundidad, en incremento de las tensiones aportadas por los edificios son insignificantes en las profundidades donde se generan los sismos.

El caso planteado en la base HI Quake, el edificio Taipei 101, no debería ser incluido como causante de un sismo inducido por actividad antropogénica, ya que mecánicamente no es factible generarlo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

Bullen, K.E. and Bolt, B.A. (1985) *An introduction to the theory of seismology*.4th edition. Cambridge U. Press.

Chin, C.T., Chao, H.C. and Chang D.W. (2009). A Retrospection on Foundation Design of Taipei 101. *International Symposium on Urban Geotechnics.* September 25-26. Incheon, Korea.

Cochran, E.S., Rubinstein, J.L., Barbour, A.J., and Kaven, J.O. (2024) *Induced seismicity strategic visión*. U.S. Geological Survey Circular 1509.

Foulger, G.R., Wilson, M.P., Gluyas, J.G., Julian, B.R. and Davies, R.J. (2018) Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178, 438–514.

Foulger, G.R. (2024) HI Quake-a global database of human-induced earthquakes. *GEoREST. Workshop on Induced Seismicity.* Palma de Mallorca, Spain.

ICOLD (2016). *Selecting Seismic Parameters for Larg Dams. Guidelines*. Bulletin 148.

http://www.icold-cigb.org./,

Lin C.H. (2005) Seismicity increased after the construction of the world´s tallest building: An active blind fault beneath the Taipei 101. *Geophysical Reasearch Letters, Vol 32*, L22313, https://doi: 10.1029.2005GL024223.

Moein, M.J.A., Langenbruch, C., Schultz, R., Grigoli, F., Ellsworth, W.L., Wang, R., Rinaldi, A.P. and Shapiro, S. (2023) The physical mechanisms of induced earthquakes, *Nature Reviews Earth & Environment, 4*, 847–863.

Poulos H.G. (2017). *Tall building foundation design*. CRC Press. ISBN 9781498796088.

Rubinstein, J.L., and Mahani, A.B. (2015) Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismological Research Letters, 86*, 1060–1067. https://doi.org/10.1785/0220150067.

Wilson M.P., Foulger, G.R. Gluyas, J.G., Davies, R.J. and Julan, B.R. (2017) HiQuake, The Human-Induced Earthquake Database. *Seismological Research Letters, 88* (6), 1560-1565.

ESTUDIO DE PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN EN VAINA DE SACATESTIGO TERZAGHI Y SU CORRELACIÓN CON PROPIEDADES DEL SUELO EN MUESTRAS INALTERADAS

Sabrina Rouzaut[1], Pablo A. Eveling[1], Marcelo E. Zeballos[2], Carolina Kleymuc[1]
[1]Departamento de Geología Aplicada, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina.
[2]Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sarsfield 1611. Córdoba, Argentina
Mail de contacto: srouzaut@unc.edu.ar

RESUMEN
Los estudios de suelo son requeridos para la fundación de obras civiles. Una de las alternativas de extracción de muestras es a través del empleo del muestreador bipartido de Terzaghi, las propiedades resistentes y deformacionales de los suelos, a través de la interacción suelo-sacamuestra tienen una gran influencia en la muestra recuperada. Las causas pueden deberse: un acuñamiento en la boquilla, rotura de la estructura del suelo o deformación durante su inclusión en el interior de la sacamuestra. En un terreno ubicado en zona sur de la ciudad de Córdoba se realizaron cuatro pozos de ensayos SPT, dos de ellos con la sacatestigo de Terzaghi y dos con un equipo de mayores dimensiones (Oreste-Moretto). Adicionalmente se tomaron muestras inalteradas en el sitio. Se han aplicado distintas metodologías de obtención de las muestras para su posterior ensayo en laboratorio. Los suelos limosos (ML-CL), con una humedad promedio de 13%. De acuerdo con los ensayos de doble edómetro se clasificaron como suelos potencialmente colapsables. Del análisis de resultados se observó una clara tendencia entre menor porcentaje de recuperación y acuñamiento en boquilla de muestreador; el porcentaje de recuperación en el muestreador tipo Terzaghi no varía mucho en estado seco y con vaselina, en cambio en el muestreador tipo Oreste-Moretto se aprecia un comportamiento distinto en los dos estados. Por otro lado, se aprecia una relación entre la magnitud del colapso obtenido del doble edómetro con el menor porcentaje de recuperación de muestra.

Palabras clave: loess, porcentaje de recuperación, sacamuestras

ABSTRACT
Soil studies are required for the foundation of civil works. One alternative for sampling is the use of the Terzaghi split core sampler. The resistant and deformational properties of soils, through soil-core sampler interaction, have a great influence on the recovered sample. The causes may be: wedging of the nozzle, breakage of the soil structure, or deformation during its inclusion inside the core sampler. In a field located in the southern part of the city of Córdoba, four SPT test wells were drilled, two of them with the Terzaghi core sampler and two with larger equipment (Oreste-Moretto). Additionally, undisturbed samples were taken on-site. Different sample collection methodologies have been applied for subsequent laboratory testing. The silty soils (ML-CL), with an average moisture content of 13%, were classified as potentially collapsible soils according to the double oedometer tests. The analysis of the results showed a clear trend toward lower recovery rates and wedging in the sampler nozzle. The recovery rate for the Terzaghi sampler did not vary much in the dry state and with petroleum jelly, whereas the Oreste-Moretto sampler showed different behavior in the two states. A relationship was also observed between the magnitude of the collapse obtained from the double oedometer and the lowest sample recovery rate.

Keywords: loess, sampler, recovery percentage

INTRODUCCIÓN

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT, siglas en inglés) surge en el año 1902, desarrollado por un sondista de la *Raymond Concrete Pile Co.* (Rogers 2006). En todo el mundo, el SPT se ha convertido en una herramienta fundamental para la caracterización de suelos, su simplicidad y bajo costo del SPT, junto con la capacidad de proporcionar información valiosa sobre las condiciones del suelo, han contribuido a su adopción global.

En la ciudad de Córdoba, la implementación del SPT ha sido fundamental para abordar los desafíos geotécnicos locales. La región se caracteriza por la presencia de suelos loéssicos, que pueden ser potencialmente colapsables. Este tipo de suelo requiere una evaluación cuidadosa para garantizar la estabilidad de las estructuras (Reginatto 1970, Francisca et al., 2008; entre otros).

El objetivo de este estudio es determinar si las propiedades de resistencia y deformación de los suelos, a través de la interacción entre el suelo y el sacamuestras, son factores determinantes en la recuperación de la muestra. Las consideraciones incluyen:

acuñamiento en la boquilla, rotura de la estructura del suelo o deformación durante su inserción en el sacamuestras. Este último aspecto puede deberse a una deformación extrema de la muestra, lo que generaría una disminución en la relación de vacíos y/o incrementaría la fricción en las paredes de la vaina.

MATERIALES Y MÉTODOS

A fines de establecer las variables que afectan el porcentaje de recuperación de las vainas Terzaghi se realizó la extracción de muestras con un equipo SPT hidráulico y normalizado en un terreno localizado en la zona sur de la ciudad de Córdoba, Barrio Valle Cercano, cuyas coordenadas 31°29'8.47"S, 64°13'11.63"O (Fig. 1).

Se realizaron cuatro pozos, de los cuales dos de ellos fueron muestreados con vaina del tipo Terzaghi y dos con vaina de tipo Oreste-Moretto, se extrajeron una totalidad de 20 muestras. En dos de los pozos, ambas vainas fueron cubiertas con vaselina, de manera de minimizar la fricción provocada por el ingreso del suelo en la vaina. Se tomaron muestras, tanto de la vaina como de las boquillas. Por otro lado, se tallaron 4 panes de suelo de 30 cm de lado, para determinar los pesos unitarios.

De los panes de suelo se tallaron probetas cilíndricas idénticas de 63,5 mm de diámetro y 32 mm de altura. Para ser sometidas a ensayos de presión confinada tipo doble edómetro; en condición de humedad natural y la otra en condición saturada.

De la totalidad de las muestras se determinó el porcentaje de humedad (%ω) y el peso unitario seco (Y_d).

Todas las muestras fueron clasificadas de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.



Fig.1 Ubicación del área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los pesos unitarios secos (Y_d) obtenidos corresponden con un suelo loéssico rondan entre 13,8-14,5 gr/cm^3 similar al rango publicado por Rinaldi et al., (2007), cuyas humedades se encuentran entre 15-20%; siendo relativamente elevados, en algunos casos. Sin embargo, se puede atribuir al momento de toma de muestra ya que fue durante la época estival coincidiendo con la estación lluviosa. En cuanto al material del suelo estudiado se clasificaron como ML-CL, la totalidad de las muestras.

A continuación, en la Tabla N° 1 se encuentra los cuatro sondeos, con los muestreadores empleados y si poseen o no material lubricante y las profundidades de cada muestra.

SONDEOS	CONDICIONES Y MUESTREADOR EMPLEADO	MUESTRAS	PROFUNDIDAD
S1	Terzaghi "viejo" sin vaselina	M1	-0.50 m
S2	Terzaghi "nuevo" con vaselina	M2	-1.00 m
S3	Moretto sin vaselina	M3	-1.50 m
S4	Moretto con vaselina	M4	-2.00 m

Tabla 1. Equivalencias entre nomenclatura de las muestras, tipo y características del sacamuestras.

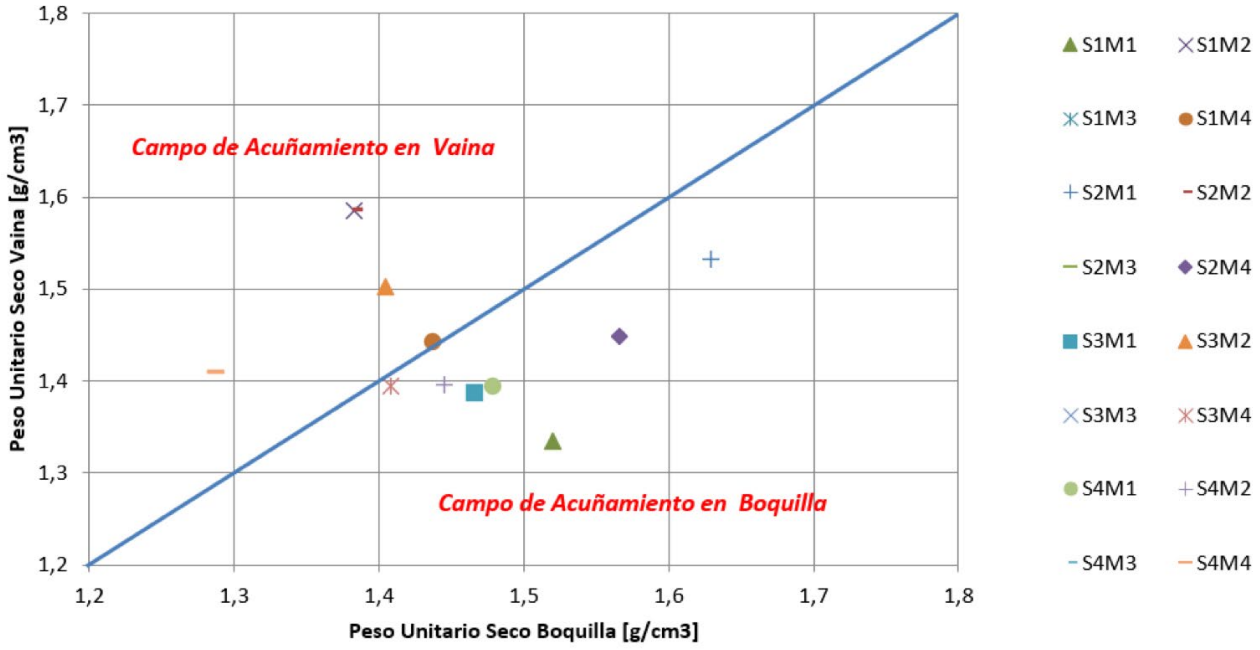


Fig. 2. Peso unitario seco vaina vs. peso unitario boquilla

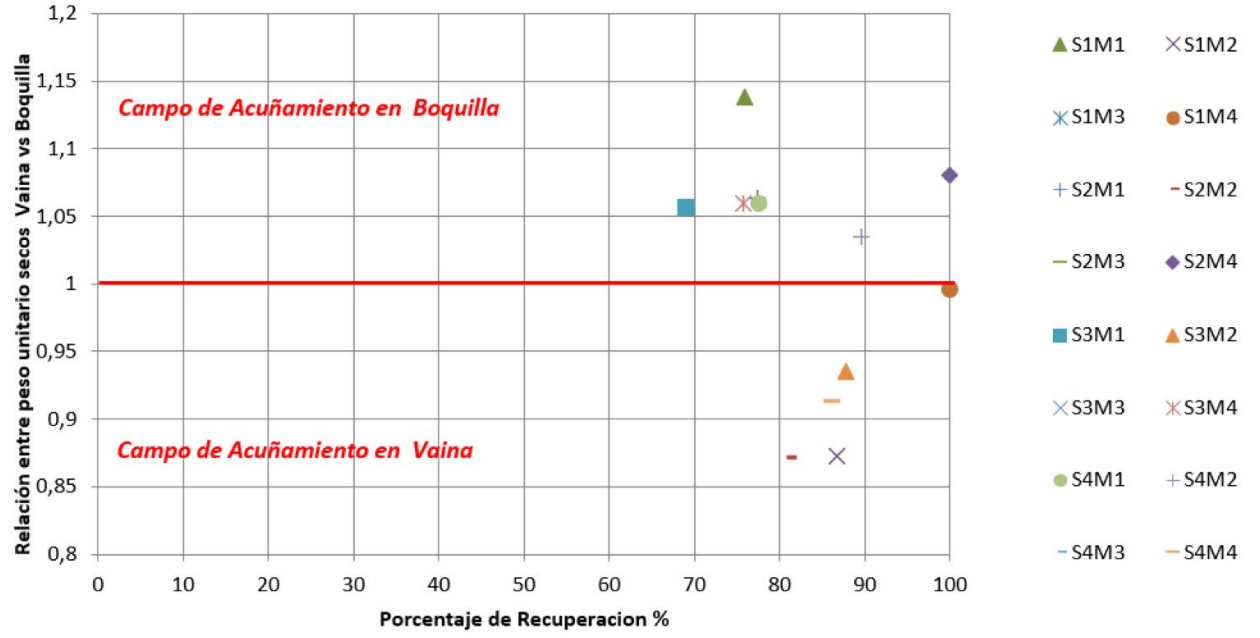


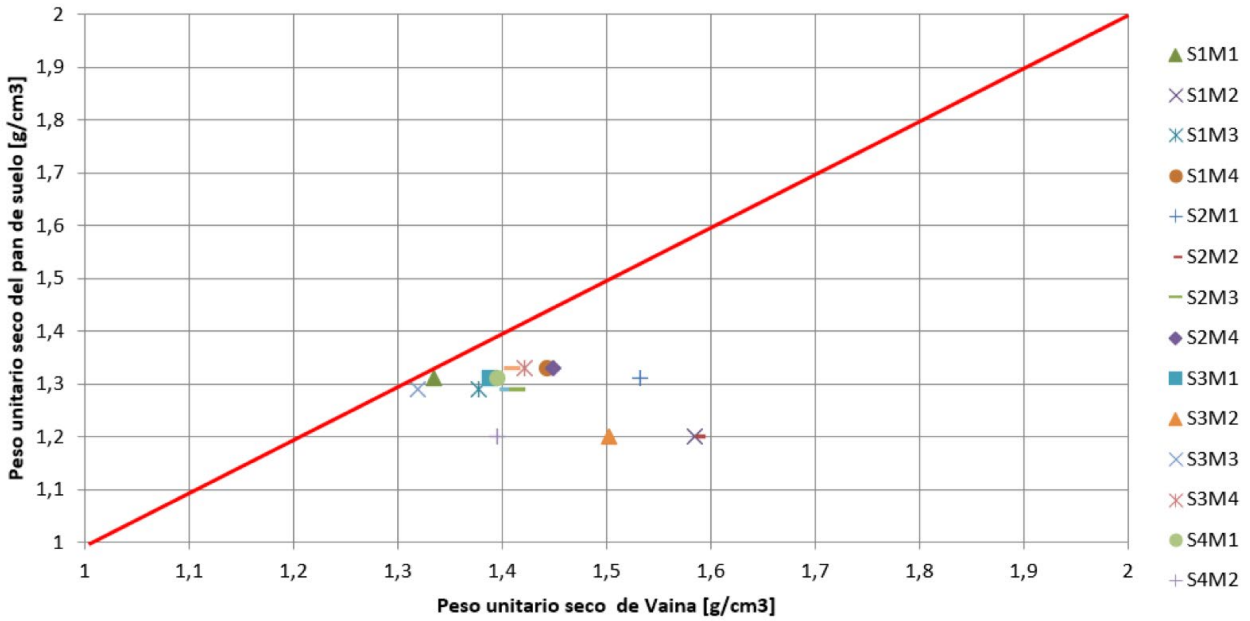
Fig. 3. Relación peso unitario seco vaina y boquilla vs. Porcentaje de recuperación de muestra.

En la Fig.2 El factor de acuñamiento vincula el Y_d de las muestras de la vaina y boquilla siendo el valor 1 donde no hay ningún tipo de acuñamiento. Se puede apreciar un acuñamiento en la boquilla con respecto a la muestra tomada de la vaina en las muestras S1M1, S2M1, S3M1, S4M1, S2M4 y S4M2. La muestra S1M1 muestra un mayor factor de acuñamiento en boquilla con valor 1,138. Por otro lado, las muestras restantes S1M2, S1M4, S2M2, S3M2 y S4M4 poseen mayor acuñamiento en vaina; siendo el menor factor de acuñamiento en la muestra en la S1M2 de 0,87.

En la Fig.3, donde se encuentra representado el Factor de Acuñamiento de las muestras en vaina y boquilla con respecto al porcentaje de recuperación de muestra. Todas las muestras que se encuentran por debajo de la línea constante 1(uno) significa que hay un mayor acuñamiento en vaina; por lo cual aquellas muestras cuyos valores superen la unidad implica que el acuñamiento se produce en la boquilla. En este caso las muestras S1M1, S3M1, S3M2, S4M1 presentan entre un 70-80% de recuperación de muestras y sus valores caen por encima de la constante unidad (acuñamiento en boquilla). Por otro lado, las muestras S1M2, S2M2, S3M2 y S4M4, cuyo porcentaje de recuperación de muestra se encuentra alrededor del 80-90% caen por debajo de la constante unidad con lo cual implica un aumento del Y_d de la muestra tomada de la vaina. Se podría apreciar una tendencia del porcentaje de recuperación con respecto a un aumento de la profundidad de la muestra directamente proporcional, a mayor profundidad mayor porcentaje de recuperación. Como es el caso de las muestras S1M4 y S2M4 (profundidad: 2 m) tiene un 100% de recuperación, denotando la influencia del tipo de suelo.

La Fig.4, donde se compara el peso unitario seco del pan de suelo con respecto al peso unitario de la muestra tomada en la vaina busca mostrar la deformación volumétrica entre la muestra inalterada y la tomada con muestreador Terzaghi y Moretto. Las muestras S1M1, S1M3, S2M3, S2M4, S3M3, S3M4, S4M1 y S4M4 presentan una mínima deformación. Sin embargo, las muestras S2M1, S2M2, S3M2 y S3M3 presentan máxima deformación, a pesar de que los sondeos S2 corresponde con un muestreador Terzaghi nuevo con vaselina y S3 corresponde al muestreador Moretto sin vaselina, lo cual no indica tendencia lógica.

Por otro lado, la Fig. 5 donde se compara el porcentaje de recuperación con respecto al spam entre las curvas de doble edómetro (análogo al potencial de colapso). Las muestras M4 presentan menor colapsabilidad y mayor porcentaje de recuperación teniendo un spam 2,2 a una presión de 0,750 gr/cm2. Las muestras M1 y M3 tiene menor recuperación. Esto permite observar una tendencia con respecto a los muestreadores utilizados. En el caso de la muestra con menor colapsabilidad se observa que la tendencia de recuperación tiene este orden sondeos S1, S2, S4 y S3. En donde, los primeros S1 y S2 corresponden a los Terzaghi, y el S3 y S4 a los muestreadores Moretto.



En la Fig.6 donde se observa porcentaje de recuperación de muestra con respecto al % de humedad. Se puede apreciar que a menor porcentaje de recuperación las muestras se encuentran más húmedas. Con lo cual, indicaría que la humedad en vez de lubricar la interfase entre el sacatestigo y la muestra permite que las partículas del suelo se reacomoden consiguiendo una mayor compactación.

En la Fig. 7 donde se encuentra el porcentaje de recuperación versus el número de golpes SPT, no se observa una tendencia muy clara. Sin embargo, a medida que aumenta el número de golpes el porcentaje de recuperación disminuye. Excepto en las muestras S1M4 y S2M4 que se recupera el 100%, podría deberse a un mayor confinamiento.

En la Fig.8 donde se contrastan el porcentaje de recuperación y el tipo de muestreador con respecto a su condición (viejo, nuevo, con o sin lubricante). En los Terzaghi, las muestras M4 se recuperan en un 100% y en líneas generales se observa una mayor recuperación en las vainas lubricadas con respecto a las secas (2-3%).

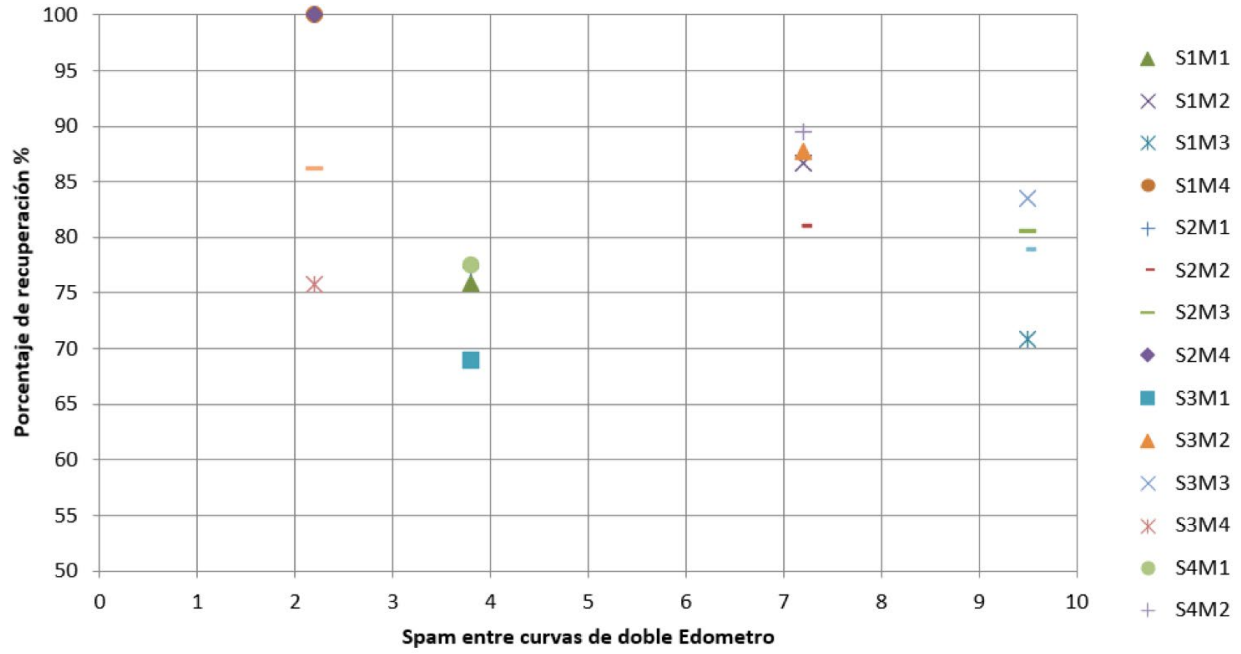


Fig.5. Porcentaje de recuperación de muestra vs. Spam Doble edómetro.

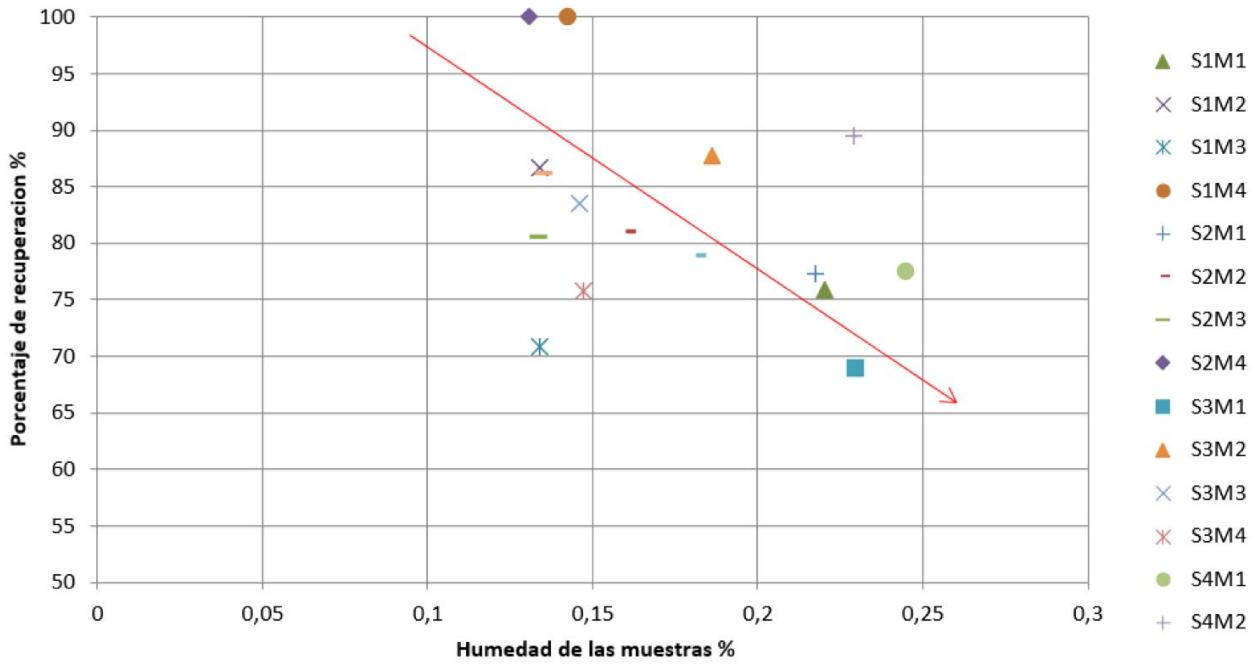


Fig.6. Porcentaje de recuperación de la muestra vs. Porcentaje de humedad.

En los muestreadores Moretto, la tendencia es más clara. La recuperación de muestra es mayor en las vainas lubricadas con respecto a las secas.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis realizado se puede arribar a las siguientes conclusiones.

- Todos los suelos fueron clasificadas como ML-CL. Se observan tendencias en las hipótesis de trabajo planteadas, pero ninguna predomina sobre otra. Esto puede deberse a que el número de muestras analizadas es muy bajo para realizar un tratamiento estadístico.
- Según el porcentaje de recuperación de muestra en relación con la profundidad, se observa que a medida que incrementa la

Figura 7. Porcentaje de recuperación de las muestras vs. Número de golpes de NSPT.

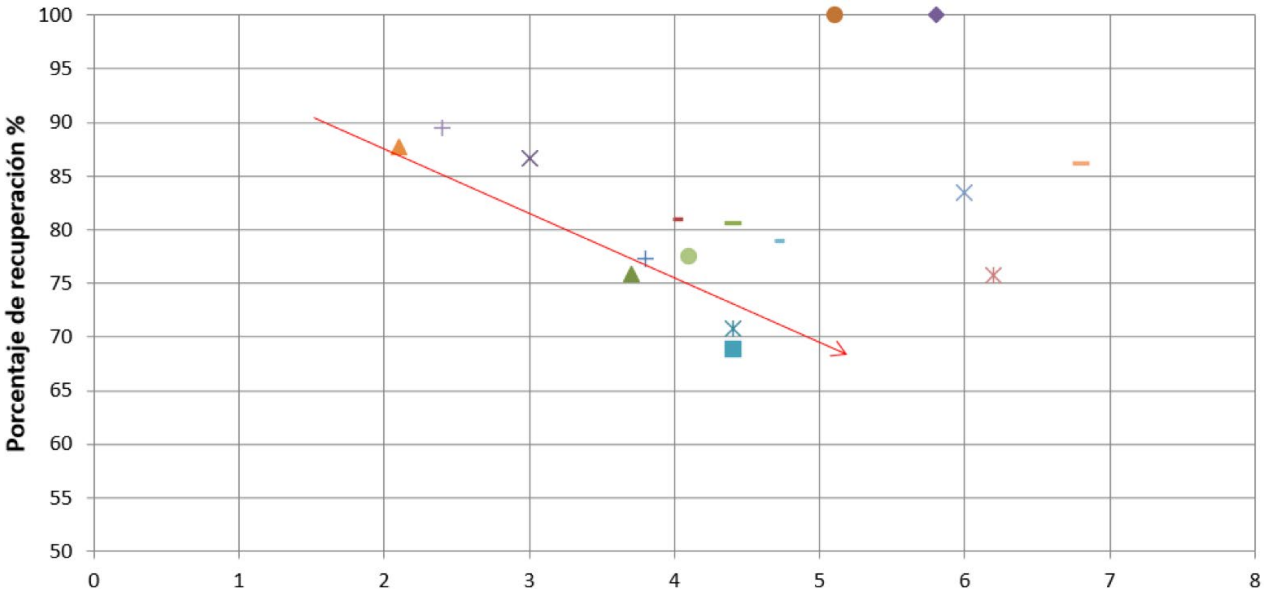


Figura 7. Porcentaje de recuperación de las muestras vs. Número de golpes de NSPT.

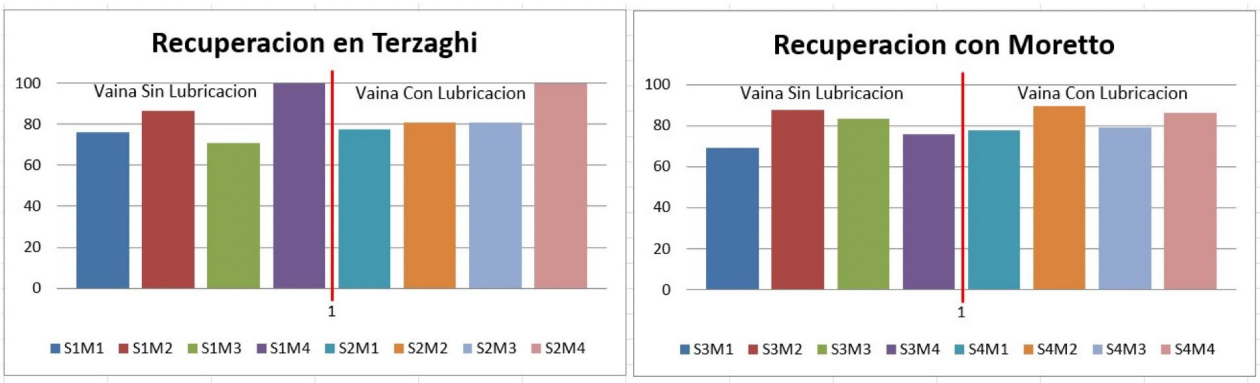


Fig. 8. Contraste entre los porcentajes de recuperación de cada uno de los muestreadores con y sin lubricación.

profundidad, el porcentaje de recuperación es mayor.

- La muestra S1M3 presenta un comportamiento diferente a las tendencias generales, ya que en primer lugar nunca se recuperó muestra de boquilla, posee mayor colapsabilidad.
- Las muestras S3M4 y S4M4 tienen los menores acuñamientos (menores deformaciones) debido al mayor confinamiento y mayor colapsabilidad.
- Las muestras M1 tienden a acuñarse en la boquilla, sin embargo, a mayor profundidad esto se produce en la vaina como en las muestras M4.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por facilitarnos sus instalaciones para la realización de los ensayos. Este trabajo fue realizado con fondos propios sin la ayuda de ningún proyecto o subsidio. Agradecemos a los revisores anónimos cuya observaciones ayudaron a mejorar la calidad del escrito.

REFERENCIAS

Francisca, F. M.; Rocca, R. J.; Dahbar, P. y Verra, M. (2008). Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loéssicos de Córdoba. XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2008), San Juan, Argentina.

Reginato, A. (1970). Propiedades mecánicas de algunos suelos de Córdoba. 2da. Reunión Argentina de Mecánica de suelos e Ingeniería de fundaciones, Córdoba, Argentina.

Rinaldi, V. A., Rocca, R. J., & Zeballos, M. E. (2007). Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess.

Characterisation and engineering properties of natural soils, 2259-2286.

Rogers, J. D. (2006). GOW, MOHR, TERZAGHI, AND THE ORIGINS OF THE STANDARD PENETRATION TEST. Presentado en la Reunión Anual de la Association of Environmental and Engineering Geologists, Boston, Massachusetts.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS EN EL MUNICIPIO DE LA PUNTA, DEPARTAMENTO PUEYRREDÓN, PROVINCIA DE SAN LUIS

Daniel A. Sales[1], Carlos E. Gardini[1]
[1]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: sales@unsl.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se describen las características geotécnicas predominantes de los depósitos superficiales del piedemonte occidental de la sierra de San Luis dentro del ejido municipal de la Punta. A partir de la información de estudios mediante sondeos y calicatas, se presenta según la clasificación unificada S.U.C.S., el tipo de suelos desde la superficie. En el primer nivel hasta la cota – 2,70 m, abundan suelos areno limosos del tipo SM, con densidades relativas bajas y suelos mixtos del tipo SM-SP o SM-SW, con densidades relativas bajas a moderadas. Por debajo de la cota – 2,70 m, se reduce la cantidad de finos representados principalmente por limos, donde se describen depósitos según S.U.C.S. del tipo SW (arenas bien gradadas, con gravas y pocos finos) o SP (arenas mal gradadas, con gravas y pocos finos), con densidades relativas moderadas a altas.
En el inicio del piedemonte de la ladera occidental de la sierra, la participación de finos desde la superficie disminuye y aumenta el tamaño de arenas y gravas desarrollando suelos según S.U.C.S. del tipo SP y SW, hasta suelos gravosos (GP). Se destacan aquellos sectores donde la matriz arenosa apoyan bloques subredondeados de tamaños variados.

Palabras clave: Geotecnia – suelos – Municipio de la Punta.

ABSTRACT

This paper describes the predominant geotechnical characteristics of the surficial deposits of the western piedmont of the Sierra de San Luis within the municipal area of La Punta. Based on data from boreholes and test pits, the soil types from the surface are presented according to the Unified Soil Classification System (USCS).
At the first level, down to an elevation of –2.70 m, silty sand soils of the SM type are predominant, with low relative densities, as well as mixed soils of the SM-SP or SM-SW types, with low to moderate relative densities. Below the –2.70 m elevation, the amount of fines—mainly silts—decreases, and deposits are described, according to the USCS, as SW (well-graded sands with gravel and few fines) or SP (poorly graded sands with gravel and few fines), with moderate to high relative densities.
At the beginning of the piedmont on the western slope of the range, the proportion of fines from the surface decreases, while the size of sands and gravels increases, resulting in soils classified as SP and SW under the USCS, up to gravelly soils (GP). Noteworthy are areas where a sandy matrix supports sub-rounded blocks of varying sizes.

Keywords: Geotechnics – Soils – Municipality of La Punta.

INTRODUCCIÓN

El municipio de La Punta se encuentra limitado al sur por el ejido municipal de la Ciudad de San Luis, en el Departamento Juan Martín de Pueyrredón (Prov. de San Luis), siendo sus vías de accesos desde la ciudad capital la Ruta Nacional (RN) N° 146 y la Autopista 25 de Mayo.

La particularidad de este municipio, es que la totalidad de la localidad se asienta sobre el inicio del piedemonte occidental del extremo sur de la sierra de San Luis, donde el tipo de sedimentación estuvo directamente asociado a la evolución geológica de la región, donde se interrelacionaba los depósitos coluviales con aquellos desarrollados a partir de la acción eólica. El desarrollo de antiguos paleocauces fueron dando origen a depósitos aluviales de edad Pleistoceno Sup – Holoceno. Estos depósitos integran la unidad denominada “Depósitos de planicies aluviales”, cuyo origen se relaciona al conjunto de abanicos aluviales coalescentes desarrollados al pie de la sierra de San Luis los cuales se extienden hasta el eje de la Depresión Longitudinal Central (Costa et al., 2000).

El objetivo del trabajo, es determinar las características geotécnicas generales de los suelos en este municipio, a partir de la interpretación de 50 sondeos realizados con el ensayo SPT y el análisis de dos calicatas, en el sector norte del municipio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se incluye aquí una descripción acabada de los materiales y metodologías utilizadas para la realización del trabajo, es decir, cómo se hizo, bajo qué método y/o con qué instrumentos.

En el terreno se llevaron a cabo sondeos mediante el ensayo S.P.T. (Standard Penetration Test), determinando la resistencia a la penetración N. En laboratorio se procedió a realizar los análisis de granulometría (vía seca), la determinación de la humedad relativa y los límites de Atterberg.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el municipio de La Punta, los depósitos sedimentarios están conformados son principalmente de origen fluvio-eólico, donde la textura arenosa es la que predomina sobre la participación de grava y limo, cuyos espesores son variables.

En general se caracterizan por suelos según la Clasificación S.U.C.S. del tipo SM, SP-SM y SW-SM, hasta 2,5 m de profundidad (Fig. 1). La densidad relativa varía de baja a moderada a mayor profundidad. Por debajo de la cota – 2,70 m, se encuentran sedimentos donde disminuye la participación de finos, caracterizado desde el punto de vista ingenieril, según S.U.C.S., suelos del tipo SW y SP, de densidad relativa moderada, que en algunas ocasiones, están interdigitados por mayor aporte de gravas y bloques dando origen a suelos GW, con potencia que no superan los 0,30 m de espesor (Tabla 1).

PROFUNDIDAD (METROS)	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA N_{SPT}	PESO UNITARIO ESTIMADO (GR/CM^3)
0 a 2,70	SM	Arenas con escaso contenido en gravas, acompañadas de de limos en más del 12% del total	3 - 7	1,35 - 1,45
	SW-SM / SP-SM	Arenas que varían de bien gradadas (SW) a mal gradadas (SP) con gravas, acompañadas de contenido de limos entre el 5 y 12%, que en su mayoría		
2,70 a 4,0	SW/ SP	Arenas con gravas, con escaso contenido de limos con alternancia de mantos de clastos y bloques (GW/GP) por escorrentías de origen fluvial	14 - 20	1,55 - 1,65
4,0 a 6,50	SW /GW / GP	Sedimentos de origen fluvial	20 - 28	1,65 - 1,75

Tabla 1: Síntesis de las características geotécnicas generales del subsuelo del municipio de La Punta

En la zona norte del ejido municipal, los depósitos sedimentarios son de origen coluvial relacionados a paleocauces del arroyo Suyuque Nuevo, con densidad relativa variable. En las inmediaciones de la Universidad de La Punta (33°8'56,00" Lat. S y 66°18'28,91 Long. O) se realizaron dos calicatas, siendo la mayor de ella con una profundidad final de – 6,65 m (calicata Este) (Fig. 2). En esta calicata, el perfil del suelo comienza con un suelo areno limosos de escaso desarrollo intercalado con bloques subredondeados a redondeados, de tamaños variables hasta 0,50 m de diámetro, baja densidad relativa y que fueron reconocidos hasta la cota aproximada - 1,80 m. Por debajo de esta cota, se observaron secuencias intercaladas de horizontes con predominio en arenas de origen fluvial, densidad moderada, acompañadas de gravas de diferentes tamaños.

CONCLUSIONES

Lo expuesto, confirma la influencia fluvial y eólica en los suelos del municipio de La Punta, donde los valores de resistencias son bajos en general hasta la cota – 2,70 m.

Estos depósitos sedimentarios se caracterizan por la presencia de arenas con limos o suelos mixtos del tipo SW-SM Y SP-SM hasta la cota – 2,70 m, perdiendo contenido en finos a mayor profundidad desarrollando suelos del tipo SW, SP, GW y GP.

REFERENCIAS

Costa, C., Gardini, C., Chiesa, J., Ortiz Suárez, A., Ojeda, G., Rivarola, D., Tognelli, G., Strasser, E., Carugno Durán, A., Guerstein, P., Sales, D. y Vinciguerra, H. 2000. Hoja Geológica 3366-III San Luis, provincias de San Luis y Mendoza. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico-Minero Argentino (SEGEMAR), Boletín Nº 293, pp. 104, en CD, ISSN Nº 1667-1988.

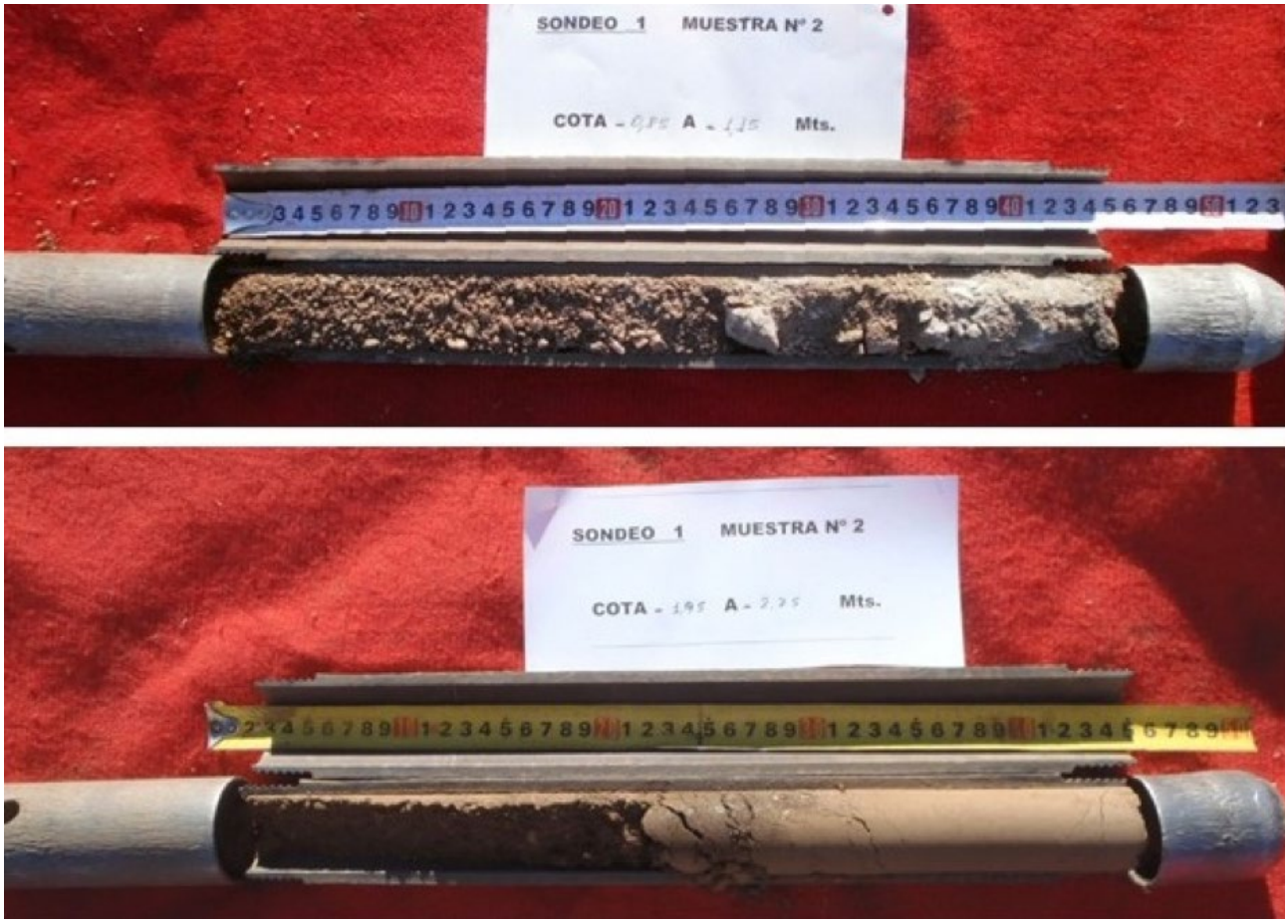


Fig 1. Muestras de testigos del ensayo SPT obtenidos entre los 0,85 y 2,25 m. En la figura superior, corresponden a suelos del tipo SP, mientras que la figura inferior a suelos del tipo SM.

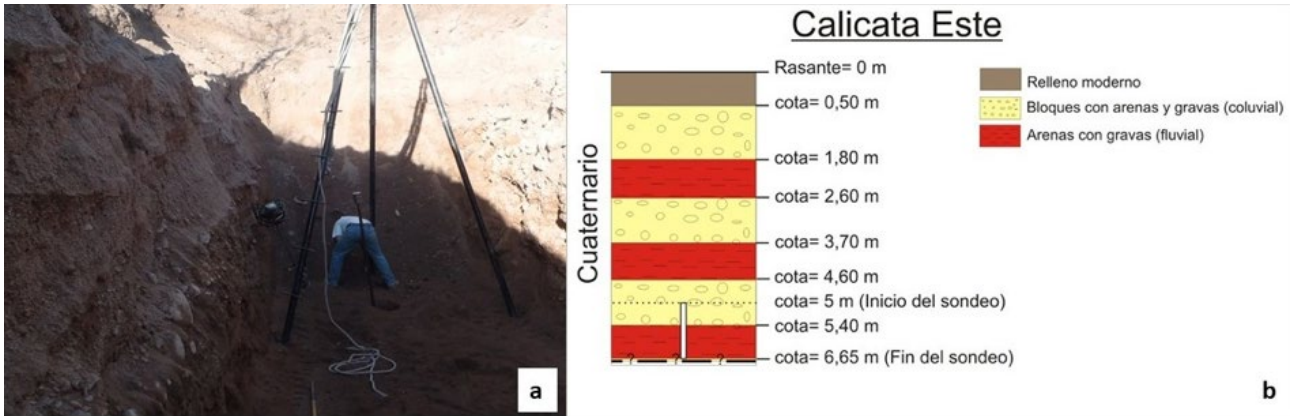


Fig 2. Calicata desarrollada en las inmediaciones de la Universidad de La Punta. a) perfil del depósito sedimentario hasta la cota – 6,65m, b) esquema del perfil sedimentario

MODELAMIENTO ESTRUCTURAL Y CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE SISTEMA DE FALLAS EN DEPÓSITO TIPO PÓRFIDO CUPRÍFERO DE LA FRANJA METALOGÉNICA EOCENO - OLIGOCENO

Luciano Vega[1], Pablo Gutiérrez[1]
[1]ITASCA, Pedro de Valdivia 291, Providencia, Chile.
Mail de contacto: luciano.vega@oneitasca.com; pablo.gutierrez@oneitasca.com

RESUMEN

El presente trabajo propone y aplica una metodología para la validación estructural, modelamiento geométrico y caracterización conceptual del comportamiento hidráulico de fallas mayores en contextos sin acceso directo al macizo rocoso. La estrategia se basa en el análisis de bases de datos estructurales provenientes de sondajes, tanto orientados como no orientados, aplicándose a un caso representativo de un pórfido cuprífero del Eoceno-Oligoceno de la Cordillera de Domeyko, norte de Chile.

Se validaron 27 superficies de modelos existentes mediante interceptos de sondajes, los cuales fueron caracterizados según atributos estructurales e hidrogeológicos. A partir de estos, se clasificaron conceptualmente según el modelo de Caine y otros (1996), concluyendo que la mayoría presenta comportamiento preferentemente conductor. Paralelamente, se modelaron 41 nuevas superficies a partir de datos orientados de televiewer, aplicando algoritmos de clusterización, análisis espacial y triangulación implícita. Se distinguieron zonas medidas y extendidas según respaldo de dato, y la coherencia direccional fue evaluada mediante el parámetro K de Fisher (Fisher, 1953).

Las estructuras modeladas presentan una predominancia de orientaciones NW-SE y N-S, coherentes con los sistemas estructurales de la Cordillera de Domeyko. El enfoque metodológico demuestra ser útil para el desarrollo de modelos estructurales técnicamente trazables, con aplicaciones preliminares en geología estructural, hidrogeología y geotecnia.

Palabras clave: modelamiento estructural – conductividad hidráulica – logueo estructural – cordillera de Domeyko.

ABSTRACT

This work proposes and applies a methodology for the structural validation, geometric modeling, and conceptual characterization of the hydraulic behavior of major faults in contexts without direct access to the rock mass. The strategy is based on the analysis of structural databases from both oriented and non-oriented drillholes, applied to a representative case of an Eocene-Oligocene porphyry copper system in the Domeyko Cordillera, northern Chile.

A total of 27 structural surfaces were validated using drillhole intercepts, characterized according to structural and hydrogeological attributes. These were classified conceptually following the model of Caine et al. (1996), indicating that most of faults exhibit predominantly conductive behavior. In parallel, 41 new surfaces were modeled from oriented televiewer data points, using clustering algorithms, spatial analysis, and implicit triangulation. Measured and extended zones were distinguished based on data support, and directional consistency was evaluated using Fisher's K parameter (Fisher, 1953).

The modeled structures how predominant NW-SE and N-S orientations, consistent with the regional structural framework of the Domeyko Cordillera. The proposed methodological approach proves useful for developing technically auditable structural models, with preliminary applications in structural geology, hydrogeology, and geotechnics.

Keywords: structural modelling – hydraulic conductivity – structural logging – Domeyko mountain range.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas estructurales mayores en depósitos minerales condicionan significativamente la geometría y continuidad de cuerpos mineralizados, y el comportamiento hidráulico del macizo rocoso actuando como vías preferenciales de conducción o barreras hidráulicas. En depósitos tipo pórfido cuprífero, característicos de la franja metalogénica Eoceno-Oligoceno en el norte de Chile, estas estructuras desempeñan un papel esencial desde el punto de vista tectónico e hidrotermal (Camus, 2003; Cembrano y Lara, 2009; Sillitoe, 2010).

La caracterización de fallas mayores en etapas preliminares, especialmente cuando no hay acceso directo al macizo rocoso, representa un desafío importante. Este estudio lo aborda mediante la aplicación de una metodología de validación de modelos base,

modelamiento estructural de nuevas superficies y caracterización conceptual hidráulica a partir de bases de datos de sondaje con información estructural orientada y no orientada.

El caso de estudio en que se aplica corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero anónimo del norte de Chile, representativo de la Cordillera de Domeyko, el cual se encuentra cubierto por gravas que impiden la observación directa de afloramientos. El trabajo se ha limitado exclusivamente al estudio de fallas mayores, las que han sido definidas por presentar núcleos con espesores iguales o superioras a 5 cm y/o zonas de daño con desarrollo igual o mayor a 10 metros, siguiendo criterios dimensionales establecidos en estudios previos, los cuales también han mencionado que este tipo de estructuras pueden presentar persistencias en sus trazas del orden de hasta ca. 1000 m (Marrett y Allmendinger, 1990; Cowie y Scholz, 1992; Gudmundsson; 2001; Faulkner y otros, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

El flujo metodológico aplicado constó de dos grandes etapas: (1) la validación estructural de superficies preexistentes y (2) el modelamiento de nuevas superficies utilizando datos estructurales orientados provenientes de televiewer (TVW). Ambas etapas fueron desarrolladas mediante visualización y modelamiento implícito en Leapfrog Geo (Seequent, 2024), y Dips v8 (Rocscience, 2024) para el análisis estructural estereográfico, integrando criterios estructurales geométricos y espaciales.

Validación y modelamiento de superficies mediante interceptos de sondaje

En esta etapa se realizó una validación de superficies trianguladas de modelos estructurales 3D preexistentes. El flujo metodológico se muestra en la Figura 1, la que representa los procesos de (1) selección de estructura a validar, (2) identificación de sondajes que intersecan la superficie, (3) definición de una ventana de búsqueda de aproximadamente 50 m respecto al plano de la superficie y (4) selección del intercepto más representativo dentro de la ventana. Para ello, se empleó información estructural orientada y no orientada registrada en bases de datos (BBDD) de sondajes. En total, se identificaron y seleccionaron 238 interceptos de sondaje con superficies pertenecientes a modelos estructurales, los que fueron categorizados y ponderados según criterios geométricos y estructurales específicos, los que se muestran en la Tabla 1. Estos valores fueron promediados, para cada intercepto y superficie, obteniéndose un valor que luego es empleado como criterio de confiabilidad para cada falla.

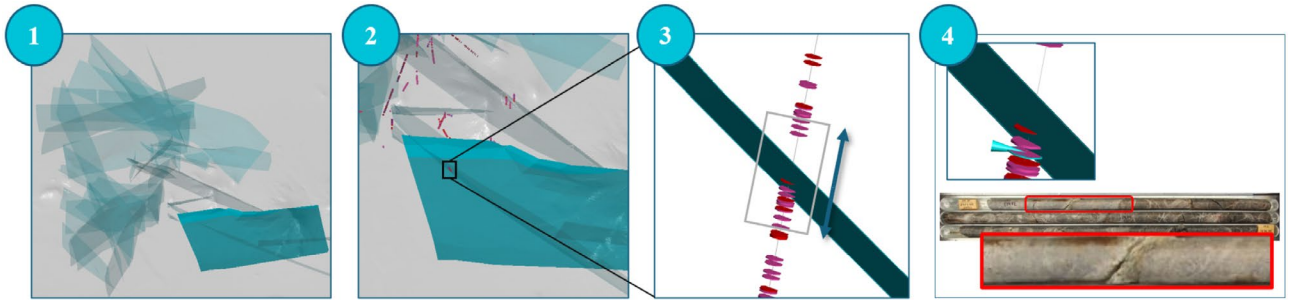


Fig. 1. Imagen con relieve exagerado, donde se observan las depresiones tectónicas y su ubicación con respecto a las diferentes localidades (Imagen modificada del Google Earth)

Para modelar superficies validadas se exigieron al menos tres interceptos para cada una. Se utilizó un radio de referencia de 500 m alrededor del intercepto, asociado a la persistencia típica de fallas mayores. Este radio se multiplicó por el puntaje ponderado obtenido para cada estructura y así definir el "radio medido" de confiabilidad. Esto permitió diferenciar, en cada superficie, una zona de Alta Confiabilidad (AC) dentro de este radio, y una zona de Baja Confiabilidad (BC) fuera de él.

Delimitación y modelamiento de nuevas superficies de fallas mediante datos orientados

El modelamiento de nuevas superficies de fallas se realizó exclusivamente con datos estructurales orientados de sondajes (TVW), usando registros con rank 3 y 4, que indican discontinuidades de ≥1 cm y ≥5 cm de espesor registrado, respectivamente. El proceso incluyó cuatro etapas: (1) clusterización de datos por orientación mediante el algoritmo *Fuzzy Cluster* (Hammah y Curran, 1998) en Dips v8, para agrupar familias de orientaciones similares para facilitar visualización durante el modelamiento; (2) análisis visual y espacial de cada clúster en Leapfrog Geo; (3) correlación de datos por afinidad geométrica, considerando planaridad, tipo de estructura, diferencia angular ≤30° y distancia ≤500 m; y (4) triangulación de superficies en Leapfrog Geo. Las superficies fueron luego divididas en Zonas Medidas (ZM), con respaldo directo de datos (distancia menor a 500 m), y Zonas Extendidas (ZE), que representan extrapolaciones más allá del control directo.

Evaluación hidrogeológica

La caracterización hidráulica conceptual de fallas se basó en los índices propuestos por Caine y otros (1996), calculados a partir de la relación entre espesores de núcleo y zona de daño de acuerdo con las siguientes relaciones:

PARÁMETRO	CATEGORÍA / VALOR	PONDERACIÓN
Fuente	Orientado	1
	No orientado	0.5
Distancia entre intercepto y superficie	≤ 5 m	1
	5 – 15 m	0,75
	15 – 30 m	0,5
Diferencia angular entre superficie y trayectoria de sondaje	≤ 30°	1
	> 30°	0,5
	Sin registro en BBDD/foto	0,25
Espesor de núcleo	≥ 5 cm / Rank 4	1
	< 5 cm / Rank 3	0,5
	Sin núcleo, sin foto	0,25
Zona de daño	≥ 10 m	1
	< 10 m	0,5
	No representativo/sin foto	0,25

Tabla 1. Asignación de puntajes a interceptos de sondaje.

$$Fa = \frac{Espesor\ de\ zona\ de\ daño}{Espesor\ total\ de\ zona\ de\ daño} = \frac{Espesor\ de\ zona\ de\ daño}{Espesor\ de\ núcleo + Espesor\ de\ zona\ de\ daño}$$

$$Fm = Promedio\ de\ los\ valores\ de\ Fa\ para\ una\ falla$$

$$Fs = (Fa)máximo - (Fa)mínimo$$

Esta metodología clasifica las estructuras en función de su arquitectura interna, proponiendo estilos estructurales que varían desde zonas predominantemente conductoras, con Fm cercano a 1, hasta barreras hidráulicas, valores de Fm cercanos a 0, los que se visualizan esquemáticamente en la Figura 2. Es importante mencionar que esta aproximación presenta limitaciones al considerar únicamente la proporción núcleo/zona de daño, excluyendo factores clave como tipo de relleno, continuidad lateral y conectividad de fracturas.

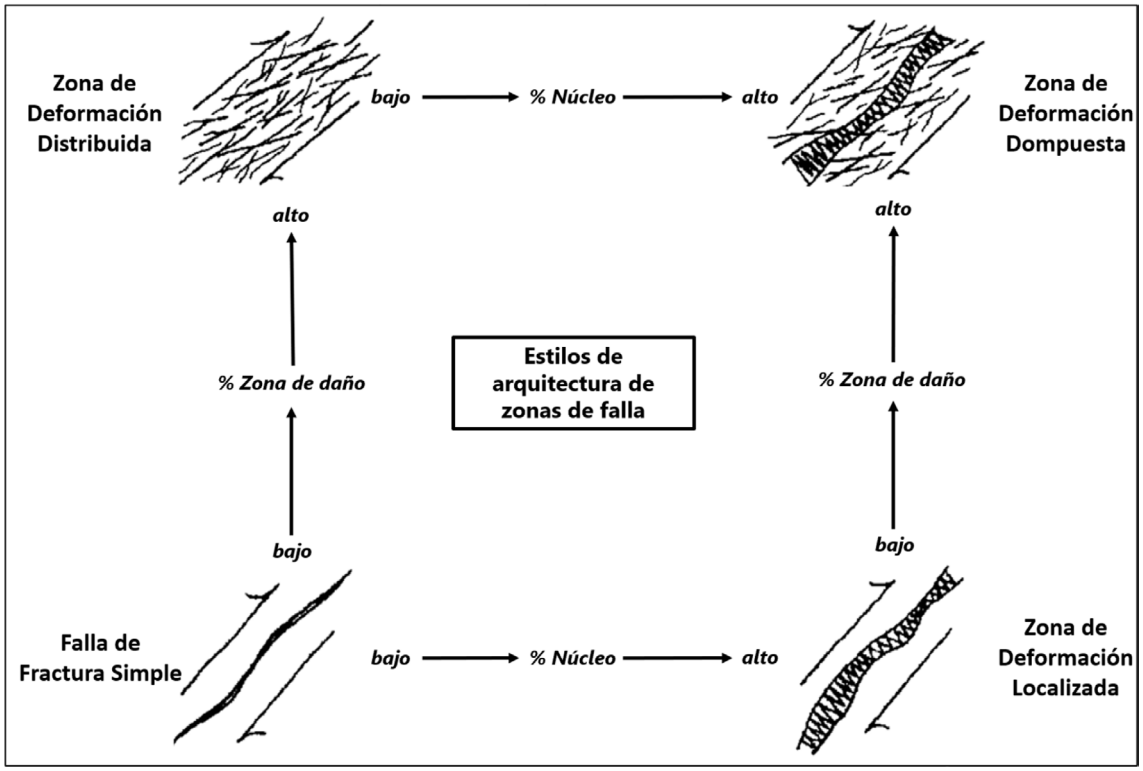


Figura 2. Modelo conceptual idealizado de estilos de arquitectura de zonas de falla, que correlaciona la proporción de la zona de daño y núcleo. Modificado de Caine y Foster (1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se validaron 27 superficies provenientes de modelos estructurales previos, generándose triangulaciones con zonas de AC y BC (Figura 3A), según el respaldo en datos estructurales. Estas superficies mostraron orientaciones predominantemente NW-SE, coherentes con sistemas estructurales descritos regionalmente para el contexto estructural (p. ej., Mpodozis y Cornejo, 2012). La caracterización hidráulica indicó que la mayoría presenta un comportamiento conductor (Fm cercano a 1), debido a la predominancia de extensas zonas de daño respecto a espesores de núcleo. Esto implica una alta probabilidad de que estas estructuras puedan actuar como vías preferenciales para el flujo hídrico subterráneo.

Adicionalmente, se generaron 41 nuevas superficies a partir de datos de TVW, organizadas en ZM y ZE según respaldo en datos (Figura 3-B). Todas las superficies mostraron alta coherencia direccional, con índices Kappa > 60 (Fisher, 1953), corroborando la solidez metodológica.

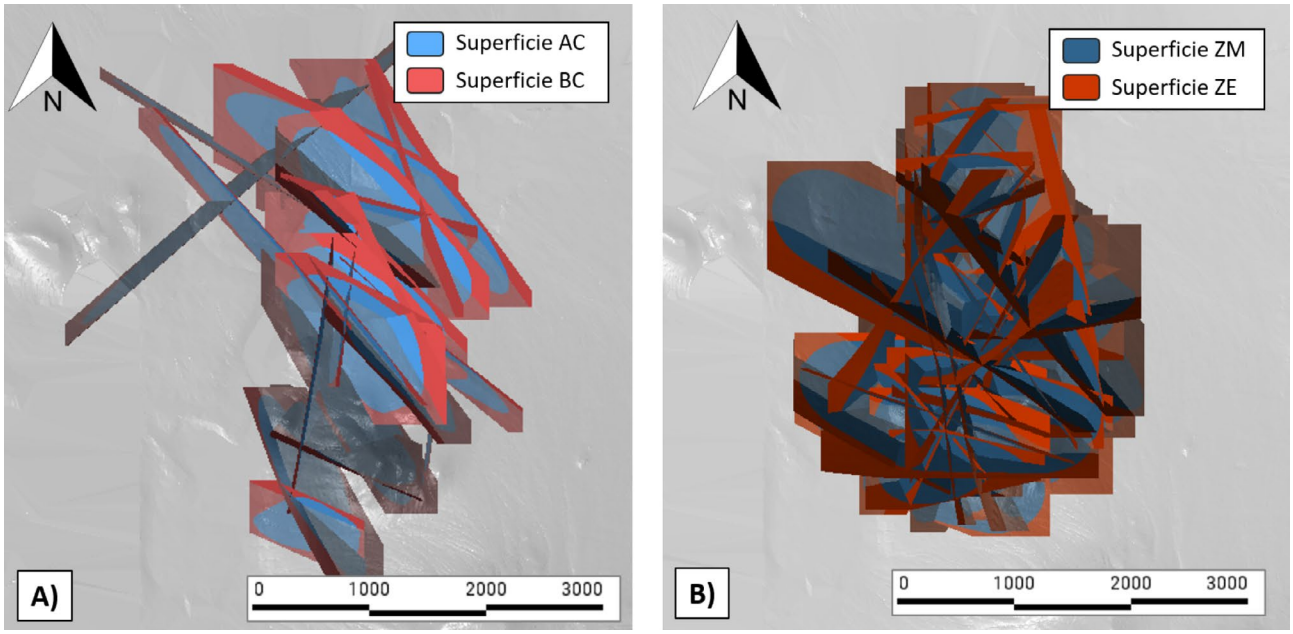


Figura 3. Vista en planta de (A) superficies validadas y modeladas de modelos estructurales base y (B) superficies a partir de datos estructurales orientados.

Si bien la metodología proporciona resultados sólidos, la caracterización hidráulica aplicada debe entenderse como un análisis conceptual inicia, cuya precisión y validez requieren estudios hidrogeológicos específicos complementarios que incluyan ensayos directos en terreno o de laboratorio para evaluar propiedades hidráulicas reales de las estructuras.

La consistencia entre resultados y estructuras regionales conocidas (p. ej., Amilibia y otros, 2008; Cembrano y Lara, 2009) valida el enfoque aplicado. La metodología permite obtener modelos técnicamente respaldados incluso sin observaciones directas, útil para aplicaciones preliminares en geotecnia e hidrogeología minera.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió validar y modelar superficies estructurales de fallas mayores en un contexto minero sin acceso directo al macizo rocoso, aplicando análisis estructural e hidráulico conceptual a partir de información estructural orientada y no orientada de sondajes. Las estructuras generadas mostraron una alta coherencia geométrica y direccional con las orientaciones esperadas dentro del marco tectónico regional.

Por otro lado, la clasificación hidráulica conceptual basada en el método de Caine y otros (1996) representa un primer acercamiento al comportamiento de las fallas, resultando en una identificación predominante de estructuras conductoras. Sin embargo, es altamente recomendable realizar estudios hidrogeológicos adicionales para validar estas interpretaciones preliminares, considerando factores como relleno, conectividad y persistencia, entre otros.

La metodología ofrece resultados trazables y replicables para la caracterización preliminar de fallas mayores, especialmente útil en etapas tempranas de proyectos mineros y en contextos con limitada información directa de afloramientos.

REFERENCIAS

Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., y Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean Mountain Belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology,* 30(12), 1520–1539. doi: 10.1016/j.jsg.2008.08.005.

Caine, J.S., Evans, J.P. y Forster, C.B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24(11), 1025–1028.

Caine, J.S. y Foster C.B. (1999). "Fault Zone Architecture and Fluid Flow: Insights from Field Data and Numerical Modeling" in *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust,* pp. 101-127. American Geophisical Union. https://doi.org/10.1029/GM113p0101

Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología, Santiago, p.267.

Cembrano, J., y Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*. Vol. 471 (1-2), 96-113. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.038.

Cowie, P.A., y Scholz, C.H. (1992). Physical explanation for the displacement-length relationship of faults. *Journal of Structural Geology*, 14(10), 1133–1148.

Faulkner, D. R., Lewis, A. C., y Rutter, E. H. (2003). "On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain". *Tectonophysics*, 367(3-4), 235-251.

Fisher, R. A. (1953). Dispersion on a sphere. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 217(1130), 295-305.

Gudmundsson, A. (2001). Fluid overpressure and flow in fault zones: field measurements and models. Tectonophysics, 336(1-4), 183–197. doi:10.1016/s0040-1951(01)00101-9.

Hamma, R.E. y Curran, J.H. (1998). Fuzzy cluster algorithm ofr the automatic identification of joint sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35*(7), 889-905.

Marrett, R. y Allmendinger, R.W. (1990). Kinematic analysis of fault slip data. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, No. 8, p. 973-986.

Mpodozis, C. y Cornejo, P. (2012). Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. *Socity of Economic Geologists,* Inc. Publicación Especial, pp. 329-360. (Capítulo 14).

Rocscience Inc. (2024). Dips version 8, https://www.rocscience.com/software/dips

Seequent Limited (2024). Leapfrog Geo version 2024.1, https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/

MINERÍA METALÍFERA

CONCILIACIÓN DE MODELOS GEOTÉCNICOS EN OPERACIONES A RAJO ABIERTO DE YACIMIENTOS TIPO PÓRFIDO CUPRÍFERO: PROPUESTA DE METODOLOGÍA, VALIDACIÓN Y LECCIONES OPERACIONALES

Rodrigo Aguirre[1], María José Silva[1], Pablo Gutiérrez[1]
[1]ITASCA, Avenida Pedro de Valdivia 291, Santiago, Chile
Mails de contacto: rodrigo.aguirre@oneitasca.com; mariajose.silva@oneltasca.com; pablo.gutierrez@oneltasca.com

RESUMEN

La conciliación sistemática de los modelos de Unidades Geotécnicas (UGT) busca reducir la incertidumbre y mejorar la toma de decisiones en el contexto de minería a cielo abierto. Para desarrollar los objetivos planteados se presenta una metodología simple que aprovecha las herramientas y datos ya empleados por los equipos de caracterización geotécnica, evitando nuevos requisitos adicionales. El procedimiento compara el modelo 3D de UGT proyectado con el mapeo geológico-geotécnico levantado en superficie y bancos de la misma fase ya desarrollada; puede aplicarse a escala global, inter-rampa o banco. Consta de cuatro etapas: (1) definición del sector, la escala y la periodicidad de revisión; (2) verificación de requisitos previos y QA/QC de los datos; (3) conciliación de la información mediante el uso de una malla topográfica digital regular, comparando el modelo y el mapeo en una nube de puntos uniforme, para el cálculo de la coincidencia estadística normalizada por UGT; y (4) finalmente la clasificación de los resultados en rangos de desempeño. El caso piloto analizado, obtuvo una coincidencia global del 45 %, revelando la necesidad de ajustar límites litológicos y escalas de ciertas UGT. El flujo de trabajo, implementado con Leapfrog Geo® y plataformas CAD comunes, entrega a los usuarios un marco reproducible que facilita la auditoria entre la coherencia de los modelos, datos de campo y prácticas de QA/QC, contribuyendo a la optimización del diseño minero y a la gestión del riesgo geotécnico.

Palabras clave: Conciliación de modelos; Unidades Geotécnicas; validación de modelos.

ABSTRACT

The objective of the systematic reconciliation of Geotechnical Unit (GTU) models is to reduce uncertainty and improve decision-making in the context of open-pit mining. To achieve these objec-tives, a simple methodology is presented that uses the tools and data already employed by geotechnical characterization teams, thus avoiding the necessity for additional requirements. The procedure involves a comparison of the projected 3D GTU model with the geological-geotechnical mapping surveyed on the surface and benches of the same phase that have already been developed; it can be applied on a global, inter-ramp, or bench scale. The methodology covers four stages. Firstly, the sector is defined, the scale and review frequency are established. Secondly, the prerequisites are verified, and the data is subjected to QA/QC. Thirdly, information is reconciled using a regular digital topographic mesh, the model and mapping are compared in a uniform point cloud. The normalized statistical coincidence is calculated by GTU. Finally, the results are classified into performance ranges. The pilot case analyzed obtained an overall match of 45%, revealing the necessity to adjust lithological boundaries and scales of certain UGTs. The workflow, implemented with Leapfrog Geo® and common CAD platforms, provides stakeholders with a reproducible framework that facilitates auditing between model consistency, field data, and QA/QC practices. This certainly contributes to mining design optimization and geotechnical risk manage-ment.

Keywords: Model Reconciliation; Geotechnical Units; Model Validation.

INTRODUCCIÓN

En la planificación y operación de proyectos mineros a cielo abierto, los modelos de Unidades Geotécnicas (UGT) desempeñan un rol fundamental al permitir la caracterización geotécnica espacial del macizo rocoso, facilitando un buen diseño de taludes, la evaluación de riesgos y la toma de decisiones operacionales. Las Unidades Geotécnicas corresponden a volúmenes de roca homogéneos en su comportamiento geotécnico, definidos a partir de datos como litología, alteración, zona mineral, fracturamiento y/o mapeo estructural. Estos modelos se construyen en etapas tempranas del proyecto o previo al desarrollo de las fases o expansiones de un plan minero, por lo general, a partir de información limitada tal como registros de sondajes o taladros, mapeos superficiales (celdas o ventanas) y ensayos de laboratorio que luego deben ser extrapolados a grandes volúmenes. Sin embargo, una vez iniciada la operación minera o el desarrollo de las nuevas fases planificadas, se genera un nuevo conjunto de información geológica y geotéc-

nica proveniente del mapeo de celdas en bancos, junto con nuevas campañas de sondajes, cuya integración al modelo original muy pocas veces incorpora una medición objetiva o cuantitativa del grado de coincidencia entre la proyección y la realidad observada.

En este contexto, se propone una metodología simple y reproducible para la conciliación de modelos de UGT, cuyo objetivo es medir, validar y ajustar los modelos tridimensionales existentes en función de la información efectivamente observada en terreno. Considerando que la conciliación, según su definición más aceptada, implica comparar un modelo proyectado con datos reales, dicha comparación debe enfocarse en superficies o "*Shell*" generadas a partir del mapeo de los bancos desarrollados, es decir, sobre la topografía efectivamente expuesta. La metodología propuesta aprovecha herramientas ya disponibles en los entornos operacionales, como software de modelamiento geológico y plataformas CAD, evitando la implementación de nuevos sistemas o procesos. Su aplicación contribuye a reducir la incertidumbre asociada a los modelos geotécnicos, mejorar su coherencia con las condiciones reales y, en consecuencia, optimizar tanto el diseño minero como la gestión del riesgo.

La propuesta fue validada mediante su aplicación a un caso piloto genérico, donde se contrastó el modelo geotécnico con el mapeo de bancos en una fase desarrollada. El análisis evidenció una coincidencia global del 45 %, destacando la utilidad del proceso para identificar ajustes necesarios en límites litológicos, escalas de representación y criterios de clasificación. Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de establecer rutinas de conciliación dentro del ciclo de vida de los modelos geotécnicos.

MÉTODO

La metodología de conciliación propuesta se estructura en cuatro etapas principales, que se resumen en la Figura 1, diseñadas para comparar de forma sistemática el modelo tridimensional de Unidades Geotécnicas (UGT) con el mapeo realizado en terreno. El procedimiento fue implementado utilizando herramientas comúnmente disponibles en los entornos de modelamiento geotécnico, tales como Leapfrog Geo® y plataformas CAD, sin requerimientos de herramientas adicionales. Esta propuesta se fundamenta en definiciones ampliamente aceptadas que entienden la conciliación como un proceso de comparación y ajuste entre modelos geotécnicos y los datos observados durante la ejecución de un proyecto, permitiendo una actualización continua y validada del comportamiento del terreno (Read & Stacey, 2009).

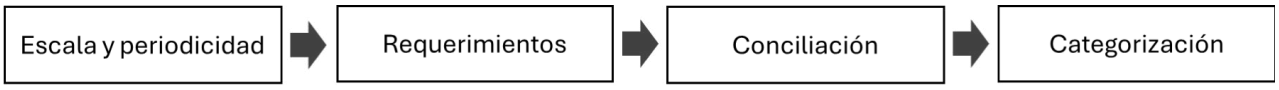


Fig. 1. Flujo de trabajo general para la conciliación de modelos de Unidades Geotécnicas.

Definición del sector, escala y periodicidad

En primer lugar, se delimita el sector a conciliar y se define la escala de trabajo (global, inter-rampa o banco), junto con la periodicidad con la que se realizará la revisión. Estas decisiones deben estar alineadas con los ciclos de actualización de los modelos geotécnicos y los avances de la operación minera. Para el caso analizado, se adoptó una escala inter-rampa con revisión semestral.

Revisión de requerimientos previos

Antes de proceder con la comparación, se verifica que el modelo de UGT haya sido previamente validado, idealmente por una entidad externa. También se comprueba la disponibilidad y calidad de los insumos mínimos requeridos, tales como: superficie topográfica actualizada, modelo 3D de UGT, y mapeo de superficie (levantado como líneas o polígonos sobre la topografía real, ver Fig. 2). Se sugiere utilizar una lista de verificación tipo *checklist* para asegurar la completitud de la información.

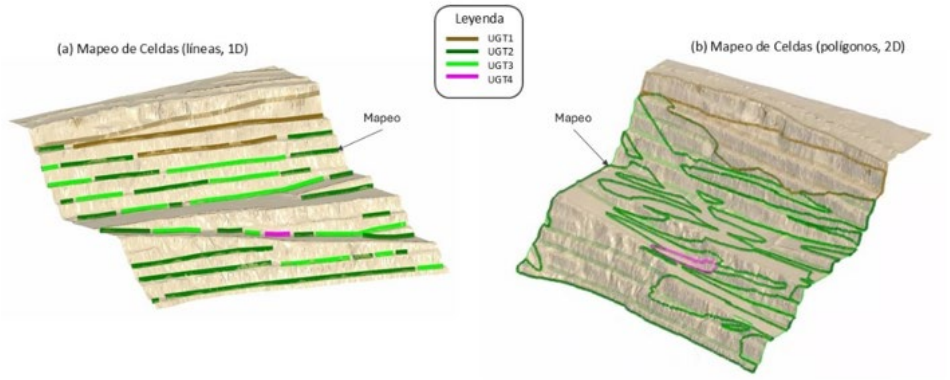


Fig. 2. Representación esquemática de dos tipos de mapeo comúnmente utilizados en open pit: (a) mapeo lineal proyectado en la base o "pata" del banco; (b) mapeo de polígonos tridimensional derivado de levantamientos con scanner o fotogramétricos.

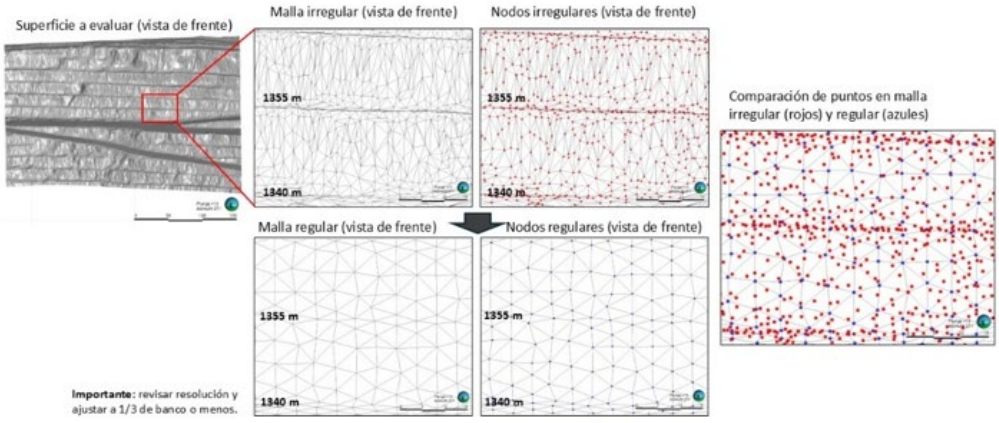


Fig. 3. Comparación entre malla irregular (puntos rojos) y malla regular (puntos azules) del mismo sector.

Conciliación mediante malla regular y evaluación de puntos

La conciliación se lleva a cabo utilizando una superficie topográfica regularizada, construida a partir de una malla uniforme, cuyos vértices son empleados como puntos de control. Esta superficie regular permite que los puntos evaluados tengan un peso estadístico equivalente, evitando sesgos derivados de densidades irregulares (ver Figura 3). En cada vértice, se evalúa la UGT modelada y la unidad geotécnica mapeada, generando así una nube de puntos que contiene ambas asignaciones.

La elección de una superficie como plano de comparación responde a la disponibilidad de la información geotécnica en contextos operacionales. Por un lado, los modelos geotécnicos proyectados se encuentran representados mediante sólidos 3D o modelos de bloques, construidos a partir de interpretaciones sobre datos indirectos (sondajes, perfiles, celdas de fases anteriores, etc.). Por otro lado, la información observada en terreno proviene de mapeos realizados en los bancos ya desarrollados, que típicamente se levantan en formato de líneas (1D) o polígonos (2D), a partir de mapeos en terreno o interpretación sobre productos tales como la fotogrametría. Ambos tipos de datos pueden intersectarse con una superficie topográfica actualizada del sector a evaluar, generando un "shell" o superficie sobre la cual comparar las asignaciones geotécnicas proyectadas y observadas.

Para modelos UGT representados como sólidos, la evaluación puede hacerse directamente. En caso de modelos definidos por superficies (*meshes*), se requiere generar previamente un modelo combinado que cierre los volúmenes, para posteriormente evaluar.

En la figura 4 se muestra una representación esquemática de las fuentes de información utilizadas para la conciliación. A la izquierda, modelos proyectados en formato de sólidos o bloques 3D; a la derecha, mapeos geotécnicos típicamente realizados sobre bancos desarrollados, levantados como líneas (1D) o polígonos (2D), descritos en la sección anterior. Ambos tipos de datos permiten generar superficies (*shells*) sobre la topografía real del sector evaluado, las cuales son utilizadas como base de comparación entre modelo y mapeo.

Comparación estadística y categorización

A partir de la nube de puntos evaluada, se calcula la coincidencia entre las unidades modeladas y mapeadas. Este análisis se realiza por unidad y se normaliza en función de la proporción de puntos asociados a cada una. La conciliación global corresponde a la suma de coincidencias ponderadas. Finalmente, los resultados se clasifican en rangos de desempeño, los que pueden definirse de forma flexible; en este estudio, se emplearon tres categorías: buena conciliación (>60 %), conciliación regular (40–60 %) y mala conciliación (<40 %).

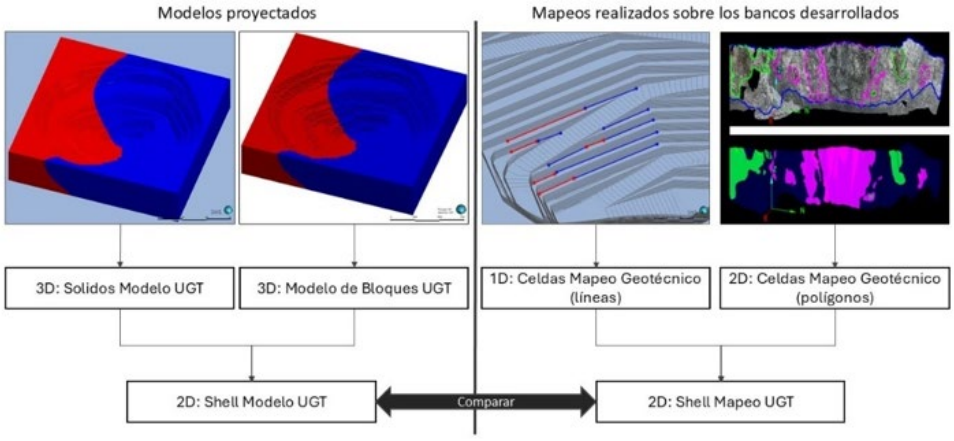


Fig. 4. Esquema de comparación entre modelos proyectados y mapeo geotécnico observado

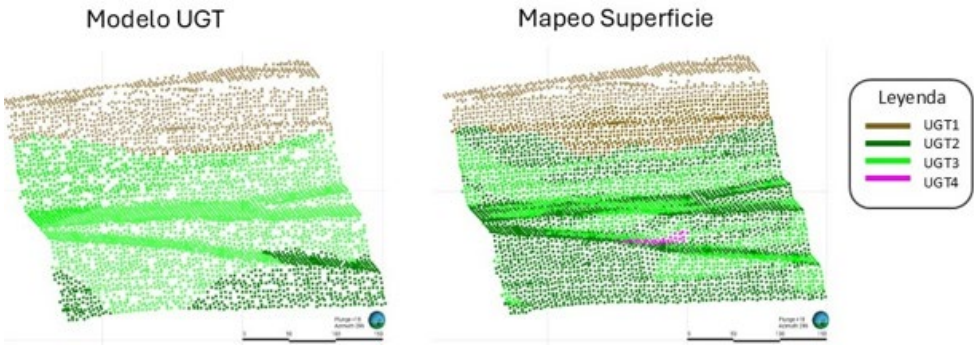


Fig. 5. Modelo UG y mapeo de superficie evaluados en puntos generados a partir de malla regular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología fue aplicada en un caso piloto correspondiente a un sector dentro de una fase desarrollada en una operación minera a cielo abierto, con el objetivo de validar su aplicabilidad y evaluar el grado de coherencia entre el modelo de Unidades Geotécnicas (UGT) y el mapeo geotécnico de superficie. La escala de trabajo seleccionada fue inter-rampa y se utilizó una malla regular con resolución adaptada a la altura de banco (15 metros) para la evaluación estadística (ver Figura5).

El análisis se centró en la comparación directa entre las unidades del modelo 3D y las unidades identificadas en el mapeo geotécnico, empleando una nube de puntos derivada de la malla regularizada. Para cada unidad geotécnica modelada, se determinó el porcentaje de coincidencia con las unidades mapeadas en la misma ubicación. Esta coincidencia se calculó como la proporción de puntos en los cuales la unidad modelada y la mapeada fueron equivalentes, y se normalizó en función del total de puntos por unidad. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

UG MODELO	N PUNTOS MODELO[1]	% UG MODELO[2]	UG MAPEADA[3]	N PUNTOS MAPEO[4]	% COINCIDENCIA POR UNIDAD[5]	% CONCILIACIÓN POR UNIDAD[6]	COMENTARIO	NORMALIZACIÓN[7]
UGT1	1033	23.5%	UG1	575	56%	56%	coincide	13.1%
			UG2	437	42%	44%	no coincide	10.0%
			UG3	20	2%			0.5%
			UG4	1	0%			0.0%
UGT2	32	0.7%	UG2	27	84%	84%	coincide	0.6%
			UG3	5	16%	16%	no coincide	0.1%
UGT3	528	12.0%	UG3	317	60%	60%	coincide	7.2%
			UG4	211	40%	40%	no coincide	4.8%
UGT4	2796	63.7%	UG4	1058	38%	38%	coincide	24.1%
			UG5	39	1%	62%	no coincide	0.9%
			UG2	20	1%			0.5%
			UG3	1679	60%			38.3%
Total	4389	100%	-	4389	-	-	-	100%
							% coincidencia	45%

Tabla 1. Comparación entre unidades geotécnicas modeladas y mapeadas en superficie, con cálculo de coincidencia y normalización por unidad.

Los subíndices en la Tabla 1 indican lo siguiente: (1) número de puntos en la unidad geotécnica (UGT) modelada; (2) porcentaje de puntos respecto al total; (3) UGT mapeada correspondiente a cada punto evaluado del modelo; (4) cantidad de puntos coincidentes con cada UG mapeada; (5) porcentaje de coincidencia por unidad entre modelo y mapeo; (6) porcentaje de conciliación específica por unidad; y (7) normalización de los puntos conciliados en relación con el total de puntos analizados.

Como resultado, se obtuvo una coincidencia global del 45 %, lo que indica una conciliación moderada entre el modelo y los datos observados. A nivel de unidades individuales, se identificaron casos de alta coincidencia (superior al 60 %) y otros con baja correspondencia, reflejando posibles inconsistencias en los límites litológicos o en la clasificación inicial de algunas unidades. Este hallazgo permitió establecer recomendaciones específicas para el ajuste de límites, revisión de criterios de agrupación y revalidación de dominios geotécnicos.

La clasificación de los resultados en rangos de desempeño facilitó su interpretación operativa. Bajo los criterios adoptados (>60

%: buena; 40–60 %: regular; <40 %: deficiente), se pudo priorizar el ajuste de aquellas unidades con menor grado de representación, orientando futuras campañas de mapeo y validación. Estos resultados demuestran la utilidad práctica de incorporar rutinas de conciliación como parte del ciclo de vida del modelo geotécnico. Además de permitir una evaluación cuantitativa, el enfoque propuesto aporta trazabilidad, objetividad y mejora continua a los procesos de caracterización del macizo rocoso.

CONCLUSIONES

La metodología presentada permite realizar la conciliación sistemática entre modelos tridimensionales de Unidades Geotécnicas (UGT) y el mapeo geotécnico levantado en terreno, utilizando herramientas ya disponibles en las operaciones mineras y sin requerimientos adicionales de software. Su implementación es simple, reproducible y adaptable a distintas escalas de análisis, lo que facilita su integración en los ciclos regulares de actualización del modelo geotécnico.

El caso piloto aplicado evidenció una coincidencia global del 45 %, lo que permitió identificar desviaciones relevantes en la representación de algunas unidades, así como oportunidades concretas para mejorar la definición de límites y dominios. La clasificación de resultados por rangos de desempeño demostró ser útil para priorizar ajustes y orientar futuras campañas de validación. Por otro lado, si bien la conciliación permite identificar discrepancias entre el modelo proyectado y las observaciones en terreno, es importante reconocer que el mapeo geotécnico también presenta limitaciones inherentes, tales como la variabilidad en la escala de observación, sesgos asociados a la accesibilidad o la interpretación y restricciones operativas durante su levantamiento.

Se concluye que incorporar procesos de conciliación como parte integral del ciclo de vida del modelo geotécnico permite reducir la incertidumbre en la caracterización del macizo rocoso, fortalecer la trazabilidad entre datos de campo y modelos, además de mejorar la calidad del soporte geotécnico para la toma de decisiones de diseño y operación.

Finalmente, se recomienda aplicar esta metodología de forma periódica y ajustada a las condiciones de cada operación, promoviendo la mejora continua y la coherencia entre modelos y realidad observada.

REFERENCIAS

Read, J. y Stacey, P. (2009). Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing; CRC.

INFLUENCIA DE LA SUCCIÓN MATRICIAL EN LA ESTABILIDAD DEL TALUD DE UNA PRESA DE RELAVES MINEROS

Juan P. Cerutti[1], Marcelo E. Zeballos[2]
[1]Consultora AbyaTerra, Albano de Labergue 6240, Córdoba, Argentina.
[2]Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba, Argentina.
Mail de contacto: juanpcerutti@gmail.com

RESUMEN

El proceso de concentración de minerales desarrollado en la industria minera metalífera genera grandes volúmenes de residuos, que suelen almacenarse en presas de relaves. En estas estructuras, la causa más común de falla es el deslizamiento del talud de la presa o del cuerpo de la misma junto con su fundación. En las presas de relaves, los fenómenos capilares asociados a condiciones de saturación parcial son particularmente relevantes debido a la granulometría fina de los materiales almacenados. Por lo tanto, la Mecánica de Suelos No Saturados tiene un gran potencial de aplicación.

Este artículo analiza la influencia de la succión matricial en la estabilidad del talud de una presa de relaves en etapa de cierre. La presa se encuentra en la provincia de Neuquén, Argentina. La evaluación se llevó a cabo mediante la implementación de un proceso secuencial de flujo-estabilidad. Se simuló una primera etapa de flujo saturado/no saturado para obtener distribuciones de presiones de poro, seguida de un análisis de estabilidad mecánica que incorporó el efecto de la succión matricial en la resistencia al corte de los suelos.

Los análisis presentados permiten comparar la estabilidad de la presa desde dos perspectivas geotécnicas: (i) Mecánica de Suelos Saturado y (ii) Mecánica de Suelos no Saturados.

Palabras clave: presa de relaves, estabilidad, succión, talud.

ABSTRACT

The mineral concentration process developed in the metal mining industry, generates large volumes of waste, which are typically stored in tailings dams. In such structures, the most common cause of failure is the sliding of the dam slope or the dam body and its foundation.

In tailings dams, capillary phenomena associated with partially saturated conditions are particularly relevant due to the fine-grained nature of the stored materials. As a result, Unsaturated Soil Mechanics has significant potential for application.

This study examines the influence of matric suction on the slope stability of a tailings dam in its closure phase. The dam is located in the province of Neuquén, Argentina. The evaluation was carried out through the implementation of a sequential flow-stability process. A first stage involving saturated/unsaturated seepage was simulated to obtain pore pressure distributions, followed by mechanical stability analysis that incorporated the effect of matric suction on the shear strength of the soils.

The present analyses allow to compare the dam stability from two geotechnical perspectives: (i) Saturated Soil Mechanics and (ii) Unsaturated Soil Mechanics.

Keywords: tailings dam, stability, suction, slope.

INTRODUCCIÓN

El proceso de concentración mineral desarrollado en la industria minera metalífera genera grandes volúmenes de residuos, los cuales suelen almacenarse en presas de relaves con el objetivo de reducir su impacto ambiental.

De acuerdo al análisis de casos históricos de accidentes de presas de relaves mineros ocurridos en el mundo, se identifica el deslizamiento del talud de la presa o del cuerpo de la presa junto con su fundación, como la forma más frecuente de rotura. Stark et al. (2022) muestran que las fallas por inestabilidad del talud tienen una frecuencia similar a aquellas provocadas por acciones sísmicas o por overtopping. En un número importante de casos de deslizamiento se sabe que los accidentes estuvieron precedidos por un período de lluvias intensas; aunque en muchos otros casos actuales, las inestabilidades de talud fueron desencadenadas por procesos de licuación de los relaves almacenados, lo que también se conoce con el nombre de falla no drenada (Arroyo y Gens, 2022). Asimismo, los estados tensionales propios de los suelos afectados favorecen una rápida activación de mecanismos de falla ante mínimas adiciones de solicitaciones sísmicas (Fan et al., 2024).

El funcionamiento hidráulico de una presa de relaves, tanto en operación como en las etapas de cierre y post-cierre, es clave

para su estabilidad geotécnica. En la fase post-operativa, este comportamiento está influenciado por factores ambientales (lluvias, deshielos, evaporación, ingreso de agua subterránea desde vertientes, drenaje hacia la fundación o a través de la presa) y procesos propios del material fino que constituye a los relaves, como la consolidación, infiltración, escurrimiento superficial y ascenso capilar (Oldecop et al., 2008).

Los fenómenos capilares, asociados a condiciones de saturación parcial, tienen especial relevancia en los depósitos de relaves debido a la granulometría fina de los materiales almacenados, que favorece la acción de la succión matricial. Es por ello que la Mecánica de Suelos no Saturados tiene en este tipo de estructuras un campo de aplicación importante (Oldecop et al., 2008).

En este artículo se analiza la influencia de la succión matricial en la estabilidad del talud de una presa de relaves en etapa de cierre. Esta evaluación se lleva a cabo mediante la implementación de un proceso secuencial de flujo-estabilidad. En este proceso, se simuló una primera etapa de flujo saturado/no saturado y, subsecuentemente, la estabilidad mecánica considerando el efecto de la succión matricial en la resistencia al corte de los suelos.

Los análisis presentados permiten comparar el grado de estabilidad de la presa minera desde dos enfoques geotécnicos: i) Mecánica de Suelos Saturados y ii) Mecánica de Suelos no Saturados. En ambos casos, las evaluaciones se realizan simulando diferentes estados de cargas a los que podría estar expuesta la presa durante la etapa de cierre.

A continuación, se presentan las características del caso de estudio, para luego describir la secuencia de análisis aplicada y los resultados obtenidos.

CASO DE ESTUDIO

La presa minera analizada corresponde a una típica presa de arena de relaves (*tailing sand dam*), ubicada en la provincia de Neuquén, Argentina. La sección transversal tipo de la presa, es la que se muestra en la Figura 1.

Esta instalación minera, estuvo en operación entre los años 2002 y 2015. Actualmente, se encuentra en la etapa de cierre activa.

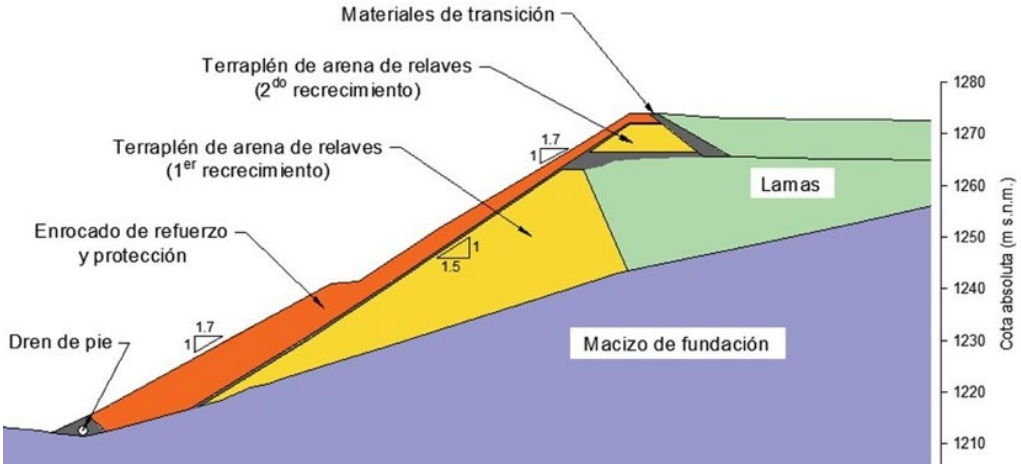


Fig. 1. Sección tipo de la presa de relaves.

El terraplén perimetral de la presa ha sido construido utilizando la fracción arenosa del relave, mientras que las lamas (fracción fina residual) fueron almacenadas en la cubeta del depósito. La presa se construyó mediante el método de recrecimiento hacia aguas arriba (*Up-stream*). En el cuerpo de presa se identifican zonas de transición que funcionan como filtros y drenes, así como un enrocado de refuerzo y protección. Todos estos últimos componentes fueron construidos con suelos granulares seleccionados de yacimientos cercanos.

Propiedades mecánicas de los materiales

En la Figura 2 se presentan las curvas granulométricas de los materiales que componen la sección tipo de la presa. Como se aprecia, existen cuatro tipos de suelos, que van desde gravas limpias, hasta limos no plásticos con un pasante del tamiz 200 superior al 90%.

La resistencia al corte de los materiales de la presa en estado saturado, fue definida en términos del modelo de Mohr-Coulomb. Para el caso de los suelos en estado no saturado, la resistencia al corte se estimó con el criterio de Mohr-Coulomb extendido a los suelos no saturados (Fredlund et al., 1978), a partir de la siguiente expresión:

$$\tau_{unsat} = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi^b \qquad (1)$$

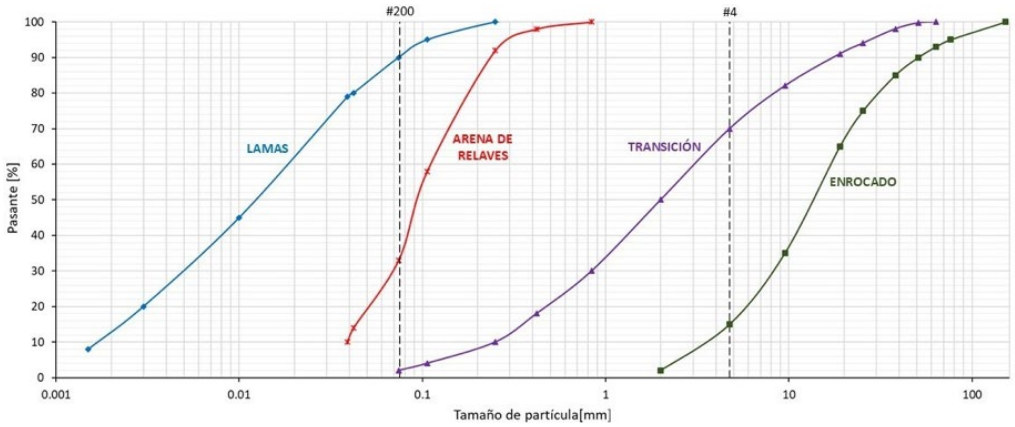


Fig. 2. Curvas granulométricas de los materiales de la sección tipo de la presa.

Donde τ_{unsat} es la resistencia al corte del suelo no saturado, c´ es la cohesión efectiva a succión cero, c´ es el ángulo de fricción interna efectivo (estado saturado), φb es el ángulo que define la tasa de incremento de τ_{unsat} con respecto a la succión del suelo, $(\sigma\text{-}u_a)$ es el esfuerzo normal neto sobre el plano de falla y $(u_a\text{-}u_w)$ es la succión matricial del suelo en el plano de falla.

Para la estimacion de φ^b, se aplicó una expresión no lineal usando el contenido de humedad normalizado (Θ_n) obtenido de las curvas características suelo-agua de cada material, tal que: $[\tan \varphi^b] = [\Theta_n \tan \varphi']$ (Vanapalli et al., 1996).

En la Tabla 1 se presentan propiedades geotécnicas básicas y parámetros de resistencia al corte drenados (saturados y no saturados) y no drenados de los materiales de la presa.

MATERIAL	PU^{dry} [kN/m³]	PU_{sat} [kN/m³]	c´sat [kPa]	φ'_{sat} [°]	$tg\ (\varphi^b)_{unsat}$ [°]	$S_{u\text{-}pico}$ [kPa]	$S_{u\text{-}res}$ [kPa]
Enrocado	20	23	0,0	40	$\Theta_n \tan \varphi'$	---	---
Transición	18	21	0,0	35		---	---
Arena de relaves	16	20	0,0	34		---	---
Lamas	12	18	0,0	28		23,0	$0{,}07.\sigma_0'$

Tabla 1. Parámetros geotécnicos básicos y mecánicos de los materiales de presa.

Propiedades hidráulicas de los materiales

El comportamiento hidráulico de los materiales que conforman la presa de relaves fue definido a partir de funciones de conductividad hidráulica, calculadas mediante el modelo de estimación simplificado propuesto por Fredlund, Xing y Huang (1994).

Para resolver dicho modelo se utilizaron: i) conductividades hidráulicas en estado saturado y ii) curvas características suelo-agua (SWCC). Estas últimas, fueron elaboradas con el modelo de ajuste de Fredlund y Xing (1994) y sus parámetros de ajuste (a_f, n_f, m_f, ψ_{res}) se obtuvieron con el método de Fredlund, Wilson y Fredlund (2002). El procedimiento detallado de asignación de parámetros se presenta detalladamente en Cerutti, J. P. (2024). En la Figura 3 se presentan las SWCC y funciones hidráulicas elaboradas para cada material de la presa.

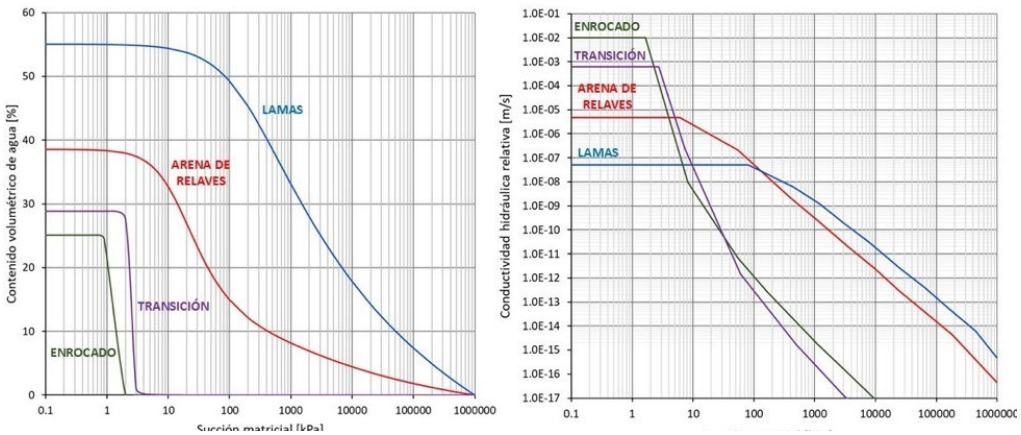


Fig. 3. Curvas características SWCC (izquierda) y funciones de conductividad hidráulica (derecha).

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La estabilidad mecánica del talud de la presa se ha realizado mediante la implementación de un proceso secuencial de flujo-estabilidad, que combina la utilización de un modelo de equilibrio límite junto con un modelo de flujo interno en medios porosos.

En una primera etapa, se desarrolló un modelo numérico de flujo saturado/no saturado bajo condiciones hidráulicas estacionarias y transitorias. Estas últimas, asociadas a la aplicación de una lluvia extrema sobre la presa. Este conjunto de simulaciones, permitió obtener distribuciones de presiones de poros vinculadas a diferentes acciones hidráulicas a las que podría estar sometida la presa en la etapa post-operativa.

En la segunda etapa del proceso secuencial, se ha realizado el análisis de la estabilidad mecánica del talud de la presa mediante la aplicación de un modelo de estabilidad en equilibrio límite. Para ello, se definieron escenarios de simulación que combinan diversos tipos de solicitaciones (gravitatorias, presiones de poros y aceleraciones sísmicas) junto con diferentes condiciones de comportamiento del suelo (drenado y/o no drenado). Estos escenarios pretenden representar estados de carga potenciales que podrían inducir la inestabilidad del talud en la etapa post-operativa. Para evaluar la estabilidad mecánica del talud, se calcularon Factores de seguridad globales (FS), utilizando las ecuaciones del modelo de rotura de Bishop simplificado. Inicialmente, los FS se calcularon sin considerar el aporte de los medios no saturados a la resistencia al corte. Posteriormente, se incorporó el efecto de la succión matricial, con el fin de evaluar su influencia en la estabilidad del talud.

Para los análisis de estabilidad mecánica del talud de la presa, se definieron los escenarios de simulación que se resumen en la Tabla 2.

ESCENARIO	COMBINACIÓN DE CARGAS	DESCRIPCIÓN	
		RESISTENCIAS	PRESIONES DE POROS
Usual	Largo plazo. Peso propio de los suelos.	Drenadas	Flujo estacionario
Extremo 1	Corto plazo. Peso propio de los suelos + infiltración de lluvia extrema.	Drenadas / No drenadas	Flujo transitorio
Extremo 2	Corto plazo. Peso propio de los suelos + acción sísmica (pseudo-estático).	Drenadas / No drenadas	Flujo estacionario
Extremo 3	Corto plazo. Peso propio de los suelos + licuación de lamas en cubeta.	Drenadas / No drenadas	Flujo estacionario

Tabla 2. Escenarios de simulación de la estabilidad mecánica del talud.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los factores de seguridad (FS) obtenidos. Estos FS corresponden a fallas profundas que atraviesan, tanto a las lamas como a las arenas de relaves, tal como se ejemplifica en la Figura 4. El análisis realizado permite visualizar la diferencia entre los FS calculados según el enfoque clásico respecto de aquellos que consideran las contribuciones adicionales de la succión, propia de los medios no saturados.

ESCENARIO	FS CALCULADO (SEGÚN ENFOQUE MSS)	FS CALCULADO (SEGÚN ENFOQUE MSNS)	DIFERENCIA ENTRE FS[%]
Usual	1,51	2,04	26
Extremo 1	1,18	1,41	16
Extremo 2	1,02	1,26	19
Extremo 3	1,15	1,48	20

Tabla 3. FS calculados según enfoque de la mecánica de suelos saturados (MSS) y no saturados (MSNS).

Los resultados presentados en la Tabla 3 muestran que la incorporación del efecto de la succión matricial en el análisis de estabilidad incrementa los factores de seguridad (FS) entre un 16% y un 26%. El mayor aumento se observa en el escenario Usual, donde tanto las lamas como las arenas de relaves se modelan en condiciones drenadas. En cambio, en los escenarios Extremos, las lamas se modelan en condición no drenada ($\varphi'_{sat}= 0°$), por lo que la succión matricial sólo se aplica a las arenas del terraplén perimetral. Esta diferencia explica el incremento relativamente menor de los FS en los escenarios Extremos respecto al Usual.

CONCLUSIONES

En la práctica profesional, la estabilidad geotécnica de una presa de relaves, desde la etapa de diseño inicial hasta las fases post-operativas, se analiza bajo los principios de la Mecánica de Suelos Saturados. Este enfoque, proporciona resultados conserva-

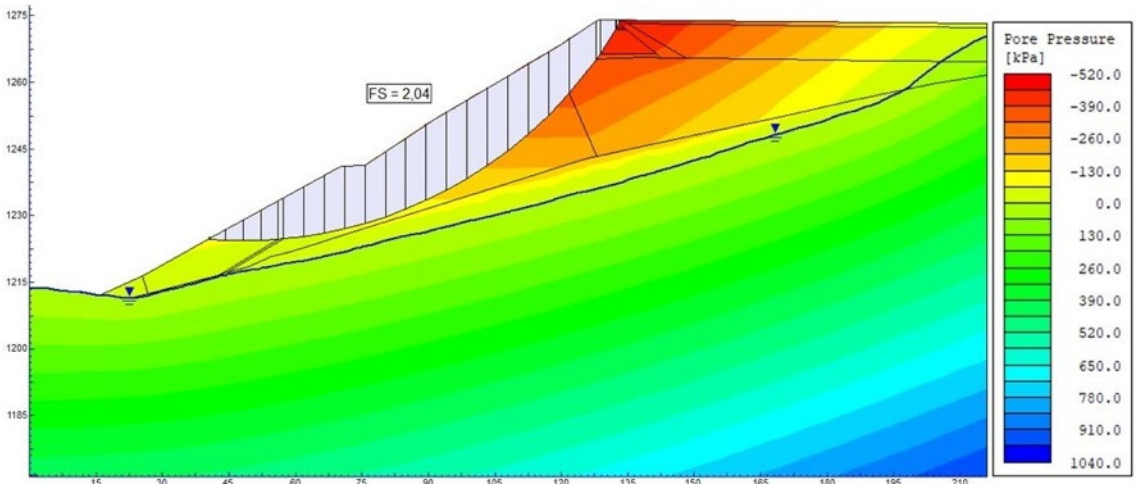


Fig. 4. Ejemplo de superficie de deslizamiento profunda analizada.

dores en comparación con aquellos obtenidos mediante la Mecánica de Suelos No Saturados, debido a que asume un estado de succión cero o saturación total del medio poroso.

En el contexto anterior, la Mecánica de Suelos No Saturados tiene un campo de aplicación más limitado, aunque no menos importante. En los casos que se estudian eventos de falla, este enfoque es fundamental para caracterizar de manera más realista el comportamiento hidro-mecánico desarrollado por los suelos. Con este objetivo, se deben definir parámetros geotécnicos en condiciones saturadas y no saturadas. Los parámetros en condiciones saturadas generalmente son establecidos a través de ensayos geotécnicos clásicos. Los parámetros no saturados, cuando no se dispone de mediciones directas, pueden estimarse inicialmente a partir de relaciones simplificadas publicadas en bibliografía específica.

El proceso de análisis presentado muestra una aplicación en estado básico de tratamiento del tema y permite valorar las condiciones de "mejora" asociadas a la contribución de los suelos en estado no saturado. Estos principios, son aplicables en análisis de la condición inicial de casos de falla, o en la valoración de los efectos transitorios de mejora del FS inducidos por estados no saturados en los suelos que forman parte del problema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa CORMINE S.E.P. por permitir la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

Arroyo, M. y Gens, A. (2022). La rotura de la presa de relaves de Brumadinho: la montaña de cristal. XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Mieres (Asturias), España.

Cerutti, J. P. (2024). Estabilidad Mecánica de una Presa de Relaves Incorporando Principios de
la Mecánica de Suelos no Saturados. Trabajo Final de Maestría en Geotecnia. Universidad Nacional de Córdoba.

Fan, B., Cheng, Z., Wang, T. y Wang, S. (2024). Dynamic Response Characteristics and Liquefaction Analysis of a Phosphogypsum Tailings Dam. International Journal of Geomechanics, ASCE, ISSN 1532-3641.

Fredlund, D. G, Morgenstern, N. R. y Widger, R. A. (1978). Shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 15, 313-321.

Oldecop, L., Zabala, F., Rodríguez, R. y Garino, L. (2008). Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros. Actas del V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. Tucumán, Argentina.

Stark, T. D., Moya, L. y Lin, J. (2022). Rates and Causes of Tailings Dam Failures. Advances in Civil Engineering. Volume 2022, Article ID 7895880, 21 p.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. y Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 33: 3, 379-392.

MATERIALES RESIDUALES DE CANTERA EN REEMPLAZO DE CEMENTO PÓRTLAND

Gabriela S. Coelho dos Santos[1,3,4,5], Damián E. Benito[2,6,7,8], Mabel E. Lanfranchini[1,3,5]
[1]Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CIC, 526 e7 10 y 11 (1900), La Plata, Argentina.
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA, Argentina.
[3]Instituto de Recursos Minerales (INREMI) (FCNyM-UNLP-CICPBA), Calle 64 esq 120 (1900), La Plata, Argentina.
[4]Laboratorio LEMIT (CICPBA), Av. 52. s/n 121 y 122, La Plata, Bs. As. Argentina.
[5]Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, Av. 122 y 60 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[6]Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC), CONICET-CIC-UNLP, Camino Parque Cementerio entre 505 y 508 (1897), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[7]Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, calle 115 y 47, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[8]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Av. 1 y 47, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Mail de contacto: gabrielacoelho@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN
El principal objetivo de este trabajo es evaluar mediante ensayos físico-tecnológicos un residuo fino, cuarzo-arcilloso para ser utilizado en reemplazo del cemento Pórtland. Este residuo se obtiene a partir del lavado de rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce extraídas en la cantera Minera Yaraví (MY) de la localidad de Batán, provincia de Buenos Aires. El uso de este tipo de materiales reduce en gran medida el impacto ambiental que produce la producción industrial del cemento.
El material debe ser activado térmicamente para obtener tanto propiedades cementíceas, como puzolánicas. En trabajos previos se determinó que la activación térmica del material sucede a los 700°C. En primer lugar, se procedió a confirmar el comportamiento térmico del residuo mediante análisis térmico diferencial, termogravimetría y difracción de rayos X; por otra parte, se realizaron sobre el residuo calcinado a 700°C, estudios de determinación de la actividad puzolánica mediante el ensayo químico de Frattini. Además, se determinó la aptitud del material para inhibir la reacción álcali-sílice (RAS) de arenas potencialmente reactivas del sur de la provincia de Buenos Aires mediante el método acelerado de la barra de mortero, IRAM 1674. Con este método se considera que un agregado es reactivo cuando la expansión de los morteros es igual o superior a 0,100% a los 16 días. Se concluye que el material calcinado a 700°C es puzolánico.

Palabras clave: sustentabilidad, residuo, puzolana, cemento ecoeficiente, RAS.

ABSTRACT
The main objective of this study is to evaluate, through physical-technological tests, a fine quartz-clay residue to be used as a replacement for Portland cement. This quarry waste is obtained from the washing of quarzitic rocks from the Balcarce Formation, extracted at the Minera Yaraví (MY) quarry located in Batán, Buenos Aires Province. The use of this type of material significantly re-duces the environmental impact caused by industrial cement production.
The material must be thermally activated to acquire both cementitious and pozzolanic properties. Previous studies determined that thermal activation occurs at 700°C. First, the thermal behaviour of the residue was confirmed through differential thermal analysis, thermogravimetry, and X-ray diffraction. Additionally, pozzolanic activity of the residue calcined at 700°C was assessed using the Frattini chemical test. Moreover, the material's capacity to inhibit the alkali-silica reaction (ASR) in potentially reactive sands from the south of Buenos Aires Province was evaluated using the accelerated mortar bar test, according to IRAM 1674. This method considers an aggregate to be reactive when mortar expansion is equal to or higher than 0.100% after 16 days. It was con-cluded that the material calcined at 700°C is pozzolanic.

Keywords: sustainability, quarry waste, pozzolana, eco-efficient cement, ASR

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el producto volumétricamente más manufacturado en el mundo. Se trata de un material mixto constituido por áridos (piedra y arena), cemento (normal o con características especiales) y agua. El cemento al hidratarse constituye el material ligante o aglutinante del hormigón. A nivel mundial, se espera un crecimiento de la demanda de estos materiales de un 12% a un 23% para el año 2050 en tanto que las economías sigan en crecimiento. En este contexto, los gobiernos de todo el mundo analizan estrategias tecnológicas, marcos regulatorios e inversiones para reducir las emanaciones de CO_2 en la industria del cemento

con la intención de limitar el aumento de la temperatura global promedio en el marco de proyectos internacionales como Energy Technology Perspectives. Las estrategias que se destacan son: (1) mejorar la eficiencia energética, (2) cambiar a combustibles con menos carbono, (3) reducir la relación clínker-cemento y 4) implementar tecnologías emergentes e innovadoras como la captura de carbono (IEA Technology Roadmap Report, 2018). El principal objetivo de este trabajo esta alineado con la tercer estrategia propuesta, buscando la reducción de la relación clínker-cemento. Provis (2018) en un trabajo que forma parte de la serie de Libros Blancos del PNUMA sobre Cementos Ecoeficientes, ofrece un breve análisis de la clase de materiales cementantes conocidos como "ligantes activados por álcali", que se identifican por tener potencial de utilización como un componente clave de una futura industria mundial sostenible de materiales de construcción. El autor dice que no se espera que estos materiales sustituyan al cemento Portland en todas sus aplicaciones, debido a limitaciones en cuanto al suministro, y dificultades prácticas en algunos modos de aplicación además de la necesidad de un control riguroso en la formulación y el curado. Sin embargo, en este trabajo se destaca que cuando se producen con materias primas disponibles localmente, con diseños de mezcla bien formulados (considerando especialmente la huella ambiental del activador alcalino) y con un control de calidad adecuado, los ligantes activados alcalinamente son un componente potencialmente importante y rentable del conjunto de materiales de construcción sostenibles del futuro. Entre los materiales estudiados por Provis (2018) se mencionan a las arcillas calcinadas. Las arcillas tipo caolinita son consideradas como un alumino-silicato precursor, el cual requiere de una molienda, transporte y calcinación para transformar esa materia prima en un material ligante álcali-activado.

En línea con esta perspectiva, Coelho dos Santos et al. (2022) estudiaron el residuo de lavado de rocas cuarcíticas de la Formación Balcarce extraídas en la cantera Minera Yaraví (MY) de la localidad de Batán, provincia de Buenos Aires. En dicha cantera se extraen arenitas cuarzosas y sabulitas para la producción de áridos. El material residual de lavado se compone de arcillas, principalmente caolinita y cuarzo muy fino que originalmente rellenan los poros de las arenitas cuarzosas, aunque también proviene de los niveles de arcillas que intercalan con los potentes bancos de arenitas, que son sometidos al mismo proceso de trituración (Coelho dos Santos, 2017).

Para la realización de este trabajo se obtuvieron materiales producidos recientemente por la misma cantera (MY). Se volvieron a analizar ciertas características del material, incorporando ensayos más específicos orientados a evaluar la efectividad de dicho material calcinado a 700°C como inhibidor de la reacción álcali-sílice en hormigones de cemento Pórtland (IRAM 1651, IRAM 1531). Esta reacción es expansiva y perjudicial para las estructuras de hormigón, ya que los agregados (áridos) con sílice inestable en pH alcalino (rocas volcánicas con vidrio volcánico o micro sílice, cherts compuestos de ópalo, calcedonia, rocas con cuarzo micro y criptocristalino o altamente deformado), reaccionan con el álcali del líquido de poros presente en la pasta cementícea, produciendo un gel expansivo que contribuye a la fisuración y ruptura del hormigón (Grattan-Bellew, 1981, 1986, 1989).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es dar a conocer las características tecnológicas de un residuo local con potencial para abastecer al polo industrial cementero del centro de la provincia de Buenos Aires. Este residuo, con una alta proporción de caolinita, al ser calcinado a 700°C se transforma en metacaolín, un material con propiedades puzolánicas que representa una alternativa viable para la reducción de la relación clínker-cemento. Además de sus ventajas funcionales, su uso implica un menor consumo energético que la producción de clínker, no genera emisiones directas de CO_2 y libera una baja proporción de vapor de agua, lo que lo posiciona como una opción sustentable en la fabricación de cementos especiales.

Es importante destacar que las canteras productoras del residuo en estudio, ubicadas en la localidad de Batán, se encuentran a aproximadamente 300 km de Olavarría y a la localidad de Loma Negra centro productor de cemento Pórtland en la Provincia de Buenos Aires (Fig. 2A). En la Fig. 2B, se pueden observar dos canteras pertenecientes a la empresa Yaraví, Minera y La Florida, las cuales explotan el árido cuarcítico y poseen las plantas de lavado en donde se recupera el material fino residual aquí estudiado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El material estudiado corresponde a un residuo fino cuarzo-arcilloso producto del lavado del árido cuarcítico explotado en la cantera MY de la localidad de Batán, provincia de Buenos Aires. El material es de granulometría fina y se compone de cuarzo y arcillas, principalmente caolinita e illita. Las arcillas originalmente se encuentran en los poros de las arenitas cuarzosas, y de niveles arcillosos de poco espesor que intercalan con gruesos bancos de arenitas de la Formación Balcarce (Fig. 1).

La toma de muestras se realizó en piletones en el interior de la cantera MY, donde el material se acumula por decantación en el agua de lavado. Las muestras fueron tomadas con pala y almacenadas en bolsas plásticas. En el laboratorio el residuo muestreado fue acondicionado, ya que su condición de humedad era elevada al momento del muestreo. El material fue secado en estufa a 100 °C durante 24h, en bandejas metálicas, distribuidas de manera pareja, para luego ser disgregado durante 5 minutos en un molino de anillos.

Métodos

El residuo fue analizado mediante difracción de rayos X utilizando un difractómetro Bruker D8 con radiación Cu-Kα (λ = 0, 154 nm), 40 kV y 20 mA, y un rango 2θ de 3° a 70°, y la morfología del material fue estudiado mediante microscopia electrónica de barrido (microscopio JEOL JCM-6000 en condiciones de alto vacío y un potencial de 5kV con detector de electrones secundarios)

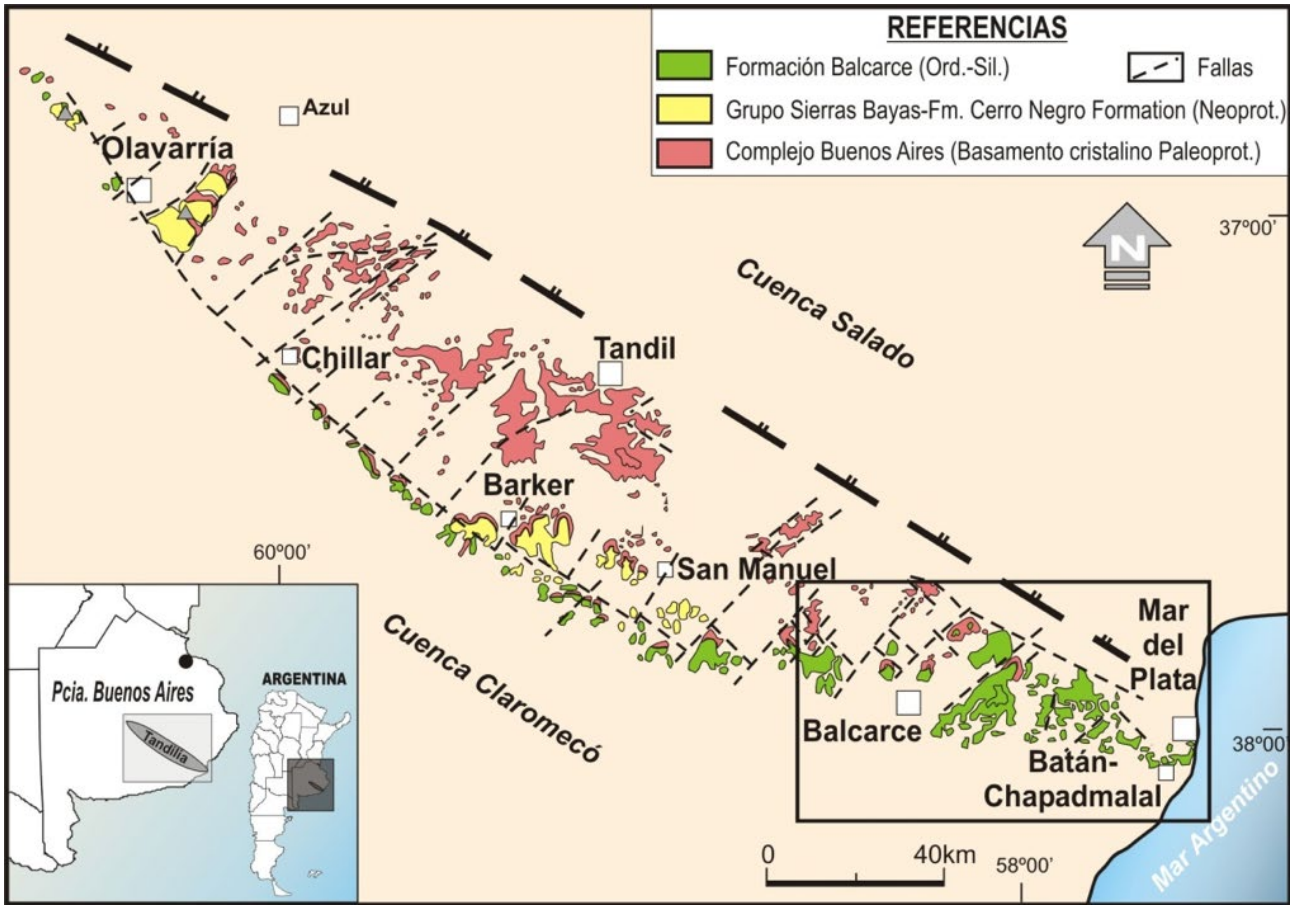


Fig. 1. Mapa geológico-estructural de las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. En el recuadro se resaltan las zonas con mayor desarrollo de las cuarzo-arenitas (cuarcitas) de la Formación Balcarce y la presencia de canteras. (Tomado de Coelho dos Santos, 2019).

tanto su estado natural como calcinado, ambos con metalizado en oro. También se realizó el análisis térmico diferencial y termogravimétrico con el fin de determinar la pérdida de masa por calcinación y registrar las temperaturas a la que se producen los cambios de fases, con un termo gravímetro (TGA) Netzsch-Germany con un calentamiento de 5 °C/min en una atmósfera de oxígeno, hasta 1000°C utilizando α-aluminio como referencia.

Para comprobar la actividad puzolánica del residuo calcinado se realizó el ensayo Frattini, IRAM 1651, el cual implica la titulación química para determinar la concentración de Ca^{2+} y OH^- en una solución, siguiendo lo especificado en la norma (muestras con 70% cemento y 30% del calcinado en mezclas con 100 ml de agua destilada). Por otra parte, se confeccionaron probetas de laboratorio elaboradas con distintas mezclas de mortero, utilizando dos arenas de distinta reactividad y diferentes porcentajes de reemplazo de cemento Pórtland por el residuo calcinado a 700°C (0%, 15% y 30%). Las mismas fueron ensayadas según la norma IRAM 1674. El ensayo consiste en moldear tres barras de mortero de 25 mm x 25mm x 285 mm. Las probetas fueron confeccionadas con 440 g de material ligante (cemento y residuo calcinado) y 990 g de agregado. La relación agua cemento (a/c) especificada fue de 0,47. Las barras se desmoldaron a las 24 horas y al día siguiente, luego de la primera lectura de expansión con comparador, se colocan en una solución de NaOH 1N a 80°C, realizando lecturas periódicas con lapsos de tiempo no superiores a dos días. Según la norma IRAM 1531, el agregado es considerado potencialmente reactivo cuando la expansión del mortero a los 16 días es igual o mayor de 0,100%.

Además, sobre las mezclas en estado fresco se determinó la fluidez de las mismas con una mesa de flujo según la norma internacional ASTM C1437, evaluando indirectamente la demanda de agua y la trabajabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 3, se muestran los resultados de los difractogramas del residuo natural (RN) y del residuo calcinado (RC) a 700°C. En el primero de ellos se observan los picos de cuarzo, caolinita e illita, el cual se diferencia del RC por la ausencia de los picos de caolinita. A una temperatura de 700°C la colinita desparece cambiando a su fase activa, el metacaolin.

Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), se pudo identificar en el RN la presencia de partículas mayores de cuarzo y partículas arcillosas de muy pequeña granulometría correspondientes a caolinitas, las cuales se observan como pequeños hexágo-



Fig. 2. Imágenes de Google Earth: A. Se aprecia la distancia y la vía de comunicación a través de la RPN 226 entre la zona de producción del residuo, cercana a la ciudad de Mar del Plata, y la región centro de la provincia (Olavarría-Loma Negra), zona de producción del cemento Pórtland. B. Canteras de la Localidad de Batán en recuadro rojo, Partido de General Pueyrredón, en donde se obtiene tanto el árido cuarcítico como el residuo fino producto del lavado de la arena de trituración.

nos dispuestos en forma de "librito" o con una morfología tipo "face to face". Mezclada con estas últimas, se identifica illita dispuesta en "hojas" alargadas (Fig. 4A y B). En el RC, se identifican tamaños de partícula similares; sin embargo, el material presenta una textura más aglomerante. Las partículas más pequeñas corresponden a metacaolín, cuya morfología tipo "librito" aparece alterada: las partículas se presentan plegadas y, entre sus capas, se alojan partículas más finas.

Por otro lado, el análisis térmico diferencial (ATD) realizado sobre el RN, muestra que la pérdida de masa por calcinación es muy baja, de aproximadamente 1,5%. Además, el análisis termogravimétrico (tg) y su derivada (δtg) muestran que la pérdida de masa se da en dos procesos, al igual que el ATD en donde se observan en las mismas posiciones, dos pequeñas bandas endotérmicas, en torno a los 500°C y los 700°C, compatibles con los cambios de fase que sufre la fracción arcillosa, principalmente la de caolinita durante el proceso de cambio de fase y activación térmica (Fig. 5).

La actividad puzolánica fue comprobada mediante el ensayo químico normalizado denominado método Frattini. Los resultados obtenidos por este método (Fig. 6) indican que, pasados 7 días, el consumo de los iones de calcio y la alcalinidad total fueron suficientes para que el RN se ubicara en la zona puzolánica de la curva de saturación (bajo la curva), por lo que no fue necesario prolongar el tiempo de reacción a 28 días.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del ensayo acelerado, IRAM 1674, y la fluidez del material para cada una de las mezclas. Los datos presentados comprueban la efectividad del RC como puzolana para inhibir la reacción álcali-sílice en morte-

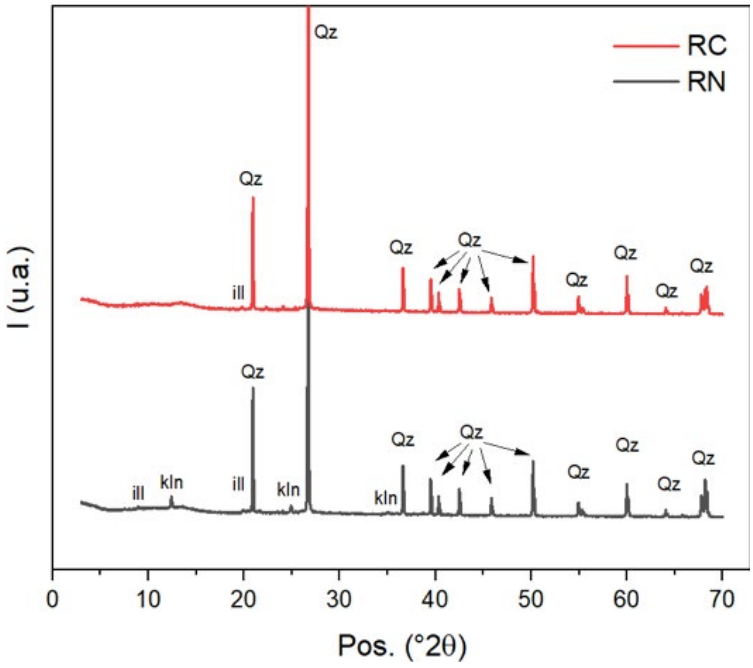


Fig. 3. Difractogramas del residuo estudiado. RN: residuo natural y RC: residuo calcinado.
Qz: cuarzo, kln: caolinita; ill: illita

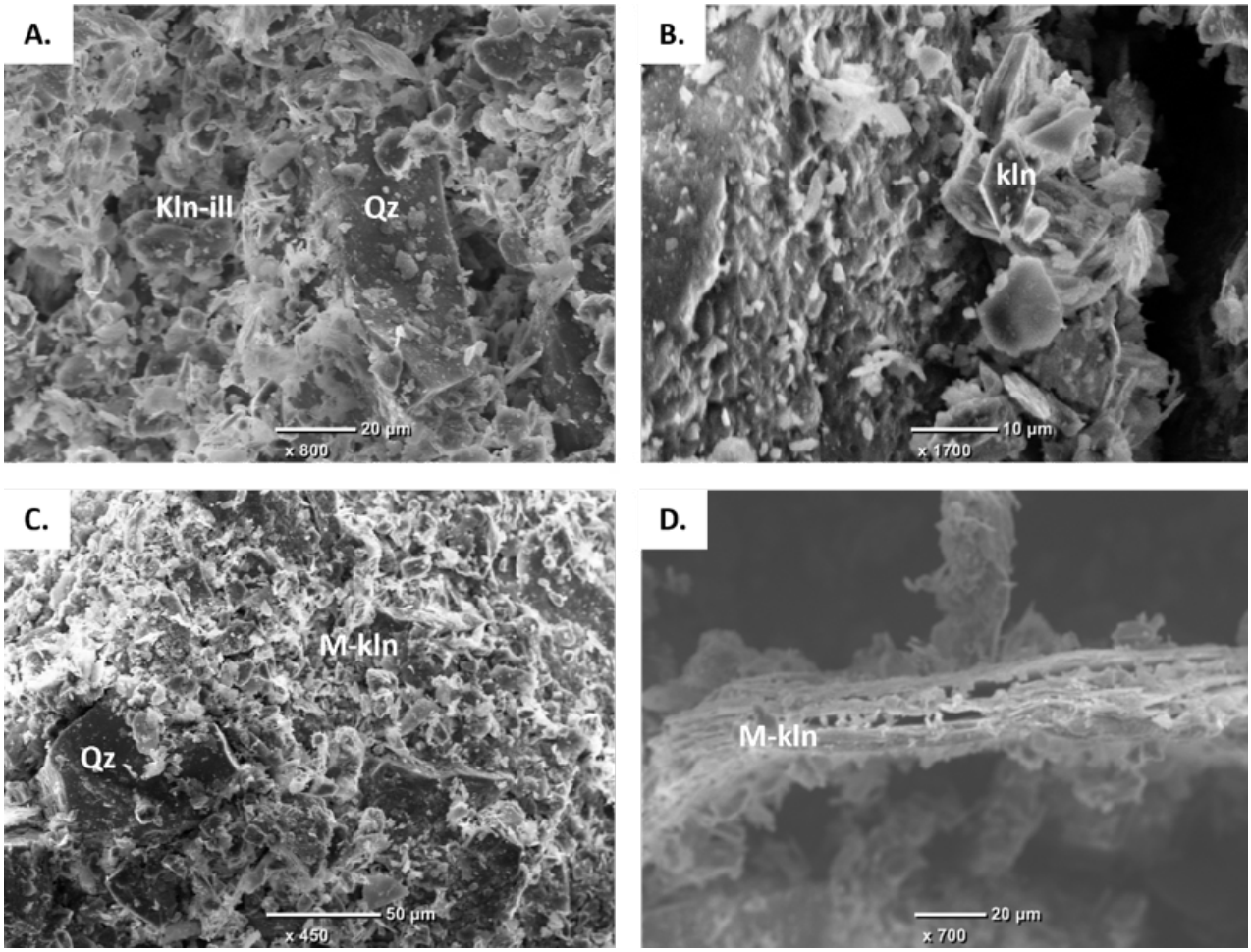


Fig. 4. Imágenes de MEB. A y B. pertenecen al RN, sin calcinar. Qz: cuarzo, kln-ill: caolinita-illita; kln: caolinita. C y D. pertenecen al RC. Qz: cuarzo; M-kln: metacaolín.

ros, mostrando que para arenas de moderada reactividad fue suficiente reemplazar en un 15% en peso la proporción de cemento por el RC, mientras que en arenas de moderada reactividad fue necesario elevar el porcentaje de reemplazo a un 30%. Por otro lado, en cuanto a la medida de la fluidez de las mezclas, es notorio que a medida que la proporción del RC aumenta la fluidez disminuye,

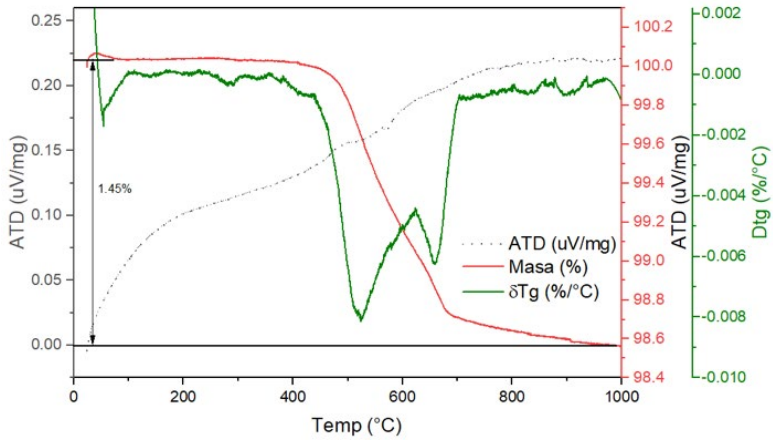


Fig. 5. Gráficas de los ATD-Dtg realizado sobre el RN.

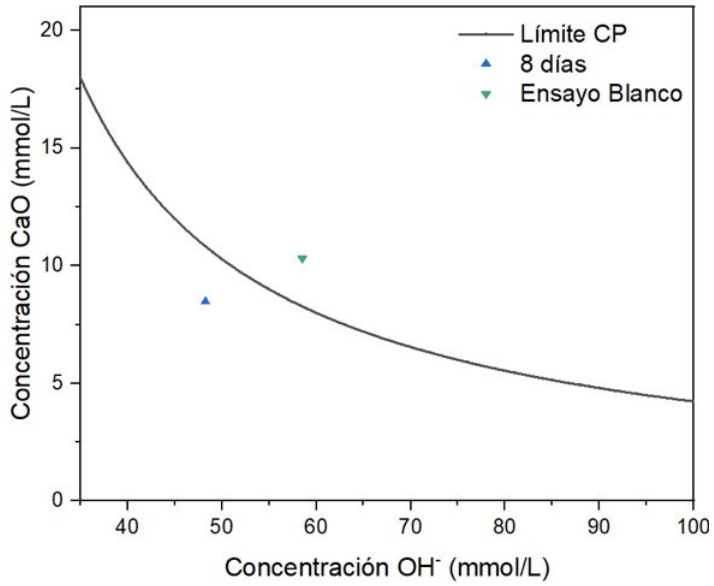


Fig. 6. Curva de saturación del método Frattini. La solución con 30% de RC (triangulo azul) se ubica en la zona puzolánica.

AGREGADO	EXPANSIONES (%) A LOS 16 DÍAS		
	MORTERO PATRÓN (CEMENTO PORTLAND NORMAL, CPN)	15% DE RESIDUO EN REEMPLAZO DEL CPN	30% DE RESIDUO EN REEMPLAZO DEL CPN
Arena 1 (1674)	0,252	0,016	0,015
Arena 1 (Fluidez %)	107	98	70
Arena 2 (1674)	0,486	0,267	0,063
Arena 2 (Fluidez %)	102	96	83

Tabla 1. Método acelerado (IRAM 1674) y medida de la Fluidez de cada una de las mezclas con 0%, 15% y 30% de RC en reemplazo del cemento Pórtland. A1, de reactividad media y A2, de reactividad alta según IRAM 1531.

pero dentro de valores que mantienen la trabajabilidad de las mezclas en estado fresco.

CONCLUSIONES

Existen dos líneas fundamentales sobre las que se pueda concluir sobre el material estudiado: una de ellas es el aspecto ambiental y la otra es sobre las características físico-químicas del material que lo hacen apto para su utilización en la industria del cemento pórtland. Ambas líneas interactúan entre sí, otorgándole al residuo de lavado una potencialidad única para su empleo en la industria cementera, contribuyendo a disminuir el impacto ambiental al limitar las emanaciones de CO_2, tanto al calcinarlo, como al reemplazar al cemento portland en proporciones importantes, superiores al 10%. Por lo tanto, las conclusiones de mayor relevancia son las siguientes:

- La caracterización mineralógica mediante DRX, demuestra la presencia de arcillas, fundamentalmente caoliníticas, esencial para la obtención de metacaolín durante el calcinado, considerado como una adición mineral activa o puzolana de tipo artificial.
- La temperatura de calcinado óptima que le confiere las características de una puzolana es de 700° C, sin necesidad de superarla, considerando que durante el proceso la pérdida de masa por calcinación es mínima (inferior al 3%).
- Los ensayos físicos de laboratorio específicos para evaluar la reactividad alcalina potencial en morteros de cemento portland han demostrado que inhibe la reacción álcali-agregado.
- La utilización del material contribuye a reducir la acumulación de pasivos ambientales, al encontrar una aplicación en la industria del cemento, lo que permite considerarlo un material autosustentable.
- La utilización del material en reemplazo parcial del cemento disminuye su consumo, lo que contribuye indirectamente a la reducción de las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero.
- La calcinación del material se realiza a una temperatura inferior a la requerida para la producción de cemento, y no genera emisiones de CO_2 a la atmósfera, ya que se trata de un material arcilloso y no calcáreo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración permanente de Canteras Yaraví S.A. y al Dr. Luis Del Río por su constante apoyo en todos los trabajos realizas hasta el momento. Este trabajo también fue posible gracias a los Proyectos PPIDN045 y PPIDN1012 otorgados por la Universidad Nacional de La Plata.

REFERENCIAS

ASTM C1437. (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. (2p.).

Coelho dos Santos G.S., Benito D., Marfil S., Maiza P., Del Río, J.L. (2017). Caracterización mineralógica de los materiales arcillosos procedentes de las canteras de piedra Mar del Plata. Potencial utilización como adición mineral. Argentina. *XX Congreso Geológico Argentino. San Miguel de Tucumán.* Sesión técnica 9, 20-25.

Coelho dos Santos, G.S. (2019). Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali – sílice (RAS). *Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur*. https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4537/Tesis%20Doctoral_Coelho%20dos%20Santos_Marzo_2019.pdf

Coelho dos Santos, G., Alderete, N., Villagrán Zaccardi, J. De Belie, N. (2022). Characterization of Quarry Waste Powder for Calcined Clay Production. En D. Coffetty, L. Coppola y t. Holland (Eds.), *Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Conference Porceedings. Fif-teenth International Conference, American Concrete Institute, Milan, Italy,* SP-355 (pp. 29-40).

Grattan-Bellew, P.E. (1981). Canadian experience of alkali-expansivity in concrete. *Proc., 5th In-ternational Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa.* 11 p.

Grattan-Bellew, P.E. (1986). Is high undulatory extinction in quartz indicative of alkali expansivity of granitic aggregates?. *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ottawa, Canada*, 434-439.

Grattan-Bellew, P.E. (1989). Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates. *Proc., 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan*, 279-294.

IRAM 1531. (2022). Agregados. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo. 40 p.

IRAM 1651. (2003). Cementos. Método de ensayo de la puzolanicidad para los cementos puzolánicos. 14 p.

IRAM 1674. (1997). Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. 14 p.

IEA Report. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry (2018). https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1fd614c2a871931538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf

Provis, J.L. (2018). Alkali-activated materials, *Cem. Concr. Res*. (114), 40-48. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009

RIESGO GEOLÓGICO

PROGNÓSTICO DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS SOB CONDIÇÃO DE CHUVA TRANSIENTE EM AMBIENTE SIG CONSIDERANDO VARIAÇÃO DA COESÃO E PESO ESPECÍFICO

Valéria V. Alonso[1], Lázaro V. Zuquette[1]
[1]Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil
valeriaalonso@usp.br

RESUMO

Eventos climáticos extremos têm se tornado cada vez mais frequentes, resultando em tragédias que afetam populações em todo o mundo. Entre esses eventos, os escorregamentos translacionais se destacam, especialmente devido à crescente ocupação de encostas. Diante disso, torna-se fundamental o prognóstico de áreas de potencial instabilidade, visando prevenir e/ou mitigar os danos associados. Este trabalho apresenta um modelo de estimativa de áreas instáveis utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) aliado a programação em *Python*. Foi simulado a infiltração da água da chuva, a fim de obter a variação da umidade volumétrica ao longo do tempo e da profundidade nos materiais inconsolidados. A coesão e o peso específico natural foram consideradas variáveis dependentes da umidade, incorporando a infiltração na análise de estabilidade. Dois cenários de umidade inicial foram considerados: seca (ponto de murchamento) e úmida (capacidade de campo). Os resultados destacaram a declividade como fator determinante para a instabilidade, mesmo em solos com elevados valores de coesão. O cenário inicialmente úmido resultou nas áreas mais críticas e no menor tempo de ruptura, devido a maior quantidade de água nos poros, o que facilita a infiltração. A presença de material majoritariamente fino desenvolveu uma região crítica causado pela retenção da água na potencial superfície de ruptura. O modelo apresentou bons resultados na estimativa de áreas estáveis, embora a previsão de áreas instáveis apresente incertezas relacionadas a parâmetros do solo e limitações do modelo. Entretanto, áreas classificadas erroneamente como instáveis podem representar zonas de atenção para futuros eventos perigosos.

Palavras chaves: Escorregamento translacional, estabilidade de talude, SIG, Brasil.

RESUMEN

Los eventos climáticos extremos se han vuelto cada vez más frecuentes, resultando en tragedias que afectan a poblaciones en todo el mundo. Entre estos eventos, los deslizamientos traslacionales se destacan, especialmente debido a la creciente ocupación de laderas. En este contexto, se vuelve fundamental el pronóstico de áreas con potencial de inestabilidad, con el objetivo de prevenir y/o mitigar los daños asociados. Este trabajo presenta un modelo de estimación de áreas inestables utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) combinado con programación en Python. Se simuló la infiltración del agua de lluvia para obtener la variación de la humedad volumétrica a lo largo del tiempo y la profundidad en materiales inconsolidados. La cohesión y el peso específico natural fueron considerados variables dependientes de la humedad, incorporando la infiltración en el análisis de estabilidad. Se consideraron dos escenarios de humedad inicial: seco (punto de marchitez) y húmedo (capacidad de campo). Los resultados señalaron la pendiente como factor determinante para la inestabilidad, incluso en suelos con alta cohesión. El escenario húmedo inicial resultó en las áreas más críticas y con menor tiempo de ruptura, debido a la mayor cantidad de agua en los poros. La presencia de material predominantemente fino generó una región crítica causada por la retención de agua en la potencial superficie de ruptura. El modelo mostró buenos resultados para estimar áreas estables, aunque con incertidumbres en la predicción de áreas inestables, que aun así, pueden representar zonas de atención ante futuros eventos peligrosos.

Palabras clave: Deslizamientos traslacionales, estabilidad de taludes, SIG, Brasil.

INTRODUÇÃO

Movimentos de massa gravitacionais são fenômenos geológicos considerados naturais da dinâmica das vertentes. Entretanto, a ocupação de encostas e áreas adjacentes transformam esse processo em um evento perigoso, uma vez que associa um risco a essas populações. Aliado a isso, os extremos eventos climáticos, que vem se tornando cada vez mais frequente, aceleram e intensificam a movimentação de massas em encostas naturais ou antropogênicas. No caso dos solos não saturados, recorrentes no território brasileiro, o avanço da frente de molhamento resulta na queda da sucção nos poros e, consequentemente, da resistência ao cisalhamento. Devido a isso, juntamente ao aumento do peso específico natural do material geológico, é desenvolvida uma superfície de ruptura paralela à superfície do terreno.

No município de Campos do Jordão, no estado de São Paulo, escorregamentos translacionais induzidos por chuva ocorrem desde a década de 1970, sendo um evento de grande magnitude registrado em janeiro de 2000, o qual foi responsável por 103 feridos, 10 mortes e mais de 423 casas em risco de desabamento (Mendes et al.,2018). Aliado ao relevo íngreme característico da região, nesse período foram registrados acumulados de precipitação recordes, iguais a 129,9 mm e 120,3 mm respectivamente nos dias 2 e 4 de janeiro de 2000. Nesse sentido, entende-se a importância do estudo de prognóstico de áreas com potencial de instabilidade, visando prevenir e/ou mitigar os danos desses desastres. Assim, o presente trabalho propõe um modelo de estimativa de áreas de instabilidade induzidas pela chuva por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) associado a um *script* em linguagem *Python*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais inconsolidados encontrados na área de estudo foram caracterizados e mapeados por Ahrendt (2005) e Silva (2011). Ao todo Ahrendt (2005) apresenta duas classes de solo residuais alterados (I-R e II-R), três classes de saprolito (III-S, IV-S e V-S), duas classes de aterros (VI-A e VII-A) e uma classe de solo coluvionar (VIII-T). A Tabela 1 apresenta a caracterização dos materiais e os parâmetros hidráulicos obtidos por Silva (2011). A condutividade hidráulica saturada possui grandeza de 10-5m/s. Baseado na variação vertical dos materiais inconsolidados foram definidas 2 superfícies de ruptura potenciais (SR1 entre a primeira e segunda camada e SR2 entre a segunda e a terceira).

MATERIAL	ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)	γ_s (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	θ_r	θ_{sat}	a(cm^{-1})	n
I-R	5	40	55	27,03	13,5	0,035	0,550	0,138	1,592
II-R	33	28	39	27,92	14,3	0,108	0,485	0,034	1,168
III-S	38	28	31	26,69	12,8	0,075	0,490	0,039	1,194
IV-S	0	45	55	27,13	12,5	0,021	0,248	0,092	1,287
V-S	19	36	45	27,06	12,5	0,020	0,520	0,138	1,592
VI-A/VII-A	9	31	60	27,19	11,6	0,020	0,550	0,138	1,592
VIII-T	33	28	39	30,78	11,0	0,078	0,50	0,036	1,500

Tabela 1. Caracterização dos materiais inconsolidados. Fonte: Ahrendt (2005).

Os dados pluviométricos referentes ao período de dezembro de 1999, chuva antecedente, e janeiro de 2000, evento principal de precipitação, foram cedidos pelo Departamento de Água e Energia (DAEE) de São Paulo oriundos de dois postos de coleta próximos área de estudo, registrados em intervalos de 10min. Essas informações foram utilizadas no *software Hydrus 1D*, onde foi simulado a infiltração da água da chuva nos perfis de materiais inconsolidados considerando os parâmetros para a condição não saturada. Foram considerados dois cenários de umidade inicial: (i) inicialmente úmido, referente ao valor da umidade volumétrica similar à capacidade de campo, sucção aproximadamente a 10kPa; e (ii) inicialmente seco, referente ao valor de umidade volumétrica do ponto de murchamento, sucção aproximadamente a 1500kPa. Os valores desses parâmetros foram obtidos por meio das equações de pedrotrasnferência de Arruda et al. (1987). A coesão dos materiais inconsolidados foi considerada como uma variável em função da umidade volumétrica. Para isso, foram utilizadas as expressões de Alonso (2025), que ditam esse comportamento, obtidas por meio de regressão exponencial dos pares de coesão e umidade volumétrica de Silva (2011). Além disso, a variação do peso específico natural dos materiais foi calculada por meio dos índices físicos. Para a análise de estabilidade foi utilizado a equação do fator de segurança (FS) referente ao modelo do talude infinito, Equação 1, na qual c é a coesão [kPa], γé o peso específico natural [kN/m³], β é a declividade da encosta [º] e ø é o ângulo de atrito interno [º].

$$FS = \frac{c+(\gamma*z*\cos^2(\beta))*\tan(\emptyset)}{\gamma*z*\cos(\beta)*\text{sen}(\beta)} \qquad (1)$$

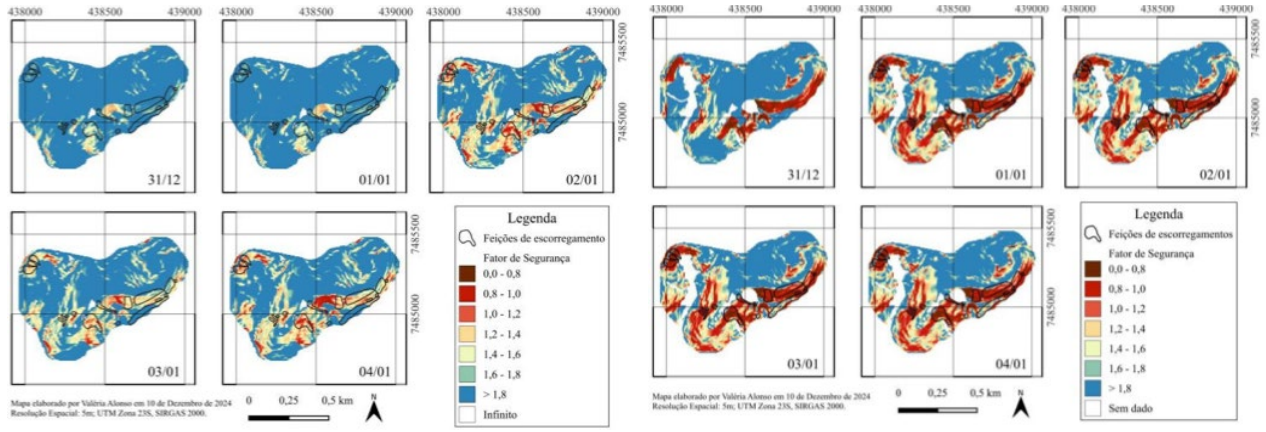
Para o cálculo do FS foi desenvolvido um *script* em *Python* associado a um SIG (Sistema de Informações Geográficas), desenvolvido no *software QGIS*. O *script* visa obter para cada pixel do mapa da área de estudo o FS de acordo com o tempo indicado pelo usuário respeitando os materiais inconsolidados de cada unidade, o seu ângulo de atrito, a declividade do terreno e a profundidade das potenciais superfícies de ruptura. Essas informações foram organizadas em uma base cartográfica em formato *raster* com resolução espacial de 5m, sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) Zona 23S e Datum SIRGAS2000.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram gerados mapas do dia 31 de dezembro até 4 de janeiro, período em que foram registrados os escorregamentos, para

as duas superfícies de ruptura e para os dois cenários quanto a umidade inicial. As Figura 1a apresenta os mapas obtidos para a SR1 na condição seca inicial. As primeiras regiões instáveis foram estimadas a partir do dia 2 de janeiro, dia do maior pico de precipitação. Entretanto, baixos valores de FS, em torno de 1,04, estimados para os dias 31 de dezembro e 1 de janeiro já indicavam iminência de ruptura na área de estudo. Ainda que os valores de coesão diminuam consideravelmente com o acréscimo da umidade volumétrica, ao comparar os resultados com o mapa de declividade da área de estudo (Figura 2), percebe-se que as principais regiões com instabilidade foram estimadas nas encostas mais íngremes, com declividades superiores a 30°, o que também foi observado por Schilirò et al. (2019) e Rahul e Tyagi (2024). Um exemplo disso, é o desenvolvimento de uma região crítica em um talude formado por material geológico resistente, que apresentou coesão igual a 16,7 kPa, porém com declividade superior a 40°. Enquanto, materiais geológicos que apresentaram valores de coesão baixos, menores que 3 kPa, foram estimados como estáveis por localizarem-se em regiões com terreno mais suave.

A Figura 1b apresenta os resultados obtidos para a SR2 na condição seca, na qual observa-se que nessa profundidade foram estimadas maiores zonas de instabilidade, principalmente, na região da borda sul da área de estudo. Entende-se que esse comportamento está associado a camada de material geológico com granulometria predominante fina (II-R) o qual é responsável pela retenção de água nessa profundidade. Em consequência disso, os valores de coesão diminuem e se mantêm constante para os materiais dessa região. Morel-Seytoux (1993) explica que esse fenômeno é observado quando há a sobreposição de uma camada de material geológico fino a uma camada de material geológico granular, como ocorre nessa região da área de estudo. Aliado a isso, esses materiais encontram-se em taludes íngremes, o que é mais um fator para instabilização. Além disso, áreas consideradas como estáveis para a SR1 e instáveis para a SR2 podem estar associadas ao avanço da frente de molhamento, o que aumenta o peso do material acima da superfície de ruptura.



(a) (b)

Fig. 1. Mapas de FS na condição seca para (a) SR1; e (b) SR2.

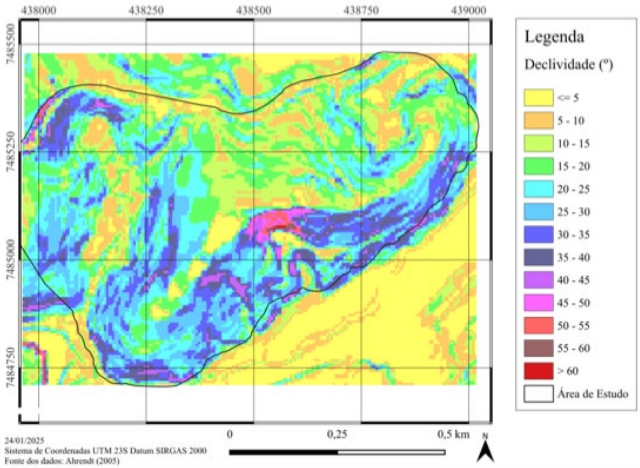
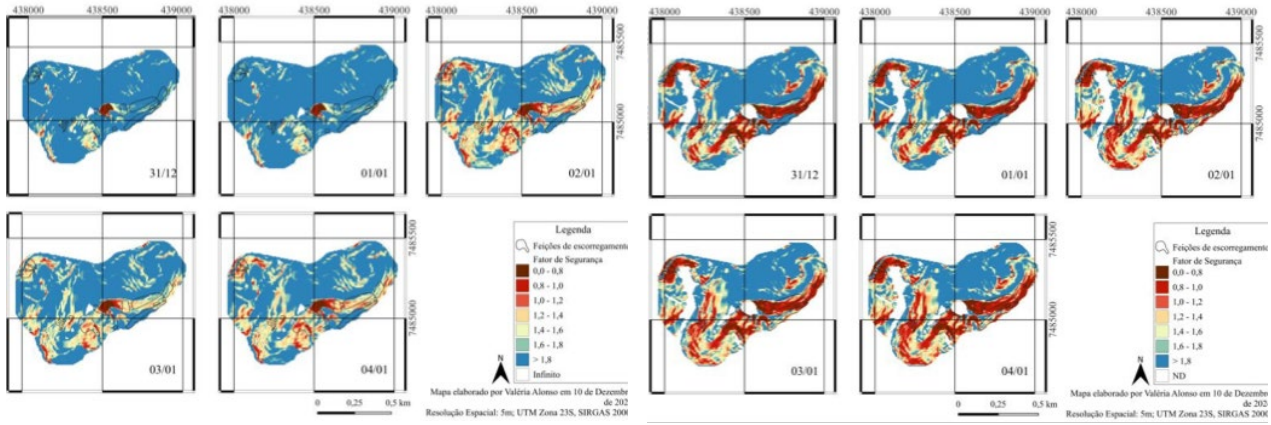


Fig. 2. Mapas de declividade da área de estudo.

Os resultados obtidos para o cenário úmido repetem a tendência da localização das áreas instáveis, condicionadas, principalmente, pela declividade do terreno. Entretanto, a criticidade dos valores estimados para o fator de segurança é maior. Diferente do cenário seco foram estimadas regiões instáveis, com FS igual a 0,4, desde dia 31 de dezembro para a SR1, como mostra a Figura 3a. Esse comportamento vai ao encontro do observado por Schiliró et al. (2019) quando afirmam que para maiores valores de umidade

inicial, o tempo de ruptura é menor para encostas mais inclinadas. O que demonstra que um mesmo evento de precipitação pode ou não induzir a ruptura em uma vertente dependendo das condições iniciais dos materiais geológicos. Em relação a SR2 (Figura 3b), não foram observadas variações consideráveis quando comparada com a condição seca, uma vez que a camada de material fino apresenta o mesmo comportamento independente da umidade inicial. O comportamento decisivo de uma camada intermediária de material inconsolidado para a estabilidade de uma encosta ressalta a importância do conhecimento do perfil estratigráfico de um talude por meio de investigação geológica-geotécnica.



(a) (b)

Fig 3. Mapas de FS na condição úmida para (a) SR1; e (b) SR2.

Quando comparada com as cicatrizes dos escorregamentos mapeadas percebe-se que o método proposto apresentou algumas discordâncias nas estimativas. Essas podem estar relacionadas com as diversas incertezas que envolvem um problema de Geotecnia, como já foi destacado por Medina et al. (2021), Marotti et al. (2023) e Cui et al. (2024). Essas incertezas podem estar relacionadas tanto pela caracterização e mapeamento dos materiais inconsolidados, que podem não representar a real variabilidade encontrada em campo, quanto pelo mapeamento das cicatrizes de escorregamentos, os quais podem ter ocorrido em outras regiões e períodos sem terem sido devidamente registrados. Por outro lado, o modelo proposto apresenta limitações. A simulação de infiltração considera apenas o fluxo unidirecional, desconsiderando a relação do fluxo da água e a declividade do terreno. Além disso, não são consideradas as coberturas vegetais observadas em campo, as quais possuem importante parcela de resistência nas encostas pelas raízes pivotantes. Entretanto, é importante ressaltar que um pixel estimado como instável de forma equivocada não necessariamente é um erro de modelagem, e sim uma área propensa à instabilidade que ainda não foi desenvolvida.

CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs um modelo para estimativa de áreas instáveis considerando a influência da chuva na coesão e peso específico natural dos materiais inconsolidados. Os resultados obtidos destacam o papel condicionante da declividade das encostas na área de estudo. Regiões com declividade superiores a 30° foram estimadas como instáveis mesmo em condições de elevados valores de coesão. A presença do material IIR, com granulometria majoritariamente fina, na profundidade da SR2 em algumas regiões foi responsável pelo desenvolvimento de uma grande área crítica na borda sul da área de estudo, decorrente da retenção de água nessa profundidade causado pelas propriedades desse material. Esse resultado enfatiza a importância de investigações geológicas-geotécnicas para o conhecimento do perfil geológico da vertente nas análises de estabilidade. Em relação aos cenários quanto a umidade inicial, observou-se que na condição inicialmente úmida, os valores de FS estimados foram mais críticos e o tempo de ruptura em algumas vertentes menor. Isso pode ser explicado pela maior presença de água nos poros o que aumenta a condutividade hidráulica permitindo de forma mais rápida o avanço da frente de molhamento.

As limitações e incertezas que envolvem o modelo proposto resultam na estimativa equivocada de algumas áreas instáveis. Incertezas são um desafio encontrado em diversos estudos geotécnicos e fortemente ressaltado pela bibliografia. Entretanto, análises com fluxo bidimensional e a consideração do uso e ocupação do solo podem ser focos em estudos futuros visando ultrapassar as limitações aqui encontradas. Por fim, é importante destacar que regiões estáveis estimadas como instáveis podem representar zonas de atenção para futuros eventos perigosos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio

da concessão de bolsa, essencial para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Alonso, V. V. (2025). *Prognóstico de deslizamentos translacionais em vertentes naturais sob condições de chuvas transientes baseado em SIG e Python: estudo de caso em Campos do Jordão (SP)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 196p.

Ahrendt, A. (2005). *Movimentos de Massa Gravitacionais - Proposta de um Sistema de Previsão: Aplicação na área urbana de Campos do Jordão* - SP. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP

Arruda, F B.; Zul Lo, J.; Oliveira, J. B. (1987). Parâmetros de solo para o cálculo da água

disponível com base na textura do solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 11, p. 11- 15.

Cui, H.; Medina, V.; Hürlimann, M.; JI, J. (2024). Fast physically based probabilistic modelling of rainfall-induced shallow landslide susceptibility at the regional scale considering geotechnical uncertainties and different hydrological conditions. *Computers and Geotechnics*, v. 172.

Marotti, L. C.; Gomes, G. J.C.; Velloso, R. Q.; Vargas, E. A.; Nunes, R. S.; Fernandes, N. F. (2023). Exploring extreme rainfall-triggered landslides using 3D unsaturated flow, antecedent moisture and spatially distributed soil depth. *Catena*, v. 223.

Medina, V.; Hürlimann, M.; Gup, Z.; Lloret, A.; Vanuat, J. (2021). Fast physically- based model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. Catena, v. 201.

Mendes, R. M.; Andrade, M. R. M.; Tomasella, J.; Moraes, A. E.; Scofield, G. B. (2018). Understanding shallow landslide in Campos do Jordão municipality - Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, p. 15-30.

Morel-Seytoux, H. J. (1993). Capillary Barrier at the Interface of Two Layers. En: RUSSO, D.; DAGAN, G. (ed.) *Water Flow and Solute Transport in Soils: Developments and Applications. Berlin: Springer-Verlag*, p.136-151.

Rahul, S.; Tyagi, A. (2024). Physics-based time-of-failure determination of rainfall-induced instability in lateritic soil slopes. *Engineering Geology*, v. 344.

Schilirò, L.; Djuwywp, G. P.; Esposito, C.; Mugnozza, G. S. (2019). The Role of Initial Soil Conditions in Shallow Landslide Triggering: Insights from Physically Based Approaches. *Geofluids*.

Silva, A. F.; Talamini, A. A.; Zuquette, L. V. (2011). Engineering geological mapping procedures in data-scarce hillsides for shallow landslide assessments: Applications in southeastern Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, v. 111.

METODOLOGÍA DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN ZONAS URBANAS

J. Azañero[1], M. Cuadra[2], M. Lara[1]
[1]Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.
[2]AlphaRock, Monjitas 527, Of.1207, Santiago, Chile.
Mail de contacto: jacqueline.azanero@ug.uchile.cl

RESUMEN

En Chile, se evidencia la presencia de viviendas en áreas de alto riesgo geológico, particularmente en cerros urbanizados muchas veces no regulados, generando preocupaciones por la seguridad de las comunidades frente a eventos de remoción en masa.
Este estudio propone una metodología para evaluar la susceptibilidad a estos procesos en zonas urbanas, con escala de detalle de 1:2.000 a 1:5.000. Se analizan tres eventos: deslizamientos en bloques, caídas de rocas y deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos.
Esta metodología busca caracterizar condiciones antrópicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de cerros urbanizados, evaluando el potencial de ocurrencia local de remociones en masa, contribuyendo a la regularización de proyectos emplazados en áreas de riesgo. Esta evaluación se realiza mediante la sumatoria de factores condicionantes que favorecen la generación de cada tipo de evento y consiste en una división del área de estudio en unidades geourbanas, en base a las características antrópicas del sitio complementadas con los rasgos geológicos y geomorfológicos.
El caso de estudio es la Villa 89, cerro urbanizado en la localidad de Chañaral Alto, comuna de Monte Patria, Región de Coquimbo, Chile. Según el Plan Regulador Intercomunal de la Provincia de Limarí, esta zona presenta riesgo a procesos de ladera como avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
Dado el nivel de detalle requerido para la aplicación de la metodología en zonas urbanizadas, esta debe ser acompañada de una revisión de cada uno de los factores condicionantes, sus especificaciones y ponderaciones, debiendo realizar ajustes correspondientes en caso de ser necesario.

Palabras clave: metodología, susceptibilidad, remociones en masa, zonas urbanas.

ABSTRACT

In Chile, numerous residential areas are located in geologically high-risk zones, particularly on urbanized hillsides that often lack regulation. This situation raises serious concerns regarding community safety due to potential landslides.
This study proposes a methodology for assessing the susceptibility to such processes in urban areas, using a detailed mapping scale ranging from 1:2,000 to 1:5,000. Three types of mass movements are analyzed: block slides, rockfalls, and superficial landslides involving natural soils or anthropogenic fills.
The methodology aims to characterize the anthropogenic, geological, geomorphological, and geotechnical conditions of urbanized hillsides to evaluate the potential landslides. This is achieved through the integration of conditioning factors specific to each event type and involves dividing the study area into “geourban units,” defined by site-specific anthropogenic characteristics in combination with geological and geomorphological features.
The case of study focuses on Villa 89, an urbanized hill in the locality of Chañaral Alto, Monte Patria commune, Coquimbo Region, Chile. According to the Intercommunal Regulatory Plan of the Limarí Province, this area is classified as an urban zone exposed to hillside hazards such as slides, rockfalls, debris flows, and severe erosion.
Given the high level of detail required for implementation in urban settings, the methodology must be supported by a thorough review of each conditioning factor, including its specifications and weightings, with necessary adjustments made according to site-specific conditions.

Keywords: Methodology, susceptibility, mass movements, urban areas.

INTRODUCCIÓN

Debido a su geografía montañosa, actividad sísmica y régimen climático, Chile es un país propenso a las remociones en masa, las cuales corresponden a fenómenos geodinámicos que involucran el desplazamiento descendente de volúmenes de materiales, como suelo, roca o ambos (Cruden, 1991).

Según la clasificación de Varnes (1978), las remociones en masa se dividen en función del tipo de movimiento y el material

involucrado, destacando desprendimientos o caídas de rocas, deslizamientos, volcamientos, flujos, avalanchas y propagación lateral.

La ocurrencia de estos fenómenos está determinada por factores condicionantes como la geología, geotecnia, geomorfología, clima y las modificaciones antrópicas, que definen la susceptibilidad de un terreno frente a las remociones en masa (González de Vallejo et al., 2002).

En Chile, el marco normativo territorial a través del Plan Regulador Comunal (PRC) e Intercomunal (PRI) establece zonas de riesgo cercanas a cerros y exige, conforme a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), la presentación de un estudio fundado elaborado por profesionales especialistas para autorizar y regularizar proyectos emplazados en áreas de riesgo. Sin embargo, en regiones como Coquimbo se observan construcciones que han sido emplazadas en zonas de alta peligrosidad sin cumplir con estas exigencias. Frente a esta problemática, se realiza una metodología que optimice la aprobación del estudio de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa en zonas urbanizadas, a escala 1:2.000 – 1:5.000 para el sector denominado Villa 89, ubicado en la localidad de Chañaral Alto, comuna de Monte Patria, Región de Coquimbo. Este sector se encuentra ubicado en una zona urbana con riesgo a procesos de ladera de acuerdo con el Plan Regulador Intercomunal de la Provincia del Limarí.

Ante esto, se define como objetivo general determinar la susceptibilidad de remociones en masa en el área de estudio, y para cumplirlo es necesario tener como objetivos específicos: realizar una caracterización geológica-geotécnica a escala de detalle para las viviendas de la Villa 89, adaptar y aplicar la metodología propuesta por Azañero (2024) para cada tipo de remoción en masa y así, elaborar mapas de susceptibilidad de remociones en masa.

Los antecedentes de la zona, obtenidos en el estudio realizado por Cuadra et al. (2023), se pueden dividir en revisión bibliográfica y visita a terreno.

Tal como señala la Carta Geológica de Ovalle-Peñablanca (Coloma et al., 2020), la zona de estudio forma parte de intrusivos asignados al Complejo Plutónico Manquehua Kim(d), correspondiente a dioritas y dioritas cuarcíferas, con variaciones locales a monzodioritas. Las litologías vistas en terreno corresponden a diorita y gabrodiorita.

El clima de la zona se caracteriza por ser un Clima de estepa templada marginal, donde las precipitaciones no son suficientes para formar cursos de agua permanentes (Novoa y López, 2001).

El área de estudio presenta laderas de variada orientación, con pendientes promedio no superiores a 20° en zonas con intervención antrópica; estas están principalmente aterrazadas para la construcción de caminos locales y de bienes inmuebles. Las zonas de interés para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa se definen como unidades geourbanas que en este caso corresponden a la división de loteos de las viviendas.

La zona de estudio está ubicada en una ladera altamente urbanizada con afloramientos rocosos concentrados en la cima de la ladera y en taludes de viviendas. Los taludes de roca se encuentran en la zona trasera y delanteras de las viviendas, de altura promedio de 6 metros y una inclinación de 70° a 90°, presenta características correspondientes a un intrusivo medianamente fracturado con geometrías cúbicas, tiene meteorización leve y una resistencia al golpe de martillo R4-R5, el macizo rocoso es clasificado mediante el GSI en el rango 60-70. Por otro lado, la cubierta de suelo presenta una potencia entre 1,5 m para zonas con mayor cubierta a 30 cm en zonas más angostas. Esta cubierta de suelo es residual, compuesta de una mezcla de suelo con roca muy meteorizada, la granulometría va de grava a arena, con granos semi redondeados y esfericidad media. En su techo se encuentra suelo antrópico, compuesto de material antrópico producto de la urbanización de la ladera al realizar cortes de talud para calles y viviendas.

El suelo antrópico se observa principalmente en la base de las viviendas, como un tipo de talud desarrollado para nivelar las casas sobre la calle principal. Los taludes tienen aproximadamente un metro de altura y pueden observarse con o sin fortificaciones, y representan a las zonas que pueden ser susceptibles ante la ocurrencia de deslizamientos superficiales.

MÉTODO

La metodología elaborada por Azañero (2024) presenta un enfoque antrópico, geotécnico y geológico, adaptando y ajustando la propuesta de Lara (2007) y Muñoz (2013) para una escala de detalle entre 1:2.000 y 1:5.000, e incluye la evaluación de remociones en masa de tipo deslizamiento en bloques, caídas de rocas y deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos.

La metodología se divide en dos etapas principales:

- Revisión de antecedentes: Se investigan los eventos de remoción en masa ocurridos en la zona, características geológicas, geomorfológicas y climáticas.
- Trabajo en terreno y definición de unidades geourbanas: Se realiza una caracterización geotécnica de suelo y roca en los puntos accesibles del área de estudio. Para la roca se utiliza la clasificación GSI y para el suelo, la granulometría, compacidad y plasticidad. Posterior se realiza una división del área en unidades geourbanas, correspondientes a polígonos con características antrópicas similares, complementado con rasgos geológicos y geomorfológicos, como lo es la orientación de laderas y litología. Y finalmente se realiza una caracterización urbana de acuerdo con la identificación de zonas con viviendas, áreas intervenidas, naturales, con taludes, con fortificaciones y otros elementos que puedan ser relevantes para la evaluación de susceptibilidad.

Para la evaluación de la susceptibilidad se asignan valores a los factores condicionantes para cada uno de los tipos de remoción en masa de estudio, considerando ajustes de factores propuestos por Lara (2007), Muñoz (2013) y nuevos aspectos incorporados por Azañero (2024).

Finalmente, se realiza el cálculo del Índice de Susceptibilidad (IS) mediante la sumatoria de los factores condicionantes, clasificando las unidades geourbanas en rangos de susceptibilidad Bajo, Medio y Alto, tal como se muestra en la Tabla 1. Si la unidad es susceptible se interpreta que en algún lugar de la unidad puede generarse el evento. Se plantea un error de ± 5 para que aquellas unidades con valores cercanos al umbral puedan ser incluidas en la categorización que se estime pertinente.

RANGO IS (%)	CATEGORÍA
50	Bajo
50 – 70	Medio
70	Alto

Tabla 1. Categorización del Índice de Susceptibilidad (IS)

SUSCEPTIBILIDAD PARA DESLIZAMIENTO DE ROCA EN BLOQUES

En la Tabla 2 se muestra la ponderación máxima considerada para deslizamiento en bloque y en la Tabla 3 el desglose de cada factor condicionante con sus especificaciones y valor asignado para cada caso.

FACTOR CONDICIONANTE		% MÁXIMO
Antrópico	Condición de ladera	15
	Condición de soporte antrópico en ladera	10
Geológico – Geotécnico	Características geotécnicas del material	20
	Probabilidad de falla	15
Geomorfología	Altura del corte	10
	Pendiente de talud	15
Clima	Clima	3
Vegetación	Cobertura vegetal	2
Antecedentes	Deslizamientos declarados en la unidad	10

Tabla 2. Ponderación máxima de factores condicionantes en deslizamiento de roca en bloques.

FACTOR	ESPECIFICACIÓN	RANGO	%
Condición de ladera (F1)	Condición de la ladera sin considerar algún soporte en el polígono, se toma el valor de la característica predominante en el sitio. Cada intervención significa un grado de inestabilización en la ladera	Área natural	No aplica
		Área intervenida, sin vivienda	5
		Área con casa en ladera natural	10
		Área con casa en corte / talud de roca	15
Condición de soporte antrópico en la ladera (F2)	Condición del soporte empleado en la ladera y el estado en el que se encuentra, este puede estabilizar o inestabilizar aportando material a ser removido	Área con casa que presenta una fortificación que tiene fallas evidentes/observables	10
		No hay soporte	0
		Área con casa que presenta fortificación sin daños evidentes	-10
Características geotécnicas del material (F3)	Estabilidad de roca en base a clasificación GSI	0 – 20	20
		20 – 40	15
		40 – 60	10
		60 – 80	5
		80 - 100	0
Probabilidad de falla (F4)	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	Unidad es atravesada por una falla mayor	15
		Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	7
		Unidad a más de 100 metros de falla mayor	1
Altura del corte (F5)	Altura promedio del corte de talud	> 5 m de altura	10
		1 - 5 m de altura	5
		< 1 m de altura	1

Pendiente de talud (F6)	Pendiente promedio de talud de roca	>75° muy alta	15
		60°-75° alta	13
		45°-60° media alta	11
		30°-45° baja	9
		En pendiente natural baja	6
Clima (F7)	Se toma en consideración la condición climática de la región	Clima de tundra de alta montaña	3
		Clima de estepa fría de montaña	3
		Clima de estepa templada marginal	2
		Clima de estepa templada con precipitaciones invernales	2
		Clima de estepa con nubosidad abundante	1
Cobertura vegetal (F8)	Densidad en la unidad	Nula a escasa (< 30%)	2
		Moderada (30 - 50%)	1
		Alta (>50%)	0
Caídas de roca declaradas en la unidad (F9)	Caídas de roca declaradas en bibliografía, prensa, encuesta y/u observación	Presenta y/o se observa	10
		No presenta ni se observa	0

Tabla 3. Desglose de los factores condicionantes en deslizamiento de roca en bloques. Modificado y adaptado de Azañero (2024).

SUSCEPTIBILIDAD PARA CAÍDAS DE ROCAS

En la Tabla 4 se muestra la ponderación máxima considerada para caídas de rocas y en la Tabla 5 el desglose de cada factor condicionante con sus especificaciones y valor asignado para cada caso.

FACTOR CONDICIONANTE		% MÁXIMO
Antrópico	Condición de ladera	15
	Condición de soporte antrópico en ladera	10
Geológico – Geotécnico	Características geotécnicas del material	20
	Probabilidad de falla	10
Geomorfología	Altura del corte	10
	Pendiente de talud	20
Clima	Clima	5
Antecedentes	Caídas de roca declaradas en la unidad	10

Tabla 4. Ponderación máxima de factores condicionantes en caídas de rocas.

FACTOR	ESPECIFICACIÓN	RANGO	%
Condición de ladera (F1)	Condición de la ladera sin considerar algún soporte en el polígono, se toma el valor de la característica predominante en el sitio. Cada intervención significa un grado de inestabilización en la ladera	Área natural	No aplica
		Área intervenida, sin vivienda	5
		Área con casa en ladera natural	10
		Área con casa en corte / talud de roca	15
Condición de soporte antrópico en la ladera (F2)	Condición del soporte empleado en la ladera y el estado en el que se encuentra, este puede estabilizar o inestabilizar aportando material a ser removido	Área con casa que presenta una fortificación que tiene fallas evidentes/observables	10
		No hay soporte	0
		Área con casa que presenta fortificación sin daños evidentes	-10
Características geotécnicas del material (F3)	Estabilidad de roca en base a clasificación GSI	0 – 20	20
		20 – 40	15
		40 – 60	10
		60 – 80	5
		80 - 100	0

Probabilidad de falla (F4)	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	Unidad es atravesada por una falla mayor	10
		Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	5
		Unidad a más de 100 metros de falla mayor	1
Altura del corte (F5)	Altura promedio del corte de talud	> 5 m de altura	10
		1 - 5 m de altura	5
		< 1 m de altura	1
Pendiente de talud (F6)	Pendiente promedio de talud de roca	>75° muy alta	20
		60°-75° alta	18
		45°-60° media alta	15
		30°-45° baja	13
		En pendiente natural baja	11
Clima (F7)	Se toma en consideración la condición climática de la región	Clima de tundra de alta montaña	5
		Clima de estepa fría de montaña	4
		Clima de estepa templada marginal	3
		Clima de estepa templada con precipitaciones invernales	2
		Clima de estepa con nubosidad abundante	1
Caídas de roca declaradas en la unidad (F8)	Caídas de rocas declaradas en bibliografía, prensa, encuesta y/u observación	Presenta y/o se observa	10
		No presenta ni se observa	0

Tabla 5. Desglose de los factores condicionantes en caídas de rocas. Modificado y adaptado de Azañero (2024).

SUSCEPTIBILIDAD PARA DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL DE SUELO NATURAL O DE RELLENOS ANTRÓPICOS

En la Tabla 6 se muestra la ponderación máxima considerada para deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos y en la Tabla 7 el desglose de cada factor condicionante con sus especificaciones y valor asignado para cada caso.

FACTOR CONDICIONANTE		% MÁXIMO
Antrópico	Condición de ladera	20
	Condición de soporte antrópico en ladera	15
Geológico – Geotécnico	Tipo de suelo	10
	Propiedades del suelo	15
Geomorfología	Altura del corte	5
	Pendiente de talud	15
	Exposición al sol	5
Clima	Clima	3
Vegetación	Cobertura vegetal	2
Antecedentes	Deslizamientos declarados en la unidad	10

Tabla 6. Ponderación máxima de factores condicionantes en deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado, se presentan tres mapas de susceptibilidad, además del mapa del estudio realizado por Cuadra et al. (2023), lo que permite una comparación entre ambos enfoques para el caso deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos. Esta comparación resulta relevante, ya que el estudio desarrollado por Cuadra en la Villa 89 se basa en una metodología ajustada a partir de observaciones realizadas por la autoridad competente, en este caso el SERNAGEOMIN, lo que conlleva una extensión en los plazos de finalización del proyecto. En contraste, la metodología propuesta, adaptada del trabajo de título de Azañero (2024), tiene como finalidad optimizar los tiempos de aprobación, facilitando la obtención de permisos de construcción en función de las medidas de mitigación o soporte requeridas para cada vivienda.

FACTOR	ESPECIFICACIÓN	RANGO	%
Condición de ladera (F1)	Condición de la ladera sin considerar algún soporte en el polígono, se toma el valor de la característica predominante en el sitio. Cada intervención significa un grado de inestabilización en la ladera	Área natural	No aplica
		Área intervenida, sin vivienda	7
		Área con casa en ladera natural	15
		Área con casa en corte / talud de roca	20
Condición de soporte antrópico en la ladera (F2)	Condición del soporte empleado en la ladera y el estado en el que se encuentra, este puede estabilizar o inestabilizar aportando material a ser removido	Área con casa que presenta una fortificación que tiene fallas evidentes/observables	15
		No hay soporte	0
		Área con casa que presenta fortificación sin daños evidentes	-15
Tipo de suelo (F3)	Descripción de suelos granulares de acuerdo con la granulometría, presencia de arcillas, meteorización y alteración. Adaptar a suelos finos si el caso de estudio lo requiere	Suelos gruesos con presencia de finos, alta plasticidad, existen gravas alteradas y meteorizadas	10
		Suelos gruesos con poca presencia de finos, mediana plasticidad, existen gravas levemente alteradas y meteorizadas	8
		Suelos gruesos muy poca presencia de finos, baja plasticidad, existen gravas escasamente alteradas y meteorizadas	6
		Suelos gruesos con casi nula presencia de finos, sin plasticidad, existen gravas sin alteración ni meteorización	4
Propiedades del suelo (F4)	Descripción de suelos granulares de acuerdo con la consistencia, compacidad y gradación	Suelo clastosoportado, con compacidad suelta y mala gradación	15
		Suelo clastosoportado, con compacidad suelta y buena gradación	12
		Suelo matrizsoportado, con compacidad suelta y mala gradación	10
		Suelo matrizsoportado, con compacidad suelta y buena gradación	8
		Suelos gruesos con compacidad alta	2
Altura del corte (F5)	Altura promedio del corte de suelo suelto y/o disgregable	> 1 m de altura	5
		0.3 - 1 m de altura	3
		< 30 cm de altura	1
Pendiente de talud (F6)	Pendiente promedio de talud de suelo suelto y/o disgregable	>75° muy alta	15
		60°-75° alta	10
		45°-60° media alta	8
		En pendiente natural baja	6
Exposición al sol (F7)	Alta exposición si ladera mira al N, parcial si mira al E – W y baja al S	Alta	5
		Parcial	3
		Baja	0
Clima (F8)	Se toma en consideración la condición climática de la región	Clima de tundra de alta montaña	3
		Clima de estepa fría de montaña	3
		Clima de estepa templada marginal	2
		Clima de estepa templada con precipitaciones invernales	2
		Clima de estepa con nubosidad abundante	1
Cobertura vegetal (F9)	Densidad en la unidad	Nula a escasa (<30%)	2
		Moderada (30 - 50%)	1
		Alta (>50%)	0
Deslizamientos declarados en la unidad (F10)	Deslizamientos declarados en bibliografía, prensa, encuesta y/u observación	Presenta y/o se observa	10
		No presenta ni se observa	0

Tabla 7. Desglose de los factores condicionantes en deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos. Modificado y adaptado de Azañero (2024).

Esta comparación se muestra en las figuras 1 y 2; la Figura 1 corresponde al estudio de Cuadra et al. (2023) y la Figura 2 presenta los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta en este trabajo.

En ambos casos, la Villa 89 presenta tres dominios principales de susceptibilidad para deslizamientos superficiales: baja, media y alta.

De acuerdo con la Figura 1 y Figura 2, la susceptibilidad baja se ubica principalmente en las faldas de la ladera, una zona con mayor urbanización y presencia de viviendas que cuentan con obras de estabilización. Es importante señalar que en el estudio de Cuadra et al. (2023) se identifican áreas de susceptibilidad baja en la parte alta de la Villa 89, las cuales corresponden a lotes vacíos o destinados a áreas verdes. Estas zonas no fueron evaluadas en la metodología propuesta, ya que se trata de terrenos naturales que no califican dentro del criterio de evaluación de zonas urbanas.

Por su parte, el dominio de susceptibilidad media se localiza en la zona media-alta de la ladera y se caracteriza por un bajo nivel de urbanización, presencia de suelos naturales y rellenos antrópicos de gran espesor, y ausencia de obras de estabilización.

Finalmente, la susceptibilidad alta se concentra en la cima del cerro, donde se observa un bajo grado de urbanización y presencia de suelos de gran espesor.

En términos generales, ambos mapas coinciden en las características principales de los dominios de susceptibilidad. Sin embargo, se identifican alrededor de 20 unidades geourbanas, de un total de 524, que presentan cambios en su clasificación de susceptibilidad. Estas diferencias se deben, en su mayoría, a que las ponderaciones resultantes de la sumatoria de factores condicionantes se encuentran dentro de un margen de error de ±5 puntos.

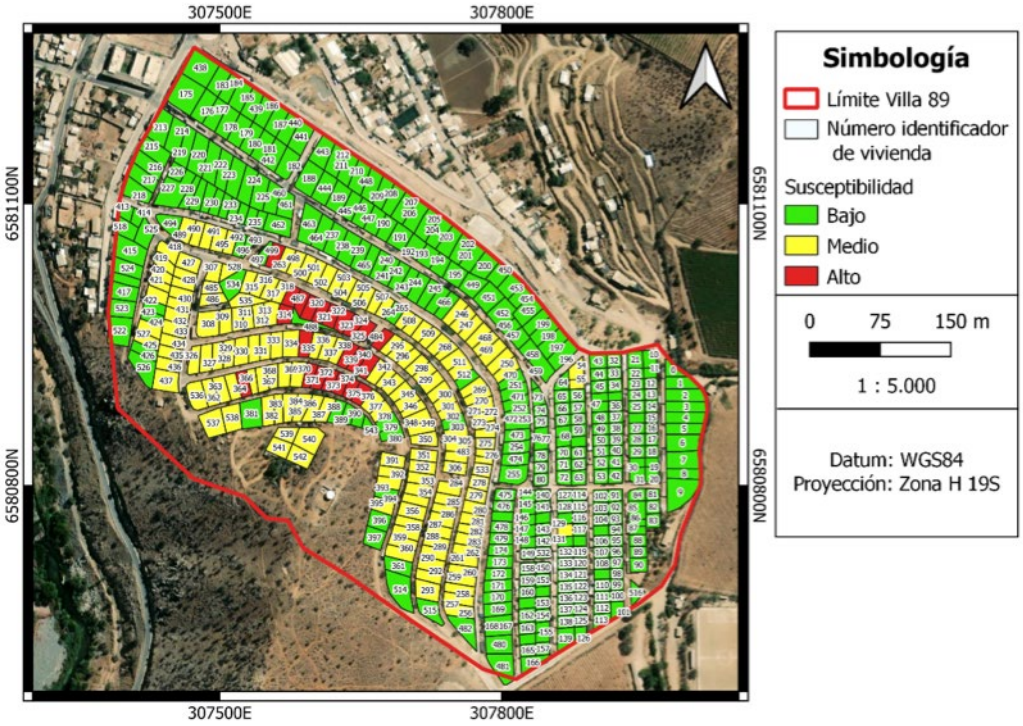


Fig. 1. Mapa de Susceptibilidad de deslizamientos de suelo. Modificado de Cuadra et al. (2023).

Para los casos de deslizamiento y caída de bloques de roca, la Villa 89 presenta dos dominios principales de susceptibilidad: baja y media.

La susceptibilidad baja se encuentra predominantemente en las faldas de la ladera, una zona caracterizada por un mayor grado de urbanización y la presencia de viviendas con obras de estabilización.

En cambio, la susceptibilidad media se localiza en las zonas media-alta y alta de la ladera, donde se observa un bajo nivel de urbanización y viviendas que, en general, no cuentan con ningún tipo de fortificación o medidas de contención.

Los mapas generados para cada tipo de remoción en masa entregan valores diferentes del Índice de Susceptibilidad (IS); sin embargo, dichos valores corresponden al mismo rango de categorización. Por lo tanto, ambos casos muestran resultados que coinciden en cuanto a la clasificación de susceptibilidad de las unidades geourbanas evaluadas.

Esta distinción entre los valores de IS, aunque no cambie la categorización general, puede ser útil en estudios de mayor detalle, especialmente aquellos con enfoque ingenieril que requieran el uso de software especializado, ya que permite realizar una evaluación más precisa del sitio.

CONCLUSIONES

Para completar el objetivo de determinar la susceptibilidad de remociones en masa en el área de estudio se elaboraron tres

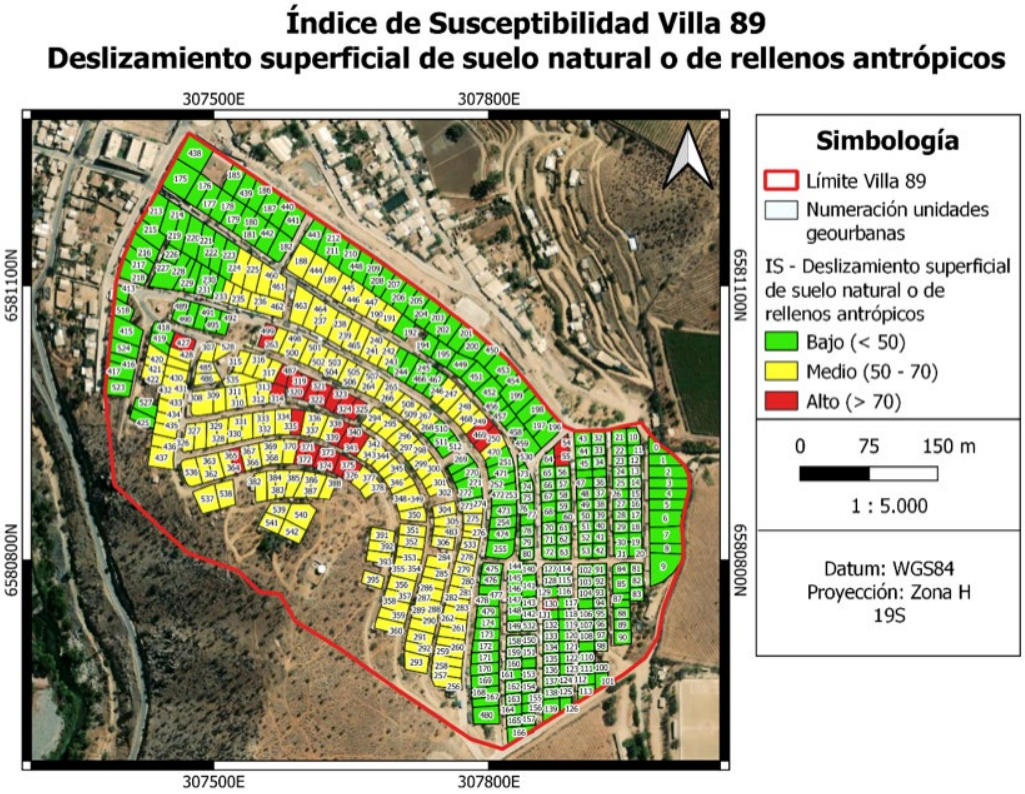


Fig. 2. Mapa de Susceptibilidad de deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos. Elaboración propia.

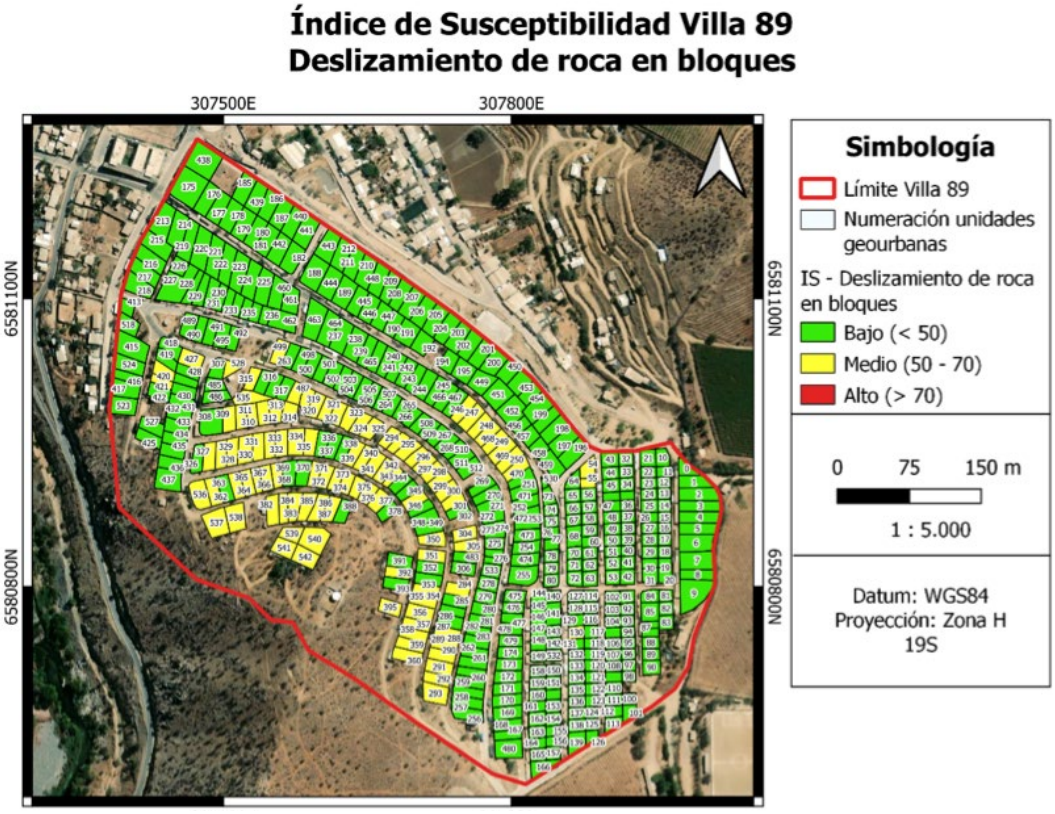


Fig. 3. Mapa de Susceptibilidad de deslizamiento de roca en bloques. Elaboración propia.

objetivos específicos que consisten en realizar una caracterización geológica-geotécnica a escala de detalle para las viviendas de la Villa 89, adaptar y aplicar la metodología propuesta por Azañero (2024) para cada tipo de remoción en masa y así, elaborar mapas de susceptibilidad de remociones en masa.

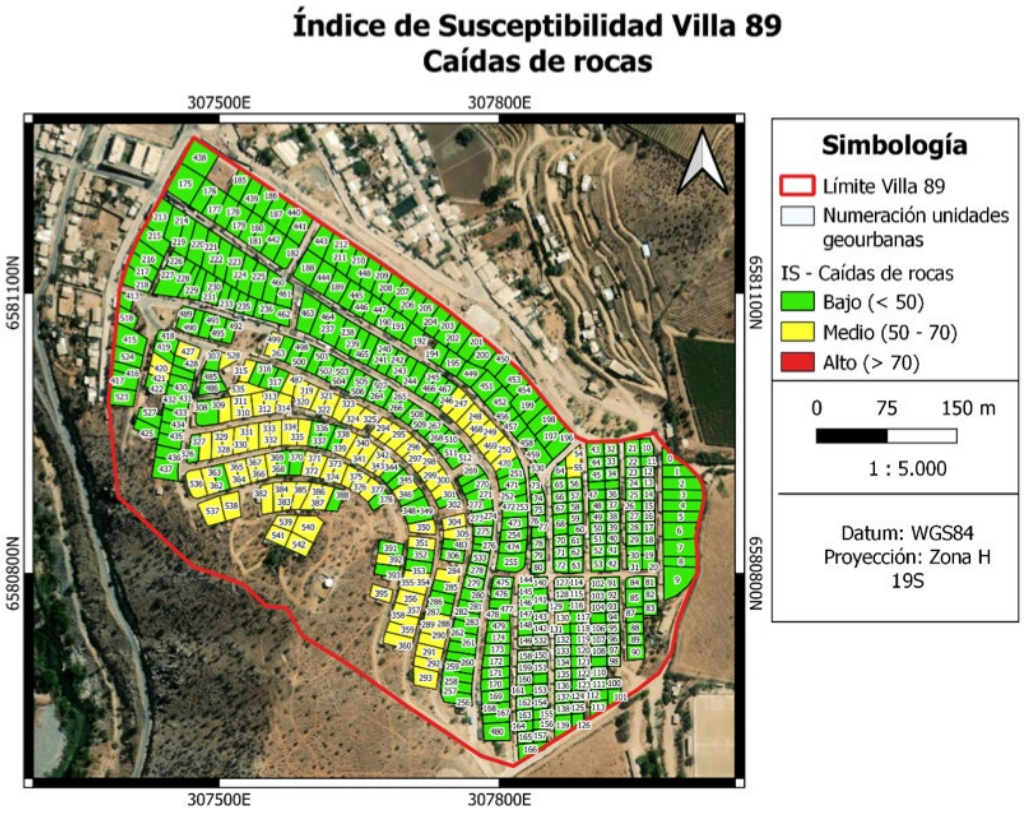


Fig. 4. Mapa de Susceptibilidad de caídas de rocas. Elaboración propia.

A partir de los mapas se observa que, en general, el área es susceptible a deslizamiento superficial de suelo natural o de rellenos antrópicos, siendo alta en la cima del cerro, donde hay suelos de mayor espesor y poca urbanización; medio en las zonas media-alta de la ladera donde no hay obras de estabilización o soporte; y baja en las faldas de la ladera, donde hay mayor urbanización con viviendas que presentan obras de mitigación. Sin embargo, tanto la susceptibilidad de caídas y deslizamientos de rocas resulta en categorías medias y bajas.

Al comparar los resultados con el estudio fundado para el caso de deslizamiento superficial de suelos naturales o rellenos antrópicos, se evidencia la eficacia de la metodología propuesta para zonas urbanas a escalas entre 1:2.000 a 1:5.000, que entrega un mapa de susceptibilidad con categorías de susceptibilidad similares para cada unidad geourbana. Esta propuesta tiene como finalidad optimizar los tiempos de aprobación de estudios, facilitando la obtención de permisos de construcción ante los organismos competentes, en función de las medidas de mitigación o soporte requeridas para cada vivienda.

Es importante destacar que la metodología no es aplicable en zonas naturales, ya que su enfoque está adaptado para zonas urbanizadas del cerro. Por tanto, se recomienda que las unidades naturales sean evaluadas mediante otra metodología de susceptibilidad de remociones en masa, como por ejemplo Lara (2007) adaptado a escala local para así obtener una visualización más completa de la susceptibilidad en la zona de estudio.

Finalmente, debido al nivel de detalle requerido para la aplicación de la metodología en zonas urbanizadas, esta debe ser acompañada de una revisión de cada uno de los factores condicionantes, sus especificaciones y ponderaciones, teniendo que realizar ajustes correspondientes en caso de ser necesario.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la empresa AlphaRock, por posibilitar la aplicación de la metodología en el área de estudio de uno de sus proyectos y por su financiamiento otorgado para la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

Azañero, J. (2024). Evaluación de susceptibilidad de remociones en masa en zonas urbanizadas, aplicación en los cerros La Silleta y Las Turquezas, comuna de Punitaqui, región de Coquimbo. Tesis para optar al título de Geóloga. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Coloma, F.; Álvarez, J.; Creixell, C.; Emparán, C.; Salazar, E.; Calderón, M. (2020). Geología de las áreas Ovalle y Peña Blanca, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica 208-209: 115p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Cruden, D., (1991). A simple definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No. 43, p. 27-29.

Cuadra, M., Jaña, A., Plaza, S. (2023). Estudio preliminar de susceptibilidad de remociones en masa Chañaral Alto, Monte Patria, Coquimbo.

González De Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall. 715 p.

Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Muñoz, E. (2013). Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región. Tesis para optar a Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Novoa, J.; López, D. (2001). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena: 13-28.

Varnes, D.J., (1978). Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Re-search Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA Y PROCESOS ASOCIADOS AL TRAMO EL NOGALAR – MAL PASO, RUTA PROVINCIAL N°33, QUEBRADA DE ESCOIPE, SALTA

Emilio J. Eveling[1], Franco G. Maggi Virgili[1], Daniel A. Sales[2]
[1]Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina.
[2]Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, Ciudad de San Luis, provincia de San Luis, Argentina.
Mail de contacto: emilioe145@gmail.com

RESUMEN
En esta contribución se analizan las características geológicas y geotécnicas de un tramo de la ruta provincial N°33 en la quebrada de Escoipe, entre el paraje El Nogalar y el puente de Mal Paso. El tramo de estudio presenta un macizo rocoso muy meteorizado, afectado por diversas familias de fracturas que desarrollan problemas de inestabilidad, tanto en sus laderas como en los taludes de precorte. Evidencia de ello es el deslizamiento desarrollado en el año 2018, interrumpiendo el tránsito de la ruta y provocando inconvenientes viales y logísticos en la zona.
A partir del análisis geomecánico del macizo y de las características geológicas, geomorfológicas y estructurales de los afloramientos involucrados, se confeccionó un mapa de riesgo por procesos de remoción en masa sobre las áreas activas o susceptibles de ser afectadas por procesos gravitacionales en el tramo analizado.
Los resultados obtenidos permitieron identificar que en las márgenes de la RP N° 33, la mitad del tramo analizado presentaron zonas con riesgo alto, seguidos de tramos con riesgos medio y muy escaso zonas con riesgo bajo.
Lo analizado condiciona la estabilidad del sector, favorecido por las altas pendientes de sus laderas, lo que indicaría la continua ocurrencia de los procesos de gravedad para el tramo de estudio.

Palabras clave: Quebrada de Escoipe - remoción en masa - mapa de riesgo - geotecnia.

ABSTRACT
This contribution analyzes the geological and geotechnical characteristics of a segment of Provin-cial Route N° 33 located in the Escoipe ravine, between the El Nogalar area and the Mal Paso bridge. The study section features a highly weathered rock mass, affected by various families of fracture that cause instability problems, both on its slopes and on the pre-cut slopes. Evidence of this is the landslide that occurred in 2018, disrupting traffic on the route and causing road and logistical problems in the area.
Based on a geomechanical analysis of the rock mass and the geological, geomorphological, and structural characteristics of the outcrops involved, a hazard map was developed for the active ar-eas or those susceptible to being affected by gravitational processes in the analyzed section.
The results indicate that along the margins of Provincial Route N° 33, approximately half of the studied segment falls within high-hazard zones, followed by sections classified as moderate haz-ard, with only a few areas categorized as low hazard.
The analysis determines the stability of the sector, favored by the steep slopes of its hillsides, which would indicate the continued occurrence of gravity processes in the study section.

Keywords: Escoipe ravine - mass movement - hazard map - geotechnics.

INTRODUCCIÓN

La quebrada de Escoipe, es un cañón estrecho que atraviesa varias serranías con dirección predominantemente meridional, cortando la estructura regional de manera transversal donde se exponen laderas con altas pendientes, meteorizadas y disectadas por redes de drenaje dendríticas, que producen diferentes tipos de inestabilidad de laderas generando continuos inconvenientes viales a la zona por procesos gravitatorios.

Las características topográficas propias de la región favorecen la ocurrencia de estos procesos a lo largo de la quebrada, con laderas con pendientes pronunciadas y alturas de hasta 100 metros de desnivel respecto al nivel de base local. Los taludes ubicados sobre las márgenes de la ruta provincial N° 33, en el tramo de estudio, presentan pendientes que varían entre 70° y 87°.

Los procesos de meteorización y los fenómenos climáticos, principalmente la lluvia, actúan constantemente sobre la capa superficial tanto de la cima como de las laderas de las montañas, lo que genera condiciones favorables para la ocurrencia de procesos

gravitacionales. Estas condiciones sumadas a factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos intrínsecos de la zona, aumenta la vulnerabilidad de quienes transitan en la ruta, ante diferentes eventos gravitacionales, entre los que se destacan deslizamientos traslacionales y caídas de roca.

Motiva la presente investigación analizar las condiciones del macizo serrano en las bordes de la ruta, en un tramo aproximado de 3,8 km en la quebrada de Escoipe, entre el paraje El Nogalar (coordenadas 25°09´56" S – 65°37´46" O) y el puente de Mal Paso (coordenadas 25°09´42" S – 65°39´28" O), Departamento de Chicoana, a unos 60 km al suroeste de la ciudad de Salta (Fig. 1).

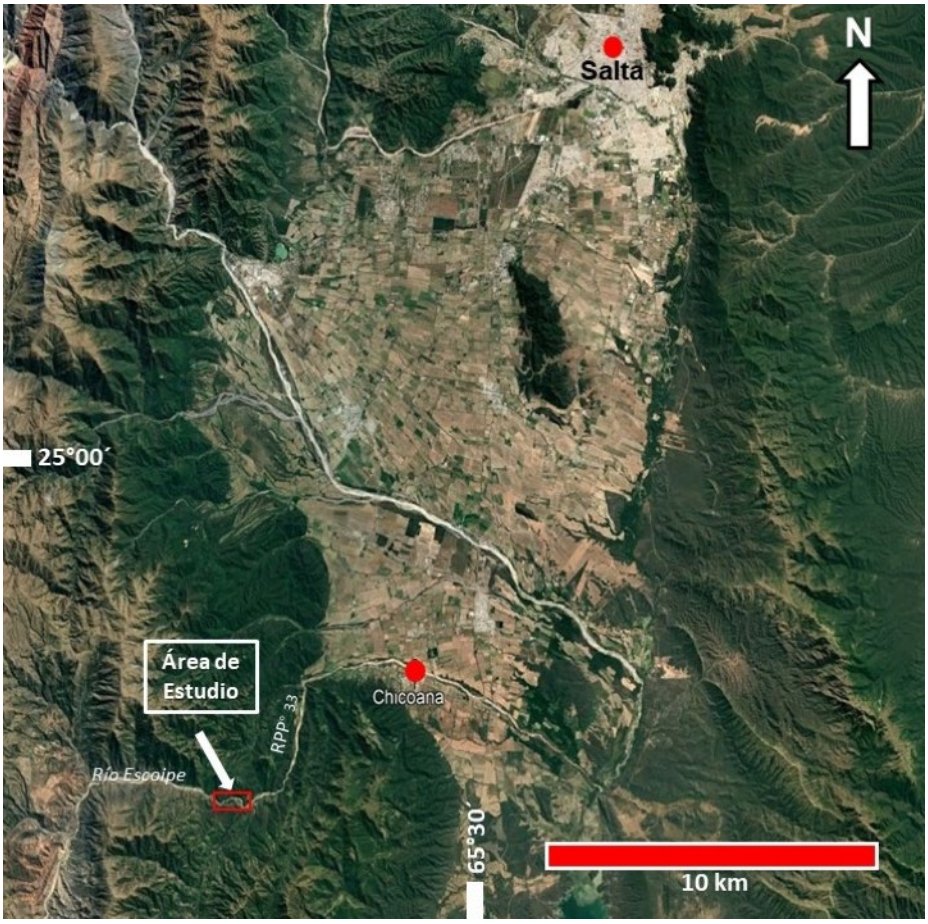


Fig. 1. En recuadro rojo tramo de estudio de la RRP N° 33 (Imagen modificada del Google Earth)

Los objetivos de la presente contribución corresponden a la identificación de las condiciones geomorfológicas, geotécnicas y estructurales del tramo analizado, a fin de caracterizar las condiciones de estabilidad de los taludes de pre-corte y estimar el grado de riesgo de procesos de remoción en masa en los sectores más vulnerables con la finalidad de elaborar un mapa de riesgo.

Las elevadas pendientes de sus laderas y las condiciones geomecánicas de los materiales rocosos, con elevado grado de meteorización y afectados a su vez por diversas familias de fracturas, contribuyen al desarrollo de diferentes sectores de inestabilidad en sus laderas. En los trabajos de campo se pudo constatar marcas de caídas de roca sobre el pavimento, la identificación de conos de deyección al pie de los taludes, materiales acumulados sobre banquina, entre otros.

Entre los principales antecedentes de inestabilidad de laderas se destaca el deslizamiento de ladera ocurrido a fines de febrero del año 2018, donde se registró un importante deslizamiento con depositación del material deslizado sobre la calzada vial y la margen norte del río Escoipe, con interrupción total del tránsito durante varios días (Fig. 2).

Caracterización geológica y estructural

El marco geológico de la zona de estudio corresponde a la provincia geológica de Cordillera Oriental, conformado por rocas del basamento del Complejo Puncoviscana de edad Precámbrica – Cámbrica (Aparicio González y Moya, 2014), en contacto mediante discordancia angular por la depositación de sedimentitas del Grupo Salta, con edades que varían del Cretácico al Paleógeno (Turner, 1959).

La depositación de los sedimentos estuvo asociado al desarrollo del rift intracratónico que tuvo lugar en el noroeste argentino durante el Cretácico, desarrollando un estadío de sin-rift a la depositación del Subgrupo Pirgua (sedimentitas rojas continentales) presentes en el área de estudio, y un estadío de post-rift a los depósitos de los Subgrupos Balbuena (presente en el tramo de estudio) y Santa Bárbara, caracterizados por sedimentos de origen fluvial y lacustres hasta el Eoceno medio (Salfity y Marquillas, 1999).



Fig. 2. Deslizamiento de ladera sobre la margen occidental de la RRP N° 33 afectando la totalidad de la calzada vial (02/2018. Imagen tomada de modificada de Maggi Virgili)

Por último, se reconocieron depósitos modernos asociados a depósitos aluviales y fluviales como los sedimentos del río Escoipe.

Estructuralmente el macizo serrano fue modelado a partir de un estilo tectónico de faja plegada de piel gruesa controlado en gran parte por la inversión tectónica y la reactivación de estructuras por sistemas de corrimientos de doble vergencia (Turner y Mon, 1979; Cristallini et al., 1997).

Caracterización geotécnica

De los parámetros geomecánicos analizados en las discontinuidades del macizo, predominan bloques de tamaño pequeño (<1m^3), espaciamiento entre 6 a 20 centímetros, continuidad donde predominan las menores a 1 m seguidas por el rango de 1 a 3 m, rugosidad plana lisa, abertura entre 0,1 a 1 milímetro, y en los casos en los que las discontinuidades están rellenas, el tipo de material predominante es terroso.

Según el índice RQD en afloramiento (Palmstrom, 2005), el grado de fracturación es "bueno" (50–75%). Estos parámetros actúan como factores condicionantes para la estabilidad de los taludes, los cuales están principalmente controlados por la orientación de la cara libre del talud respecto a las discontinuidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la descripción geotécnica de los taludes de pre-corte de la ruta, se utilizó el método cuantitativo para la descripción de las discontinuidades según ISRM (1981), mientras que para la clasificación geomecánica del macizo, se utilizaron los índices RMR (Bieniaswki, 1973, 1976) y GSI (Hoek y Brown, 1997).

Respecto a la confección del diagrama de polos y el procesamiento de datos por falla planar y en cuña, se utilizó el software de Rocscience (2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los diferentes procesos gravitatorios reconocidos en el tramo de estudio de la RP N° 33, varían de procesos de reptación, caídas de roca, vuelco y deslizamientos. Los deslizamientos se inician a partir de la interacción de las estructuras de deformación frágil,

desarrollando en los taludes roturas de tipo planar y en cuña.

Se analizó el riesgo de los procesos de remoción en masa en el tramo de estudio (Fig. 3), según la siguiente clasificación:

Riesgo bajo (verde): corresponden a sectores donde las pendientes son poco pronunciadas, las condiciones geotécnicas son más estables y no se registran eventos recientes ni pasados de remoción en masa.

Riesgo medio (amarillo): están asociadas a taludes de pendiente moderada, con evidencias de procesos gravitacionales estabilizados y una cobertura vegetal abundante, lo que reduce la ocurrencia de caídas de roca.

Riesgo alto (naranja): se localizan principalmente en áreas de pendientes pronunciadas y en aquellas con antecedentes o eventos actuales de caídas de roca, o frentes de deslizamientos activos o parcialmente estabilizados.

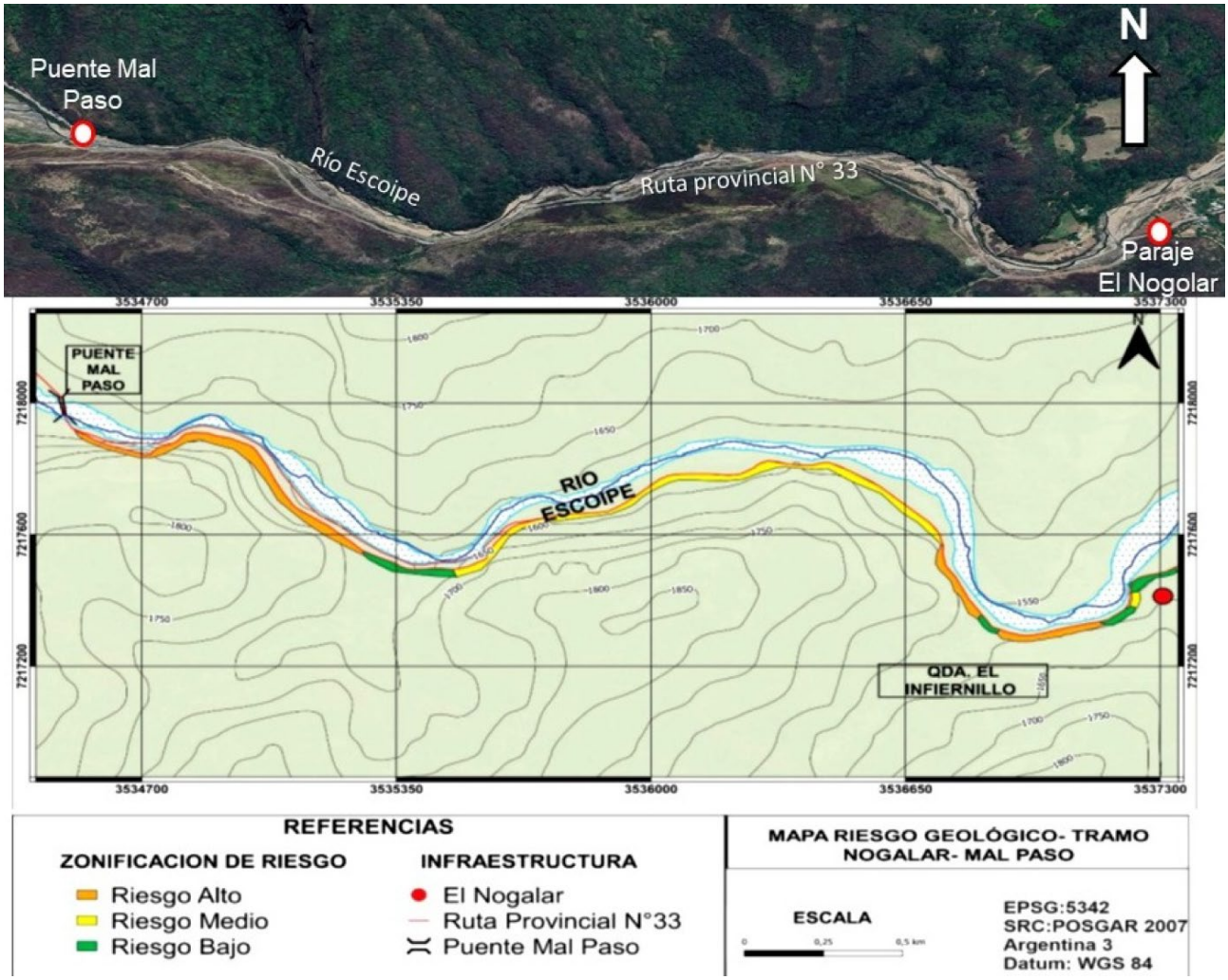


Fig. 3. Mapa de riesgo por procesos de remoción en masa en el área de estudio

CONCLUSIONES

En el tramo analizado de la RP N° 33 afloran materiales rocosos con diferentes calidades geotécnicas, muy fracturados y meteorizados, que presentan una pendiente general muy pronunciada, esto contribuye a una constante caída de rocas sobre la calzada y el riesgo latente de ocurrencia de procesos de mayor envergadura como el deslizamiento ocurrido en 2018 en el sector de la quebrada del Infiernillo.

Los principales mecanismos de rotura observados en los taludes son de origen planar y en cuña, generando en algunos sitios deslizamientos traslacionales. En menor participación por vuelco.

Según el índice RMR la calidad del macizo en el tramo de estudio varía de calidad “media” (41-60%) a “mala” (21-40%) con una ponderación entre 41-60% Mientas que el resto de las ventanas son de calidad geomecánica buena. En base a la clasificación geomecánica GSI, se obtuvo una calidad buena con un rango entre 50-60, conformado por el campo de superficies lisas, fracturadas y por lo general con 3 familias de discontinuidades.

REFERENCIAS

Aparicio González, P.A. y Moya M.C. (2014). Una propuesta para identificar formalmente al basamento estratigráfico del noroeste argentino. XIX Congreso Geológico Argentino, Actas de resúmenes, p. S2-3.

Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, vol. 15: 335-344.

Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. In Proc. Symp. Exploration for Rock Eng. Vol. 1:97-106. Balkema, Rotterdan.

Cristallini, E., Cominguez, A. H. y Ramos, V. A. (1997). Deep structure of the Metan-Guachipas region: Tectonic inversion in northwestern Argentina. Journal of South American Earth Sciences 10 (5-6): 403-421. https://doi.org/10.1016/S0895-9811(97)00026-6

Hoek, E. y Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. Int. Journal of Rock Me-chanics and Mining Sciences. Elsevier, Vol. 34 (8): 1165-1186.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

Maggi Virgili, F.G. (2025). Caracterización geológica-geotécnica y procesos asociados al tramo El Nogalar – Mal Paso, ruta provincial N° 33, quebrada de Escoipe, Salta. Tesis Profesional (Inédita). Universidad Nacional de salta. 188 pág.

Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4): 362-377.

Rocscience Inc. (2019). www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. (1999). La cuenca cretácico-terciaria del norte argentino. En Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, Servicio Geológico Minero, Anales 29: 613-626, Buenos Aires.

Turner, J.C.M. (1959). Estratigrafía del cordón de Escaya y de la sierra Rinconada. Revista de la Asociación Geológica Argentina 15(1): 15-39.

Turner. J. C. y Mon. R. (1979). Cordillera Oriental. En: Turner, A. F. (Ed.): Geología Regional Argentina. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias, 1: 57-94. Córdoba.

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE LOS MATERIALES DE FUNDACIÓN DE UNA PRESA DE MATERIALES SUELTOS MEDIANTE MÉTODOS EMPÍRICOS Y NUMÉRICOS

Ezequiel T. Martinez[1]
[1]Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
Mail de contacto: martineze85@gmail.com

RESUMEN

El fenómeno de licuación causado por sismos ha sido una de las principales áreas de estudio en la ingeniería geotécnica debido a los potenciales riesgos catastróficos que puede generar. Las ondas sísmicas generan excesos de presiones de poros que, cuando el material está suelto, eventualmente inducen una pérdida instantánea de la rigidez y resistencia al corte del material, ya que el suelo no tiene la capacidad de disipar dichas presiones en el corto lapso de duración del sismo.
En la práctica geotécnica habitual, la vulnerabilidad de un suelo a licuar se estudia a partir de métodos empíricos basados en los resultados de ensayos in-situ (e.g. CPT o SPT). Sin embargo, la licuación sigue siendo un tema de estudio, en particular, mediante métodos numéricos y modelos constitutivos avanzados que simulan el comportamiento de los suelos bajo cargas dinámicas. Entre estos modelos, PM4Sand se desarrolló para simular este comportamiento en suelos granulares calibrando principalmente tres parámetros. Este trabajo tiene como objetivo principal comparar los métodos empíricos con un análisis numérico dinámico.
Para ello, se analizó un caso real de estudio, que consiste en una presa construida sobre arenas sueltas y medianamente densas, y utilizándose más de 30 registros sísmicos. Se analizó la ocurrencia de licuación de estratos de arenas (sueltas y medianamente densas) para sismos de verificación (SV) y básicos de operación (SBO) según métodos simplificados empíricos y numéricos. Con estos últimos, además, se estudiaron los asentamientos en coronamiento y filtros y las deformaciones de corte, y finalmente la resistencia post-licuación.

Palabras clave: licuación, análisis dinámico, métodos numéricos

ABSTRACT

Due to the potential catastrophic risks it can generate, the phenomenon of liquefaction caused by earthquakes has been a primary area of study in geotechnical engineering. Seismic waves induce excess pore pressures that, when the soil is loose, eventually lead to an instantaneous loss of stiffness and shear strength, as the soil is unable to dissipate these pressures within the short duration of the earthquake.
In common geotechnical practice, the vulnerability of soil to liquefaction is assessed using empiri-cal methods based on in-situ test results (e.g., CPT or SPT). Furthermore, numerical methods and advanced constitutive models that simulate soil behavior under dynamic loads are a relevant methodological tool. Among these models, PM4Sand was developed to simulate this behavior in granular soils, primarily by calibrating three parameters. The main objective of this study is to compare empirical methods with a dynamic numerical analysis.
To achieve this, a real case study was analyzed, involving a dam built on loose to medium-dense sands, using more than 30 seismic records. The occurrence of liquefaction in sandy layers (loose and medium-dense) was evaluated for safety evaluation earthquakes (SEE) and operating basis earthquakes (OBE) using both simplified and numerical methods. Additionally, the numerical analysis examined crest and filter settlements, shear deformations, and finally, post-liquefaction strength.

Keywords: liquefaction, dynamic analysis, numerical methods

INTRODUCCIÓN

Los suelos granulares sueltos tienden a contraerse bajo cargas cíclicas inducidas por sismos y, si el suelo está saturado y es incapaz de drenar, la reorganización de las partículas del suelo puede transferir las tensiones del esqueleto al agua poral. La incapacidad del agua intersticial de drenar provoca un aumento de las presiones de poros, que resulta en una reducción de la tensión efectiva del suelo y una pérdida asociada de resistencia y rigidez (Mitchell et al., 2005). Esta pérdida instantánea de resistencia y rigidez es conocida como licuación dinámica y puede tener resultados catastróficos, en particular al afectar grandes obras como presas y sus embalses (Fell et al., 2015).

En la práctica geotécnica habitual, la resistencia de un suelo a licuar se estudia a partir de métodos empíricos y de ensayos cíclicos de laboratorio que proveen curvas de resistencia cíclica (CRR) para el suelo analizado. En los primeros, ensayos in-situ se utilizan para caracterizar el perfil de suelo y estimar su resistencia a la licuación, pero no tienen en cuenta su comportamiento en términos de las tensiones, deformaciones y presiones de poros generadas (Fell et al., 2015).

Se han desarrollado modelos constitutivos que permiten simular de manera realista lo que experimenta un suelo en determinadas condiciones de carga y que pueden ser implementados en programas de elementos finitos (FEM). Estos modelos consideran la generación de excesos de presiones de poros en condiciones no drenadas bajo cargas cíclicas, la degradación de la rigidez y resistencia del suelo y las deformaciones irreversibles que ocurren durante el proceso de licuación; se basan en la teoría de la plasticidad e incorporan tensiones efectivas y el concepto de estado crítico. En este trabajo, se exploró el fenómeno de la licuación a través de un modelo constitutivo avanzado denominado PM4Sand, desarrollado por Boulanger y Ziotopoulou (2015) e implementado en el software de elementos finitos PLAXIS. El mismo simula el comportamiento de arenas para cargas monotónicas y cíclicas en condiciones drenadas y no drenadas, y tiene la ventaja de poder ser calibrado razonablemente para fines prácticos por unos pocos parámetros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caso de estudio

Se trata de una presa de materiales sueltos típica del noroeste de Argentina, de altura moderada, que forma parte del cierre de un aprovechamiento hidroeléctrico. Está fundada en sedimentos fluviales modernos, constituidos por arenas finas limosas o arcillosas de densidad variable, limos y arcillas (Figura 1). La presa tiene una altura de 29m, con núcleo impermeable formado por limos de baja plasticidad.

Por un acuerdo de confidencialidad oportunamente suscripto no se brinda una mayor precisión de la antes mencionada presa.

La fundación y materiales de la presa fueron estudiados mediante la ejecución de 3 sondeos, denominados S1, S2 y S3 y ubicados como se observa en la Figura 2, con ejecución de ensayos SPT y toma de muestra para ensayos de laboratorio habituales. A partir de estos ensayos, y de las correcciones pertinentes al NSPT (corrección por energía aplicada, longitud de las varillas, sobrecarga, diámetro del sondeo y sacamuestras utilizado) para obtener el valor corregido $(N_1)_{60}$, se dividió a los suelos de fundación en los siguientes estratos (ver Figura 1 y Tabla 1):

- Arenas sueltas: arenas limosas sueltas con predominio de SP y SP-SM ($(N_1)_{60}$<10).
- Arenas limosas medianamente densas: arenas medianamente densas en general SP y SP-SM (10<(N1)60<30).
- Arenas densas a muy densas: arenas limosas densas a muy densas SP, SM y SP-SM ($(N_1)_{60}$>30).
- Arcillas de alta plasticidad: arcillas (CH) y en menor medida limos (MH) de alta plasticidad.
- Arcillas de baja plasticidad: arcillas (CL) y en menor medida limos (ML) de baja plasticidad.

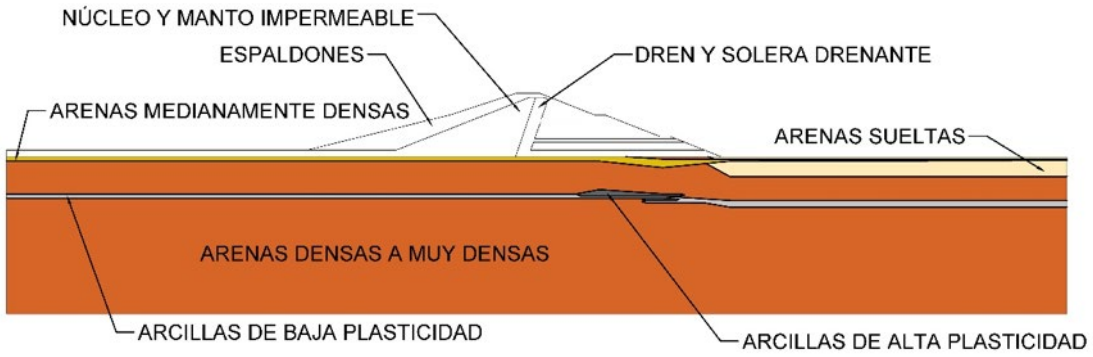


Fig. 1. Sección de la presa y estratigrafía del subsuelo.

Por otro lado, se consideraron espectros de pseudo-aceleración, obtenidos para períodos de retorno de 10.000 y 145 años: el primero muestra un PGA (peak ground acceleration) de 0,89g y una pseudo-aceleración máxima de 2,22g para un periodo de 0,3 segundos, y para 145 años un PGA de 0,22g y una pseudo-aceleración máxima de 0,61g para un período de 0,3 segundos.

Análisis de la susceptibilidad a la licuación mediante método empíricos (simplificados)

Se analizó la susceptibilidad a la licuación evaluando de su comportamiento (i.e. contractivo o dilatante), mediante las curvas presentadas por Olson y Stark (2003), a partir del ensayo de penetración estándar (SPT) y la tensión vertical efectiva inicial. En el caso de suelos finos, Bray et al. (2004) desarrollaron un método que evalúa la susceptibilidad a partir de la humedad natural y el límite líquido. En los talleres NCEER de 1996 y NCEER/NSF de 1998 (Youd e Idriss, 2001), se desarrolló el método más extendido para evaluar la resistencia a la licuación de suelos en pendientes fundamentalmente horizontales, luego ampliados y refinados por

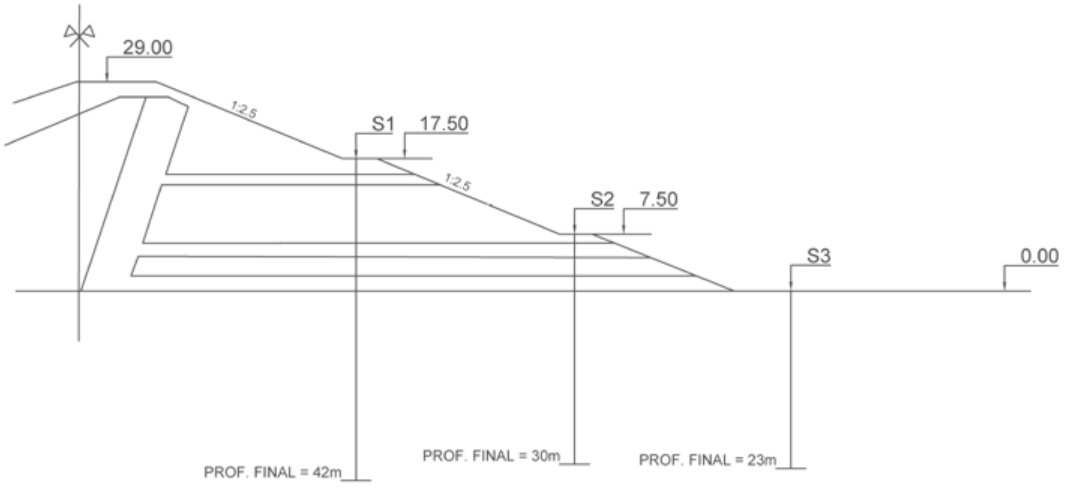


Fig. 2. Ubicación de los sondeos en la presa (S1 en berma superior, S2 en berma inferior y S3 a pie de presa).

distintos autores (e.g. Idriss y Boulanger, 2006, 2010).

El procedimiento requiere la determinación de dos parámetros para estudiar la resistencia cíclica de los suelos: el CSR (la demanda) y el CRR (la capacidad o resistencia). A partir de estos parámetros, se define el factor de seguridad a la licuación como FS_{LIQ} = CRR/CSR (hay licuación si es menor a 1). Por otro lado, la licuación teóricamente se inicia cuando el exceso de presión de poros es igual a la tensión efectiva vertical (relación de exceso de presión de poros $r_u = \Delta u/\sigma'_v = 1$).

S1 [BERMA SUPERIOR]			S2 [BERMA INFERIOR]			S3 [PIE DE PRESA]		
PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$
PRESA						1	SC	6
						2	SM-SC	20
22	SP-SM	17	10	SP-SM	>50	3	SP	10
23	SP	18	11	SP-SM	17	4	SP-SM	8
24	SP-SM	>50	12	SP-SM	25	5	SP	7
25	SM	>50	13	SP	24	6	SP	6
26	SP	42	14	SP-SM	27	7	SP-SM	5
27	SP-SM	43	15	SP	43	8	SM	10
28	SM	33	16	SM	42	9	SP	8
29	SM	49	17	SP-SM	41	10	SP-SM	43
30	SM	>50	18	SP-SM	40	11	SM	45
31	SM	>50	19	SP	39	12	SM	>50
32	SP-SM	>50	20	SP	39	13	SM	>50
33	SM	>50	21	SP	38	14	SM	>50
34	SM	>50	22	SP	37	15	SP-SM	>50
35	SM	48	23	SP	37	16	SP-SM	>50
36	CH	25	24	SP-SM	36	17	SP-SM	>50
37	CH	23	25	SM	36	18	SP-SM	>50
38	MH	27	26	SM	35	19	SP	>50
39	CL	46	27	CH	35	20	SM	>50
40	SP-SM	>50	28	ML	34	21	CL	>50
41	SP-SM	>50	29	CH	34	22	CL	>50
42	SM	>50	30	CL	33	23	CL	>50

ARENAS SUELTAS [N<10]
ARENAS MEDIANAMENTE DENSAS [10<N<30]
ARENAS DENSAS A MUY DENSAS [N>30]
ARCILLAS DE BAJA PLASTICIDAD
ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD

Tabla 1. Estratigrafía del subsuelo de acuerdo al número de golpes corregido $(N_1)_{60}$ y la clasificación de suelos SUCS.

Si se considera que ocurrirá la licuación de los suelos de fundación, un análisis de estabilidad post-licuación utilizando la geometría de la estructura pre-sismo se realiza para determinar si las tensiones de corte estáticas son mayores que la resistencia post-sismo. Se utilizó la resistencia no drenada post-licuación, normalizada por la tensión efectiva vertical inicial, de Olson y Stark (2003), y luego se calculó el factor de seguridad FS (falla si FS<1).

Análisis de la susceptibilidad a la licuación mediante método numéricos

En la Figura 3 se muestra la geometría de la presa modelada en el *software* PLAXIS (modelado estático con reconstrucción de la presa en 7 etapas, de entre 3 y 5m de altura, simulando la compactación de los materiales).

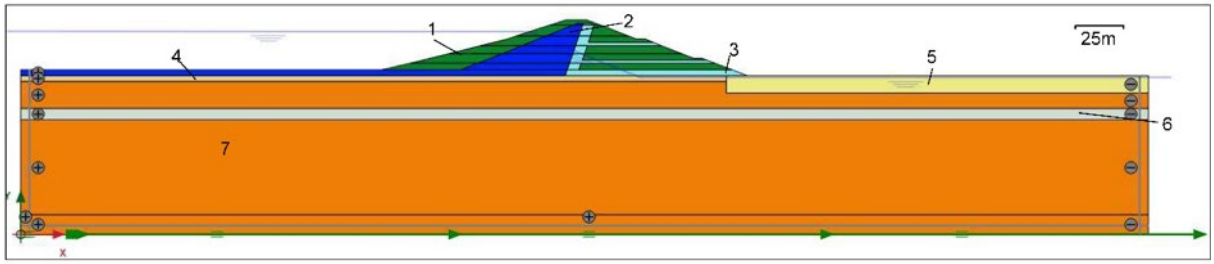


Fig. 3. Geometría y estratigrafía utilizada en el modelo (ancho y profundidad total 585m y 115m, respectivamente). Referencias: 1 espaldones, 2 núcleo impermeable, 3 filtro, 4 arenas medianamente densas, 5 arenas sueltas, 6 arcillas de baja plasticidad, 7 arenas densas a muy densas). No se consideraron las arcillas de alta plasticidad en el modelo.

Se utilizó el modelo constitutivo *Hardening Soil with Small Strain Stiffness* (HSS) para condiciones estáticas, que tiene en cuenta que el módulo de deformación del suelo depende del nivel de deformación que experimenta, y durante el análisis dinámico, se utilizó este modelo para las capas no licuables mientras que las licuables se modelaron con el modelo PM4Sand. Se utilizaron registros de sismos del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER), escalados con espectros seleccionados con las características mencionados anteriormente, obteniéndose 10 registros de sismos escalados al SEE y 21 registros de sismos escalados al OBE. Se consideró el amortiguamiento por radiación, histerético y viscoso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados obtenidos con métodos empíricos

Se observa en la Figura 4 que, en todos los sondeos, en los primeros metros del suelo natural de fundación, el comportamiento es contractivo, por lo cual debe analizarse su susceptibilidad a la licuación.

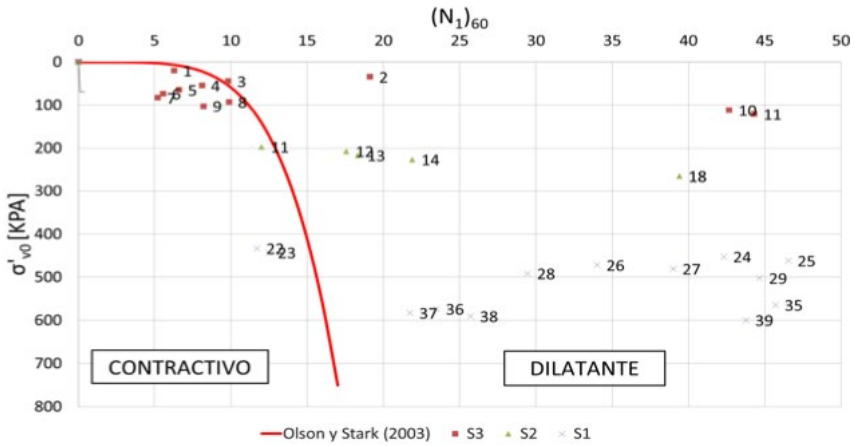


Fig. 4. Comportamiento contractivo y dilatante de los suelos (profundidad indicada en cada punto), a partir de la curva recomendada por Olson y Stark. Se indican los niveles con $(N_1)_{60}$<50.

Para el cálculo de los factores de seguridad FS_{LIQ}, se realizó el cálculo del CSR para el sismo de verificación (SV o SEE) y el sismo básico de operación (SBO u OBE), adoptando para el primero un PGA de 0,89g y para el segundo de 0,22g; para ambos se adoptó una magnitud de 6,8. Luego, se realizó el cálculo del CRR. Se resumen los resultados obtenidos de FS_{LIQ} y ru para los sismos de verificación (SEE), en la Tabla 2, y de operación (OBE), en la Tabla 3:

S1 [BERMA SUPERIOR]						S2 [BERMA INFERIOR]						S3 [PIE DE PRESA]					
PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]
PRESA												1	SC	6	50,71%	0,33	100%
												2	SM-SC	20	72,90%	0,41	100%
22	SP-SM	17	50,47%	>1	81%	10	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%	3	SP	10	46,21%	0,14	100%
23	SP	18	52,08%	>1	76%	11	SP-SM	17	53,50%	0,33	100%	4	SP-SM	8	42,01%	0,12	100%
24	SP-SM	>50	98,24%	>1	0%	12	SP-SM	25	62,46%	0,52	100%	5	SP	7	37,89%	0,11	100%
25	SM	>50	100,00%	>1	0%	13	SP	24	63,13%	0,48	100%	6	SP	6	34,72%	0,10	100%
26	SP	42	85,99%	>1	5%	14	SP-SM	27	68,98%	0,61	100%	7	SP-SM	5	34,10%	0,10	100%
27	SP-SM	43	92,51%	>1	3%	15	SP	43	100,00%	>1	16%	8	SM	10	54,62%	0,16	100%
28	SM	33	83,88%	>1	21%	16	SM	42	100,00%	>1	5%	9	SP	8	42,28%	0,12	100%
29	SM	49	100,00%	>1	0%	17	SP-SM	41	100,00%	>1	24%	10	SP-SM	43	96,73%	>1	15%
30	SM	>50	100,00%	>1	0%	18	SP-SM	40	93,89%	>1	22%	11	SM	45	100,00%	>1	0%
31	SM	>50	100,00%	>1	0%	19	SP	39	100,00%	>1	33%	12	SM	>50	100,00%	>1	0%
32	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%	20	SP	39	100,00%	>1	37%	13	SM	>50	100,00%	>1	0%
33	SM	>50	100,00%	>1	0%	21	SP	38	100,00%	>1	41%	14	SM	>50	100,00%	>1	0%
34	SM	>50	100,00%	>1	0%	22	SP	37	100,00%	>1	45%	15	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%
35	SM	48	100,00%	>1	0%	23	SP	37	100,00%	>1	48%	16	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%
36	CH	25	79,39%	>1	27%	24	SP-SM	36	100,00%	>1	50%	17	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%
37	CH	23	76,96%	>1	31%	25	SM	36	100,00%	>1	18%	18	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%
38	MH	27	82,38%	>1	18%	26	SM	35	100,00%	>1	23%	19	SP	>50	100,00%	>1	0%
39	CL	46	100,00%	>1	0%	27	CH	35	100,00%	>1	15%	20	SM	>50	100,00%	>1	0%
40	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%	28	ML	34	100,00%	>1	15%	21	CL	>50	100,00%	>1	0%
41	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%	29	CH	34	100,00%	>1	18%	22	CL	>50	100,00%	>1	0%
42	SM	>50	100,00%	>1	0%	30	CL	33	100,00%	>1	26%	23	CL	>50	100,00%	>1	0%

ARENAS SUELTAS [N<10]
ARENAS MEDIANAMENTE DENSAS [10<N<30]
ARENAS DENSAS A MUY DENSAS [N>30]
ARCILLAS DE BAJA PLASTICIDAD
ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD

Tabla 2. Factor de seguridad FS_{LIQ} y relación de exceso de presión de poros ru para los sismos de verificación (SEE). Se resaltan en rojo los FS_{LIQ}<1.

S1 [BERMA SUPERIOR]						S2 [BERMA INFERIOR]						S3 [PIE DE PRESA]					
PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]	PROF[M]	SUCS	$(N_1)_{60}$	DR[%]	FS_{LIQ}	r_u[%]
PRESA												1	SC	6	50,71%	>1	83%
												2	SM-SC	20	72,90%	>1	69%
22	SP-SM	17	50,47%	>1	57%	10	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%	3	SP	10	46,21%	0,58	100%
23	SP	18	52,08%	>1	54%	11	SP-SM	17	53,50%	>1	82%	4	SP-SM	8	42,01%	0,49	100%
24	SP-SM	>50	98,24%	>1	20%	12	SP-SM	25	62,46%	>1	66%	5	SP	7	37,89%	0,44	100%
25	SM	>50	100,00%	>1	17%	13	SP	24	63,13%	>1	70%	6	SP	6	34,72%	0,40	100%
26	SP	42	85,99%	>1	24%	14	SP-SM	27	68,98%	>1	61%	7	SP-SM	5	34,10%	0,39	100%
27	SP-SM	43	92,51%	>1	22%	15	SP	43	100,00%	>1	9%	8	SM	10	54,62%	0,65	100%
28	SM	33	83,88%	>1	19%	16	SM	42	100,00%	>1	3%	9	SP	8	42,28%	0,48	100%
29	SM	49	100,00%	>1	14%	17	SP-SM	41	100,00%	>1	13%	10	SP-SM	43	96,73%	>1	7%
30	SM	>50	100,00%	>1	16%	18	SP-SM	40	93,89%	>1	12%	11	SM	45	100,00%	>1	0%
31	SM	>50	100,00%	>1	12%	19	SP	39	100,00%	>1	19%	12	SM	>50	100,00%	>1	0%
32	SP-SM	>50	100,00%	>1	22%	20	SP	39	100,00%	>1	21%	13	SM	>50	100,00%	>1	0%
33	SM	>50	100,00%	>1	15%	21	SP	38	100,00%	>1	23%	14	SM	>50	100,00%	>1	0%
34	SM	>50	100,00%	>1	16%	22	SP	37	100,00%	>1	26%	15	SP-SM	>50	100,00%	>1	0%
35	SM	48	100,00%	>1	15%	23	SP	37	100,00%	>1	28%	16	SP-SM	>50	100,00%	>1	1%
36	CH	25	79,39%	>1	17%	24	SP-SM	36	100,00%	>1	29%	17	SP-SM	>50	100,00%	>1	2%
37	CH	23	76,96%	>1	21%	25	SM	36	100,00%	>1	8%	18	SP-SM	>50	100,00%	>1	3%
38	MH	27	82,38%	>1	10%	26	SM	35	100,00%	>1	11%	19	SP	>50	100,00%	>1	5%
39	CL	46	100,00%	>1	13%	27	CH	35	100,00%	>1	5%	20	SM	>50	100,00%	>1	1%
40	SP-SM	>50	100,00%	>1	24%	28	ML	34	100,00%	>1	6%	21	CL	>50	100,00%	>1	0%
41	SP-SM	>50	100,00%	>1	23%	29	CH	34	100,00%	>1	7%	22	CL	>50	100,00%	>1	0%
42	SM	>50	100,00%	>1	18%	30	CL	33	100,00%	>1	12%	23	CL	>50	100,00%	>1	0%

ARENAS SUELTAS [N<10]
ARENAS MEDIANAMENTE DENSAS [10<N<30]
ARENAS DENSAS A MUY DENSAS [N>30]
ARCILLAS DE BAJA PLASTICIDAD
ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD

Tabla 3. Factor de seguridad FS_{LIQ} y relación de exceso de presión de poros r_u para los sismos de operación (OBE). Se resaltan en rojo los FS_{LIQ}<1.

Tanto para el SEE como para el OBE las arenas sueltas tienen un FS_{LIQ}<1 (S3), por lo cual licuarán; mientras que las arenas medianamente densas sólo tienen un factor de seguridad menor a 1 al aplicar el SEE (S2), sin embargo, para el OBE, aunque FS_{LIQ} es mayor a ,1 el r_u es alto (61-82%). En relación con los suelos finos más profundos, tienen un FS_{LIQ} >1.

Resultados obtenidos con métodos numéricos: asentamientos en coronamiento y filtro

En la Figura 5 se muestran las curvas de evolución de asentamientos en el tiempo en un nodo ubicado en el coronamiento y otro en el filtro para los SEE y OBE. Se observa que los mayores asentamientos se dan en los sismos de verificación, siendo el peor el identificado como SEE_1165, con asentamientos en el coronamiento de más de 40cm y en filtro de 25cm mientras que, para los OBE los asentamientos más grandes son del orden de los 5cm y 4cm para coronamiento y filtro, respectivamente.

Comparación de ocurrencia de licuación con ambos métodos

En las Tabla 4 se observa en qué casos van a licuar los estratos potencialmente licuables según PLAXIS, que toma como criterio un r_u > 0,95, y según los métodos simplificados antes descriptos. Según el modelado en PLAXIS, para los sismos escalados por el SEE (0,89g), las arenas sueltas licúan siempre mientras que las arenas medianamente densas lo hacen en algunos casos (60%); para los sismos escalados por el OBE (0,22g) las arenas medianamente densas no licúan mientras que las arenas sueltas licúan solo en determinados sismos (20%).

En el caso del peor sismo (SEE_1165), considerado como aquel con mayor asentamiento en el coronamiento y filtro, en la Figura 6 se observan los puntos licuados y valores de r_u.

Se realizó un análisis estático de estabilidad de la presa post-licuación, utilizando la resistencia no drenada obtenida con la

ID	ARENAS MEDIANAMENTE DENSAS		ARENAS SUELTAS	
	MÉTODO SIMPLIFICADO	PLAXIS	MÉTODO SIMPLIFICADO	PLAXIS
SEE_77	LICUA	LICUA	LICUA	LICUA
SEE_143		NO LICUA		LICUA
SEE_765		NO LICUA		LICUA
SEE_879		NO LICUA		LICUA
SEE_1050		NO LICUA		LICUA
SEE_1051		LICUA		LICUA
SEE_1108		LICUA		LICUA
SEE_1161		LICUA		LICUA
SEE_1165		LICUA		LICUA
SEE_3548		LICUA		LICUA

ID	ARENAS MEDIANAMENTE DENSAS		ARENAS SUELTAS	
	MÉTODO SIMPLIFICADO	PLAXIS	MÉTODO SIMPLIFICADO	PLAXIS
OBE_77	NO LICUA	NO LICUA	LICUA	NO LICUA
OBE_143		NO LICUA		NO LICUA
OBE_680		NO LICUA		LICUA
OBE_765		NO LICUA		NO LICUA
OBE_788		NO LICUA		NO LICUA
OBE_789		NO LICUA		NO LICUA
OBE_795		NO LICUA		LICUA
OBE_797		NO LICUA		NO LICUA
OBE_804		NO LICUA		NO LICUA
OBE_879		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1011		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1050		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1051		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1091		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1108		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1161		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1165		NO LICUA		NO LICUA
OBE_1256		NO LICUA		LICUA
OBE_1257		NO LICUA		LICUA
OBE_1432		NO LICUA		NO LICUA
OBE_3548		NO LICUA		NO LICUA

Tabla 4. Ocurrencia de licuación para los estratos de arenas sueltas y medianamente densas para sismos SEE (arriba) y OBE (abajo).

expresión de Olson y Stark (2003). Se utilizó para modelar la resistencia no drenada el modelo de SHANSEP (*Stress History and Normalized Soil Engineering Properties*) y la geometría original de la presa (sin deformar). Se obtuvo como resultado un factor de seguridad de 0,64, por lo cual se concluye que la presa fallará por flujo por licuación. Se muestran las deformaciones de corte en la Figura 7.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis del potencial de licuación por método empíricos, los estratos de arenas sueltas y medianamente densas licúan para el sismo de verificación (SEE, 0,89g), mientras que para el sismo básico de operación (OBE, 0,22g) licúan las arenas sueltas y las medianamente densas tienen un r_u elevado. Se realizó el análisis dinámico de la presa, luego del modelado estático de construcción de la misma, con registros de sismos de la base de datos del PEER, escalados a los espectros de los sismos de verificación (SEE) y básico de operación (OBE). Para los primeros, las arenas sueltas licúan siempre mientras que el estrato de arenas medianamente densas licúa en el 60% de los casos; para los sismos básicos de operación, el estrato de arenas medianamente densas no licúa y las arenas sueltas licúan sólo en algunos casos (20%). Esta es una diferencia marcada con el análisis por método

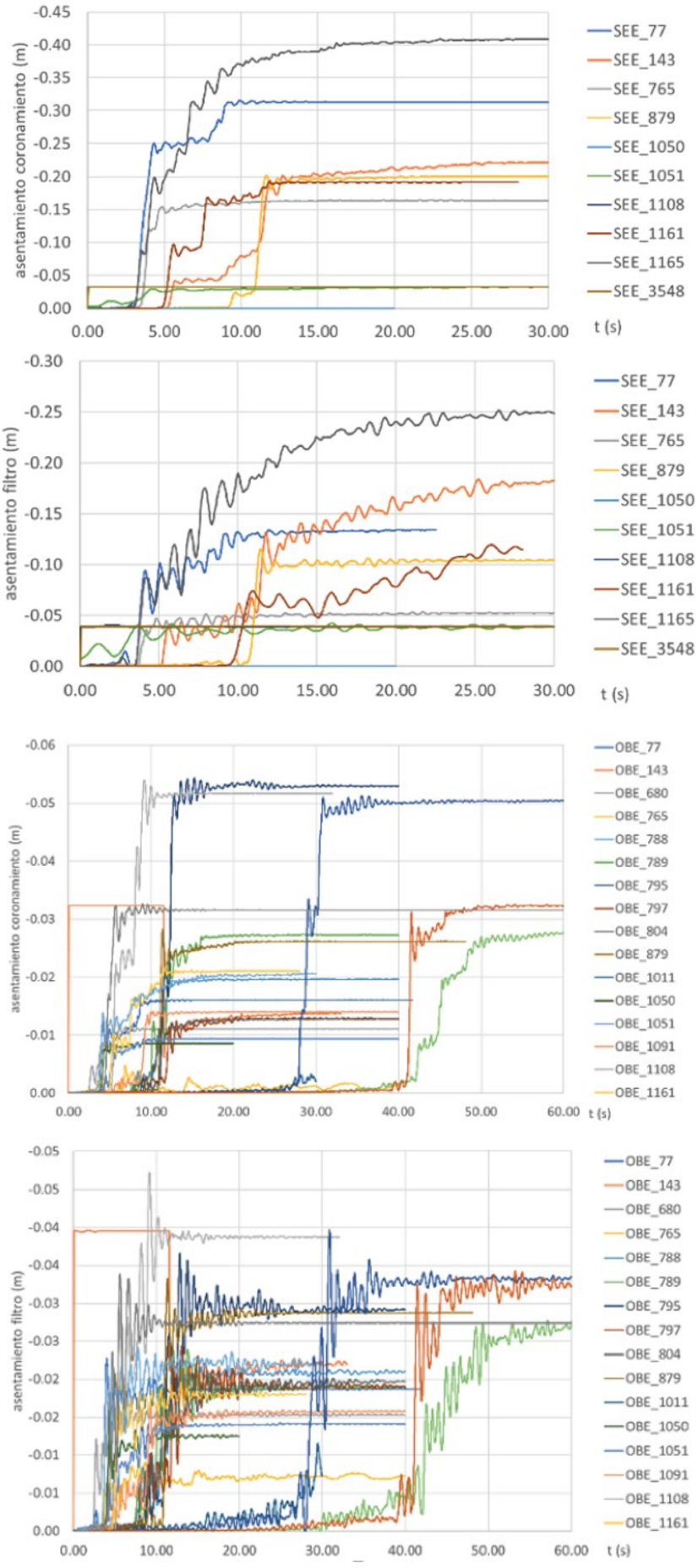


Fig. 5. Curvas de asentamientos de coronamiento y filtro para los sismos de verificación SEE (arriba) y de operación OBE (abajo).

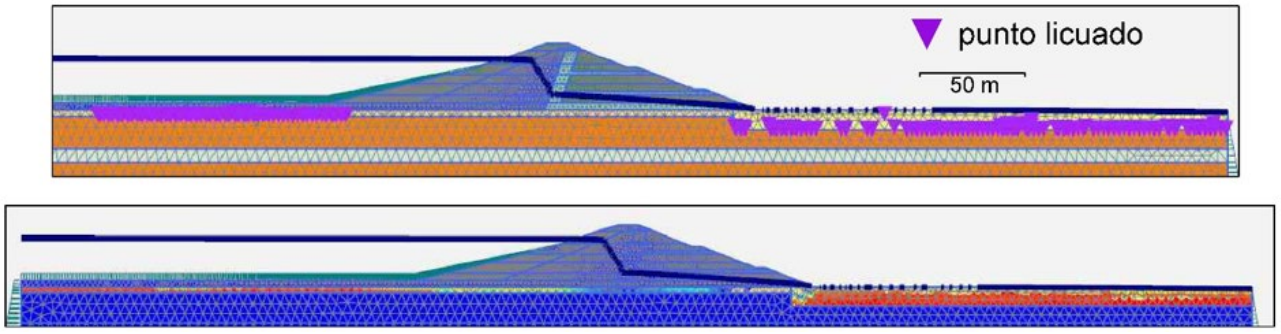


Fig. 6. Puntos licuados en violeta (arriba) y r_u (abajo; en rojo sectores con r_u>0,95) para el peor sismo.

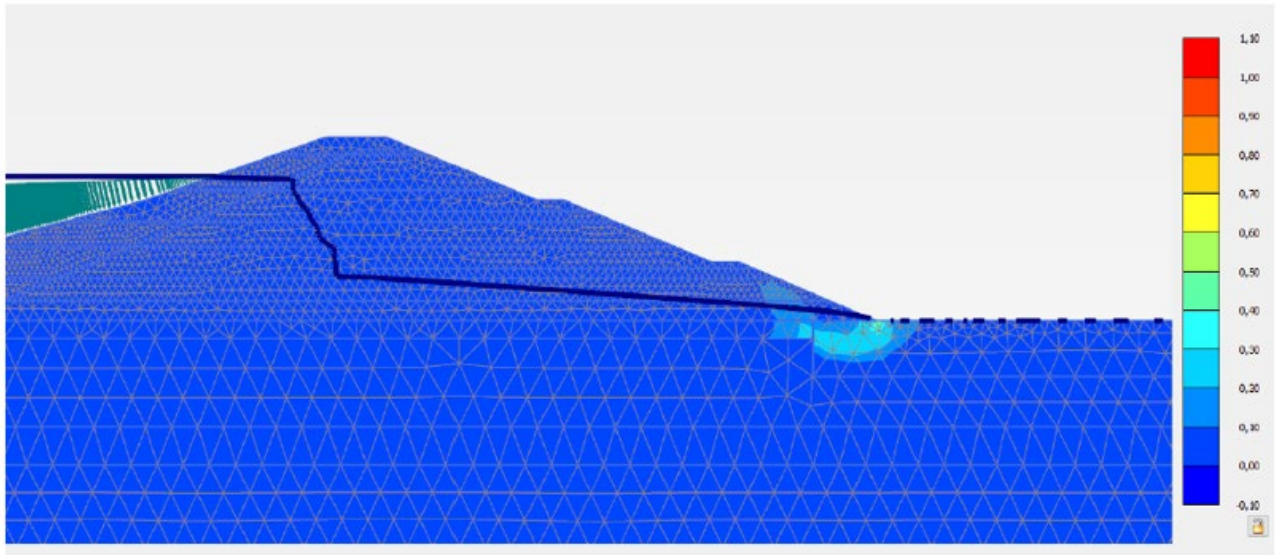


Fig. 7. Deformaciones de corte resultado del análisis de estabilidad estático post-licuación.

empíricos, para los cuales las arenas sueltas siempre licúan (SEE u OBE) y las medianamente densas licúan para el SEE. Utilizando la expresión de Olson y Stark (2003) para la resistencia no drenada post licuación, el factor de seguridad resultante del análisis de estabilidad es menor a 1 y se considera que la presa fallará por flujo por licuación.

REFERENCIAS

Boulanger, R. W. y Ziotopoulou, K. (2015). PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. *Center for Geotechnical Modeling Report No. UCD/CGM-15/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, Calif.*

Bray, J. D., Sancio, R. B., Riemer, M. y Durgunoglu, H. T. (2004). Liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Proc., 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*. Vol. 1. Stallion Press, Singapore, 655-662.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., y Bell, G. (2015). *Geotechnical engineering of dams*. CRC Press.

Idriss, I. M. y Boulanger, R. W. (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil dynamics and earthquake engineering* 26.2-4, 115-130.

Idriss, I. M. y Boulanger, R. W. (2010). SPT-based liquefaction triggering procedures. *Rep. UCD/CGM-10* 2 4-13.

Mitchell, J. K., Soga, K., y O'Sullivan, C. (2025). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons.

Olson, S. M. y Stark, T. D. (2003). Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and em-bankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129.8, 727-737.

Youd, T. L. e Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 127.4, 297-313.

CALENTAMIENTO GLOBAL ANTROPOGÉNICO, COMUNICACIÓN SOCIAL Y ESFUERZO DE COSTA RICA COMO "MODELO Y LÍDER MUNDIAL" CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Sergio Mora Castro[1], Gerardo J. Soto[2]
[1]ARX Consultores, San José, Costa Rica
[2]Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
Correo electrónico de contacto: smoracastro@consultarx.com

RESUMEN

El esfuerzo contra el calentamiento global antropogénico ha resultado vano, como lo evidencia la ausencia de resultados tangibles, pese a innumerables promesas y compromisos. El supuesto liderazgo ambiental de Costa Rica se percibe como un espejismo, pues destina múltiples recursos con beneficios limitados mientras desatiende el deterioro creciente de sus ríos, la gestión de los desechos sólidos, el uso de agroquímicos, el aumento de la mortalidad vial, congestión vehicular, inseguridad, narcoviolencia y la desinversión en salud, educación y energía firme. En 2024, las emisiones globales alcanzaron niveles récord; el G-20 es responsable del 80 %. La brecha entre promesas y acciones se amplía y no se vislumbra un cambio de tendencias a corto plazo. Las Conferencias de las Partes se han convertido en escenarios retóricos, sin resultados concretos. El Acuerdo de París se incumple; los países no reducen sus emisiones. La mitigación y adaptación no se integran a la gestión del riesgo y más bien se superponen y compiten por recursos y visibilidad. Si bien los informes confirman el calentamiento global, las proyecciones siguen siendo complejas y debatibles. La transición energética enfrenta retos tecnológicos y económicos; las energías renovables crecen, pero también la demanda; los combustibles fósiles continúan siendo la fuente principal de energía. Al mismo tiempo, los conflictos y tensiones bélicas incrementan las emisiones, menospreciando el esfuerzo de las naciones pequeñas. La comunicación social, esencial para transmitir información objetiva, está contaminada por sesgos que distorsionan la toma de decisiones.

Palabras clave: clima, emisiones, riesgo, comunicación.

ABSTRACT

Efforts to combat anthropogenic global warming have proven ineffective, with no tangible results despite numerous promises and commitments. Costa Rica's reputed environmental leadership appears increasingly illusory, since it allocates considerable resources with limited benefits, while neglecting the worsening state of its rivers, poor management of solid waste and agrochemical use, rising road fatalities, traffic congestion, insecurity, drug-related violence, and declining investments in health, education, and firm energy supply. Global emissions hit historic highs in 2024, with G-20 responsible for 80%. The gap between pledges and action is widening, and no reversal is expected soon. The Conferences of the Parties have devolved into rhetorical events lacking concrete outcomes. The Paris Agreement is being disregarded, as countries fail to reduce emissions. Mitigation and adaptation remain disconnected from risk management, while competing for resources and visibility. Scientific reports confirm global warming, yet projections remain complex and contested. Energy transition faces significant technological and economic hurdles; while renewable energy capacities expand, so do demand, and fossil fuels still dominate the global energy supply. Armed conflicts and geopolitical tensions are further driving up emissions, undermining the efforts of smaller nations. Effective public communication, critical to delivering accurate information, is undermined by pervasive biases that distort decision-making.

Keywords: climate, emissions, risk, communication.

INTRODUCCIÓN

La lucha contra el calentamiento global antropogénico (CGA) en Costa Rica ha sido en vano

El "liderazgo ambiental y climático" de Costa Rica pareciera ser solo una quimera (Mora, 2025). Aparte de su elevado costo, no produce beneficios más allá de la imagen turística de "paraíso verde", contradicha por el deterioro ambiental de sus ríos y rellenos sanitarios (basureros, en realidad), inacción para construir un sistema ferroviario eléctrico, negativa al uso del espacio subterráneo para mejorar la calidad verde de la superficie; no enfrenta el desafío de reducir los accidentes en carreteras (Figura 1), cuyo número de muertes, por millón de habitantes, se ha incrementado desde 126 en 2013 hasta 165 en 2024 (INEC). Lo mismo sucede con respecto al narcotráfico, sicariato, feminicidios, y el retraso de la inversión en educación, salud, agua potable, energía firme, econo-

mía circular, y la gestión del riesgo (GdR), del territorio, del ambiente y de los recursos naturales. En su lugar, se dedican esfuerzos y financiamiento de la cooperación internacional para participar en numerosas Conferencias de las Partes (COP). La solución de estos problemas ciertamente debería tener prioridad que las acciones ante el CGA, sobre todo al tomar en cuenta la cantidad de muertos y

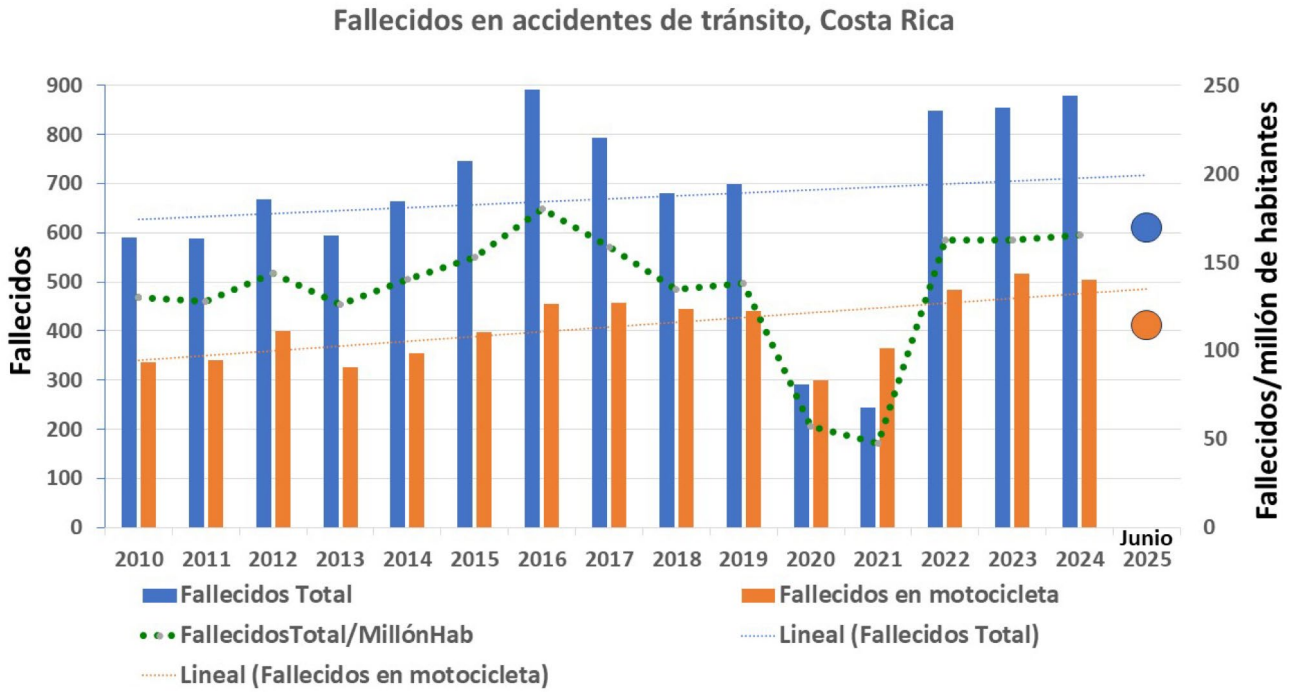


Figura 1. Fallecidos en accidentes de tránsito en Costa Rica. La reducción de los casos, entre 2020 y 2022 se debe a la reducción del tránsito vial durante la pandemia del COVID-19. (Elaboración propia del gráfico, con base en las fuentes de datos del Poder Judicial de Costa Rica (2024), Arrieta (2025) e INEC (s.f.).

las pérdidas económicas y sociales que ya se están produciendo y que no tienen relación con el clima, su variabilidad ni su cambio.

La emisión global de gases, vapores y partículas de efecto de invernadero (GVP-EI) alcanzó 57,6 $GtCO_2e$ (CO_2 equivalente) en 2024, 0,8 % más que en 2023 (Friedlingstein et al., 2025). El G-20 (66 % de la población mundial y 85 % del producto bruto global) causó el 80 %. Entonces, es previsible que la tendencia no cambie todavía, por lo que evitar el CGA de 1,5°C es ilusorio y esto es quizás una de la evidencias principales de que el Acuerdo de París (2015) no produce resultados; aunque los líderes mundiales prometen reducir la dependencia de los combustibles fósiles, los países no avanzan. De todas maneras, tómese en cuenta que, aunque se respetara el Acuerdo, la reducción de 3 a 11 % de las emisiones en 2030, no alcanzaría para sostener el CGA bajo 2 °C, e cual ya se sitúa a 1,2 °C sobre el nivel preindustrial (IPCC-AR6, 2023). De aquí se desprende el hecho de que las 8,87 $MtCO_2e$ anuales, emitidas por Costa Rica (Tabla 1), que representan solamente el 0,016 % de las emisiones globales, aunque parezca loable y racional reducirlas, pareciera más racional invertir sus escasos recursos en la solución de los problemas citados, lo cual, de manera colateral y de por sí, ayudaría a reducir notoriamente las emisiones (i. e., mejor uso del espacio subterráneo, mejorar las redes de

PAÍS	EMISIONES, 2024 ($MtonCO_2e$)		PAÍS	EMISIONES, 2024 ($MtonCO_2e$)
China	14.266,32		Costa Rica	8,87 (0,061% de China)
Estados Unidos	5.022,12		Guatemala	22,31
Unión Europea	3.601,17		Panamá	15,11
India	3.248,78		Honduras	11,24
Rusia	2.542,54		Nicaragua	5,97
Japón	1.094,70		El Salvador	8,98
Brasil	499,29		Belice	0,71
Invasión rusa a Ucrania (2022-24)	175,79 (7,18 veces las emisiones de Costa Rica en 2022-24: 24,47 $MtCO_2e$)		Total	73,19 (0,51% de China)

Tabla 1. Comparación de las emisiones, en millones de toneladas equivalentes de CO_2 entre varios países y la invasión rusa a Ucrania (Elaboración propia, a partir de los datos de: IPCC-AR6, 2023; IEA, et al., 2024; Buna et al., 2024; de Klerk et al., 2024; ECJRC, 2024)

transporte colectivo, tratamiento de desechos sólidos y líquidos, descontaminación de los ríos, mejorar la educación pública, etc.).

Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) y Conferencias de las Partes (COP)

Su propósito es desacelerar el CGA. La COP1 fue en Berlín (1995) y el Acuerdo de París surgió de la COP21 (2015). La COP29 se realizó en Bakú, Azerbaiyán, país rico en combustibles fósiles; su presidente, en el discurso inaugural dijo que "son una bendición divina, nutriente de la economía" (Mora, 2019). Luego vendrán la COP30, Belém, Brasil en 2025, y COP31, Australia y Pacífico, 2026.

La evidencia indica que las COP son ineficientes y aunque en ellas los países prometen alejarse de los combustibles fósiles, no se detecta la reducción de su consumo (UNEP, 2024). Las COP generan atención, pero solo sobre un tema específico, con gran costo financiero y distraído de las demás agendas. Por ello, es pertinente preguntar ¿qué hace y ofrece, y qué no, una COP? La respuesta no va mucho más allá de acuerdos, publicidad, cabildeo, intercambio de ideas entre convencidos y comités de aplauso mutuo (Mora, 2025b). De los 151 países comprometidos, menos de la mitad avanza en el cumplimiento de sus compromisos, y ninguno del G-20 (UNEP, 2024). Tampoco hay evidencias de que Costa Rica produzca resultados efectivos, y aunque predique su energía "limpia", el transporte se esencialmente de combustión interna; su carbono-neutralidad no es una meta realista ni práctica, pues de alcanzarla, la atmósfera y el clima ni se darán cuenta mientras el G-20 no modifique sus políticas energéticas (Mora, 2019). De todas maneras, aun si todos los países cumplieran sus compromisos, el control de la temperatura no se logrará sin abordar toda la problemática del CGA pues, aunque las energías "renovables" (i. e., eólica, solar) crecen, la demanda de electricidad aumenta y continúa induciendo un mayor consumo de combustibles fósiles.

MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN: DEBEN INTEGRARSE A LA GESTIÓN DEL RIESGO

La sociedad no está preparada para enfrentar las amenazas hidrometeorológicas a causa de la debilidad de las políticas de gestión del riesgo y ordenamiento territorial, claves para reducir la frecuencia y magnitud de los desastres (Mora, 2022). Los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS; ONU, 2023) integraron a los desastres y se reconoció a la GdR como el eje transversal. Para el cambio climático (CC) se creó el Objetivo 13 "Acción por el clima", divorciado de los otros y se designó a la CMCC como el foro para la respuesta mundial. Y existen dos definiciones de CC: i) La de CMCC, oficial de las COP, que incluye solo el causado por la influencia humana. ii) La del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) separa el componente natural del antropogénico.

Las COP pierden así alcances y conexiones bajo un mandato aislado, sin integrar otras preocupaciones y concentradas en acciones separadas que deberían ser subconjuntos de la GdR: a) Mitigación: Enfocada en utilizar menos combustibles, reducir emisiones y absorberlas restaurando ecosistemas, con fines similares al exitoso Convenio sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia (UE, 1981), contrastante con la ineficacia de las COP. b) Adaptación: Para acomodarse a los impactos negativos del CGA y beneficiarse de los positivos, i. e. construcción y reacondicionamiento de infraestructura para resistir inundaciones, sequías, vendavales y olas de calor.

Las limitaciones inherentes fundamentales giran alrededor de tres puntos clave: i) Haber separado la GdR de la mitigación y adaptación, un error estratégico grave, pues superpone y duplica acciones que deberían ser complementarias (Mora, 2012). ii) Atender solo al CGA deriva en separarlo de la variabilidad climática (VC). iii) El CGA es un síntoma de los problemas producidos por la actividad humana más que una causa de los desastres, engendrados más bien por la vulnerabilidad.

Bases científicas y comunicación de los resultados

Del Sexto Informe de Evaluación (IPCC-AR6, 2023) sobresalen las "declaraciones principales", lo que lee el público: El exceso de emisiones de GVP-EI causa el CGA; las emisiones mundiales aumentan por el consumo energético desmedido, los cambios de uso de la tierra, y las modalidades de la producción de bienes y servicios. Por ello, se registran cambios perceptibles en todo el globo, se alteran los procesos hidrometeorológicos y se generan impactos adversos, pérdidas y daños a las comunidades vulnerables, paradójicamente las que menos GVP-EI producen. Para cualquier nivel de calentamiento futuro los efectos serán más elevados que en la actualidad, interactuarán con amenazas no climáticas, generarán riesgos compuestos y en cascada, más complejos y difíciles de gestionar. Si bien algunos cambios serán inevitables e irreversibles, pueden limitarse mediante la reducción sostenida de los GVP-EI. Para asegurar un futuro habitable la ventana de oportunidades está abierta, pero se cierra rápidamente. La proyección respalda un rango de 2,5 a 4 °C para alrededor de 2100, según los modelos y escenarios de las trayectorias representativas de las concentraciones (RCP) y las proyecciones demográficas y económicas (SSP). Las conclusiones son las mismas: El planeta se calienta por influencia humana, es difícil desentrañar y separar los efectos de la VC del CGA y lo que pasará en el futuro; los efectos locales siguen siendo opacos. Por la naturaleza del CO2, si las emisiones cesaran inmediatamente, su influencia continuará durante décadas (IPCC-AR6, 2023). Si bien los modelos y escenarios termodinámicos, mediante los cuales los cuales se analizan e interpretan la evolución del clima y las respuestas de la atmósfera, océanos y continentes a las alteraciones y presencia de los GVP-EI, avanzan y mejoran constantemente, su complejidad y detalles, particularmente en las micro y meso-escalas, están lejos de esclarecerse (Shaw y Stevens; 2025).

No obstante, todos estos problemas, las realidades, tanto científicas como operativas y sobre todo la implantación de los procesos para resolverlos, están lejos de ser sencillos, particularmente de cara a las coyunturas geopolíticas, sociales, ambientales y económicas que, a todas luces, no parecen más que complicarse cada día que pasa.

REALIDADES ENERGÉTICAS Y EMISIONES: DEBEN SOLUCIONARSE MEDIANTE ACCIONES CREÍBLES

UNEP (2024) indicó que el G-20 no alcanzará sus Contribuciones Nacionales Determinadas, de todas maneras insuficientes para reducir sus emisiones (80 % de las 68 $GtCO_2e$ globales en 2030). Para limitar el CGA a 1,5 °C la emisión de GVP-EI deben reducirse en 45 %, pero para ello deben comenzar por cambiar su sistema energético, lo cual no es simple. La invasión rusa a Ucrania enfatizó la primacía de la energía "confiable y asequible" sobre la "limpia". La descarbonización en la Unión Europea seguirá a un ritmo moderado, con altibajos por su costo económico y las coyunturas. Las soluciones "renovables" no han sido contundentes pues carecen de métricas claras, rendimientos financieros competitivos y por su débil reducción neta de emisiones y desechos. Mientras tanto, los combustibles fósiles generan alrededor del 80 % de la energía mundial; las energías "renovables" (excluida la hidroeléctrica) solo 7,5 % (Energy Institute, 2024) y los beneficios tecnológicos y económicos de la generación eólica, solar, bombas de calor e hidrógeno no son claros.

Transición energética: ¿insuficiente, inadecuada?

El impulso al desarrollo y aumento demográfico aumentarán 50 % la demanda energética para mediados del siglo XXI, por cual la emisión de GVP-EI no disminuirá. Aunque aumenten las energías supuestamente "renovables", la demanda de electricidad, energía tracto-motriz y necesidades agropecuarias e industriales crecerán más todavía (Mora, 2025b). 1500 millones de personas del mundo desarrollado disponen de energía abundante y asequible, pero más de 1800 millones son pobres energéticamente, sin acceso a la electricidad para alumbrarse, refrigerar y cocer alimentos y deben recurrir a la leña y el estiércol, con el agravante de que el humo mata cerca de dos millones de personas al año, lo que podría resolverse con acceso transitorio al gas natural (Min, et al. 2024).

GUERRAS Y TENSIONES GEOPOLÍTICAS AUMENTAN; COSTA RICA INQUIETA POR SUS EMISIONES

No hay duda de que el militarismo y la actividad bélica están, actualmente, entre las mayores fuentes de emisiones de GVP-EI (Parkinson y Cottrel, 2022; Nath Bera, 2025). De acuerdo con estimaciones realizadas, hasta 2023 las emisiones militares, según los cálculos, varían entre 1,7 y 3,5 $GtCO_2e$, es decir, entre el 3,3 y 7 % del total mundial de las emisiones. Sin embargo, a partir de ese año, las tensiones y conflictos geopolíticos y militares se han multiplicado, en casos e intensidad, por lo que, definitivamente, estas cifras necesitarán ser actualizadas.

La invasión rusa a Ucrania, más allá de la tragedia humana, ha impactado la mitad de las áreas forestales ucranianas; más de $3{,}5x10^6$ ha fueron destruidas o están bajo ocupación. Casi 8 $MtCO_2e$/mes se envían a la atmósfera desde febrero de 2022, cerca del total anual de Costa Rica (Tabla 1). La actividad militar de los dos primeros años de invasión produjo más de 175 $MtCO_2e$ (Buna et al., 2024; de Klerk et al., 2024); mientras Costa Rica emitió, en total, alrededor de 255 $MtCO_2e$ entre 1751 y 2020. Los GVP-EI de los dos primeros años de invasión fueron mayores que las emisiones individuales anuales de 165 países (Global Carbon Project, 2021). Luego, en la reconstrucción, el impacto final dependerá de si utilizan técnicas y materiales tradicionales intensivos en carbono u otros métodos más modernos y sostenibles.

Los conflictos en Medio Oriente son todavía menos alentadores. Además del exorbitante número de muertes, más de 200 000 edificios (26 Mt de escombros) han sido arrasados en Gaza y más del 50 % de su cobertura forestal y cultivos ha sido destruida. Hasta junio de 2024 se generaron al menos 60 $MtCO_2e$ y otro tanto en el Líbano (Lakhani, 2024). La reconstrucción tendrá un costo de CO_2 mayor que las emisiones anuales individuales de 135 países. La huella de carbono de Hamas durante los primeros 120 días equivale a las anuales de 1454 hogares estadounidenses. Los 1.400 camiones que entregaron ayuda humanitaria a Gaza, desde Egipto, entre octubre 2023 y febrero 2024, generaron 9.000 tCO_2e. Otras $58x10^3$ tCO_2e provinieron de plantas eléctricas de diésel (25 % de la electricidad en Gaza provenía de paneles solares) (Otu-Larbi, et al., 2024). La huella militar del carbono israelí en 2023, sin considerar esta guerra, fue de 3,85 $MtCO_2e$, en 2022, el doble de las emisiones de Bahamas. La construcción de 500 km de túneles en Gaza para trasladar y ocultar suministros, armas, combatientes y rehenes generó cerca de 480 $ktCO_2e$, más que la isla Santa Lucía en 2022. La construcción del muro de Israel, 65 km a lo largo de la frontera con Gaza emitió cerca de 313 $ktCO_2e$, más que Tonga. Si se agregan las emisiones pre y postconflicto, el total de las emisiones, contabilizadas hasta febrero de 2024, podría alcanzar alrededor de 61,5 $MtCO_2e$ (Otu-Larbi, et al., 2024), aunque una parte considerable del transporte bélico, incendios, emisiones militares previas, ni las emisiones de la guerra Israel-Irán, no han sido contabilizadas aún (Mora, 2025a).

Tampoco se han estimado las emisiones derivadas de las tensiones geopolíticas y premilitares en otras partes del mundo (i. e., Congo-Ruanda, Tailandia-Camboya, Colombia-Perú), ni las de los conflictos sociales y políticos en Haití, Cuba, Bolivia, Nicaragua, Venezuela, Ecuador, etc. Tanto esfuerzo realizado por los países pequeños, para que ahora sean las guerras y conflictos geopolíticos los que definan las pautas de las emisiones GVP-EI. Un sinsentido, sin duda, que solo beneficia a la industria armamentista del "primer mundo", y menosprecia los esfuerzos de muchos países pequeños por alcanzar niveles aceptables de emisiones.

SESGOS DE LA COMUNICACIÓN SOCIAL

Los acuerdos y declaraciones de las 29 COP, con pocas excepciones, han sido prácticamente inútiles para controlar los GVP-EI.

Los resultados de las investigaciones científicas están plasmados en seis extensos informes (IPCC-AR6, 2023); lo más resonante y cuestionable es su incapacidad de estimular la solución del desafío de la energía "limpia" a causa de la ausencia de una estrategia integral de comunicación social, indispensable para aclarar la situación del conocimiento (Mora, 2025) y las ventajas de la gestión del riesgo, ordenamiento territorial, protección financiera a través de instrumentos de retención-transferencia, la gestión proactiva de emergencias y desastres, y su integración a las iniciativas locales (Bermúdez, 1994). Con dramatismo y grandilocuencia, las COP se autocalifican como "la última oportunidad para salvar al planeta", y las afirmaciones alarmistas y catastrofistas ponen en relieve la cobertura mercantilista y sesgada de los medios de comunicación (Kelman, 2024).

Sin estrategia informativa transparente y efectiva, no hay gestión del riesgo

De los avances del conocimiento, resumidos en IPCC-AR6 (2023) persisten varias incógnitas: i) No se detecta la gestación adicional de ciclones tropicales en el último siglo (Klotzbach et al., 2022); ii) el casquete glaciar de Groenlandia no se reduce más rápido hoy que hace ochenta años; iii) El impacto neto del CGA es una fracción de la vulnerabilidad ante la VC (Mora, 2022). La transferencia de la información entre la investigación científica, la literatura interpretativa, los resúmenes gubernamentales y la cobertura mediática, posee márgenes amplios de error y distorsión, a medida que los datos pasan por filtros y empaquetamientos dirigidos a audiencias específicas (Mora, 2025b). El público y los tomadores de decisiones políticas están obligados a confiar en la información transmitida por medios y redes sociales (Bermúdez, 1995); pocas personas leen informes científicos, pues los datos y análisis son impenetrables para los no expertos y su redacción no es accesible ni atractiva para la lectura de la población. Gracias a las confusiones, algunos medios llenan su espacio con predicciones erróneas, antojadizas o trastocadas de las reales en los informes científicos, con frecuencia reflejadas por personajes célebres que se expresan sin control, lo que les ganan adeptos, aunque sea con ideas erradas (Bell, 2013).

CONCLUSIONES Y ACCIONES RECOMENDABLES: VENCER OBSTÁCULOS EN LA ACCIÓN CLIMÁTICA

La lucha contra el calentamiento global antropogénico puede fracasar, y la reputación "verde" de Costa Rica no es la excepción. Mientras sus ríos se degradan, la basura se acumula, aumentan las muertes en carretera y se reduce la inversión en salud, educación y energía firme, el país destina recursos a victorias simbólicas.

En el mundo, el panorama es aún peor. En 2024 las emisiones alcanzaron récords históricos, con el G-20 responsable del 80%. El Acuerdo de París se incumple, las cumbres de la COP se han convertido en ejercicios retóricos y la brecha entre promesas y acción se agranda cada vez más. La mitigación y la adaptación siguen tratándose como rivales, no como herramientas para una gestión del riesgo coherente.

La transición energética avanza a tropezones. Las energías renovables crecen, pero la demanda lo hace aún más rápidamente y los combustibles fósiles siguen reinando. Las guerras y tensiones geopolíticas inyectan más carbono a la atmósfera, lo cual borra los logros de las naciones pequeñas. Mientras tanto, el discurso público se contamina con sesgos y verdades a medias (Mora, 2025b).

Las naciones pequeñas deben equilibrar su visión entre la acción climática y sus necesidades de desarrollo prioritarias. Por ello, las COP deben reformarse para ser eficaces, sus acuerdos deben ser vinculantes, con indicadores y medios de verificación objetivos.

Dado que el panorama es pesimista, los beneficios de la acción climática deben potenciarse para apalancar a las comunidades locales, el sector privado, las empresas multinacionales y gobiernos. Para ello, los innovadores tecnológicos deben optimizar las tecnologías para reducir y capturar emisiones mediante la aplicación de eco y geoingenierías, en particular las encaminadas, por ejemplo, a la captura del CO_2 a través de trampas rocosas, lo cual podría desarrollarse en los países en desarrollo con el apoyo de los países desarrollados (i.e., "carbon dioxide removal" -CDR-; Reiners, 2025). Las estrategias y políticas económicas deben ser prioridad para apoyar los países en desarrollo durante la transición energética, mediante financiamiento, transferencia de tecnología y creación de capacidades.

Los modelos deben cerrar la brecha entre ciencia climática y la comunicación social, contrarrestar el negacionismo, el catastrofismo y la desinformación.

Los esfuerzos diplomáticos deberán lograr acuerdos sobre control de armas, prevención de conflictos geopolíticos y militares y, eventualmente, sancionar de manera efectiva a los países que vulneren las reglas; mientras que la recuperación ambiental debe reconstruir sostenibleMente.

La gestión del riesgo no es un costo, sino una inversión; de tal manera, es imperativo proteger las poblaciones vulnerables y las generaciones futuras, pues los desafíos del CGA son severos, mas no insuperables.

La integración de la acción climática con estrategias socioeconómicas obliga a que los grandes emisores rindan cuentas y no transfieran los costos a los pequeños emisores. El tiempo de gestos simbólicos ya pasó. En 2025, los países presentarán sus objetivos actualizados para reducir emisiones, ojalá realistas y con metas concretas de cumplimiento. Si el G-20 no acepta su responsabilidad ni reduce sus emisiones, el esfuerzo será en vano, puesto que sus emisiones exceden muchas veces las de los países menores en territorio, población y desarrollo, y que no deberían asumir el costo tecnológico, social, económico y ambiental en detrimento de su desarrollo.

Los esfuerzos unilaterales de Costa Rica, como un caso específico de un emisor menor (muy pequeño, en realidad) han sido ambiguos, y muy poco claros según sus prioridades ambientales y sociales. Para reducir sus escasas emisiones, sin mucho éxito,

ha sacrificado otras prioridades apremiantes para su desarrollo. No tiene sentido, por ejemplo, desaprovechar sus yacimientos de gas natural (Mora y López, 2023) aduciendo que aumentaría las emisiones perjudiciales para el planeta y dañaría su imagen verde, mientras que sus opciones energéticas son restringidas, los aportes de las energías eólica y solar son limitados, es casi legalmente imposible aprovechar la geotermia de alta entalpía (las fuentes volcánicas principales se ubican dentro o en la periferia inmediata de parques nacionales) y la hidroelectricidad ha sido prácticamente satanizada por grupos con intereses poco realistas.

Deben aprovecharse e impulsarse las iniciativas de manera inclusiva. Por ejemplo, recientemente, en 2024, surgió la iniciativa del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica para producir un "Código Costarricense de Adaptación al Cambio Climático" (CFIA, 2024), el cual agrupa también a otras instituciones, como el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y ONU-Hábitat. El proyecto es financiado con recursos propios y del Fondo Verde del Clima (FVC). El código se enfocará en tres sectores de infraestructura críticos: agua y saneamiento, infraestructura vial y vivienda, mientras que su objetivo principal será brindar criterios que permitan mejorar la capacidad de adaptación de la infraestructura, con el fin de aumentar la resiliencia de las comunidades. La iniciativa resulta notoria y promisoria, en tanto no se quede solamente en promesas, y será solamente eficaz si se entronca como una solución holística que incorpore todos los problemas prioritarios periféricos al CGA y en consonancia con las iniciativas internacionales efectivas.

La gestión del riesgo, por definición, debe ser "integral", por lo que las acciones deben incluir todas las amenazas naturales y antropogénicas y el CGA es un componente ineludible. Una parte de esa tarea es la que ha inspirado la generación de una Guía Metodológica para integrar el análisis del riesgo en proyectos de infraestructura vial (Mora, et al. 2024), cuyo propósito es iniciar, de manera inductiva y progresiva, la incorporación de los elementos del riesgo y su gestión en los proyectos de inversión para el desarrollo. Una parte considerable del procedimiento incorpora el análisis de la problemática y las soluciones para enfrentar el CGA.

REFERENCIAS

Arrieta, E. (2025). Costa Rica viaja "a gran velocidad" para que 2025 sea el año con más muertes en carretera. La República. 4 de agosto de 2025. https://www.larepublica.net/noticia/costa-rica-viaja-a-gran-velocidad-para-que-2025-sea-el-ano-con-mas-muertes-en-carretera

Bell, L. (2013). In Their Own Words Climate Alarmists Debunk Science. Forbes. https://www.forbes.com/sites/larrybell/2013/02/05/in-their-own-words-climate-alarmists-debunk-their-science/.

Bermúdez, M. (1994). Vulnerabilidad social y organización ante los desastres naturales en Costa Rica. En Desenredando. https://www.desenredando.org/public/libros/1994/ver/html/3cap5.htm

Bermúdez, M. (1995). Desastres naturales en la prensa escrita de Costa Rica. Escuela de la Comunicación Colectiva. Universidad de Costa Rica. Informe inédito. 13pp. http://cidbimena.bvs.hn/docum/crid/Riesgo/pdf/spa/doc1000/doc1000-contenido.pdf

Buna, R., Marland, G., Odad, T., Seeg,L; Puliafitoh,E., Nahorskij, Z., Jonasg, M., Kovalyshynl, V., Ialon-gom, I., Yashchuna, O. y Romanchuka, Z. (2024). Tracking unaccounted greenhouse gas emissions due to the war in Ukraine since 2022. *Science of the Total Environment. 914* (March 2024). . https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724000135

CFIA (2024). Nuevo Código de Cambio Climático. *Revista CFIA,* https://revista.cfia.or.cr/nuevo-codigo-de-cambio-climatico/, consultado el 3 de agosto del 2025.

de Klerk et al. (2024). *Climate damage caused by Russia's war in Ukraine 23 Feb. 2022–23 Feb*. 2024. Ministry of Environmental Protection & Natural Resources, Ukraine. Initiative GHG. https://en.ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/Climate-Damage-Caused-by-War-24-months-EN.pdf

Energy Institute. (2025). *Insights by Source. 2024 Key highlights.* Energy Developments. https://www.energyinst.org/statistical-review/insights-by-source. Recuperado 6 de febrero del 2025.

ECJRC., European Commission, Joint Research Centre, Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W.E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E. y Pekar, F., (2024). *GHG emissions of all world countries*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897; JRC138862.

Friedlingstein, P. et al. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data, 17* (3), 965–1039. https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025

Global Carbon Project. (2021). *Cumulative CO_2 Emissions by Country, 1750-2020* (fossil fuels and cement). Our World in Data. https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fucs-documents.s3.amazonaws.com%2Fglobal-warming%2F1.%2BCumulative%2BEmissions%2B1750-2020.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

IEA, Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M. et al. (2025). *GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, 2024*. https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897

INEC-Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Costa Rica. (s.f.). Estadísticas de población https://inec.cr/tematicas

IPCC-AR6. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report.* Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Kelman, I. (2024). *Last Chance Climate Change COP (Again)*. Medium, UCL Public Policy. https://policypostings.medium.com/last-chance-climate-change-cop-again-08926cc4da8c.

Klotzbach. P.J., Wood, K.M., Schreck III, C.J., Patricola, C.M. y Bell, M.M., (2022). Trends in Global Tropical Cyclone Activity: 1990-2021. *Geophysical Research Letters, 49* (6). https://doi.org/10.1029/2021GL095774

Lakhani, N. (2024). Repairing Israel's destruction of Gaza will come at huge climate cost. *The Guardian*. https://www.theguardian.com/world/article/2024/jun/06/rebuilding-gaza-climate-cost. Recuperado el 6 de febrero del 2025.

Min, B; O'Keeffe, Z; Abidoye, B; Mensan Gaba, K; Monroe, T; Stewart, B; Baugh, K; Sanchez-Andrade, B. (2024). Lost in the Dark: A Survey of Energy Poverty from Space. Joule, 1982–1998. July 17, 2024 Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.05.001

Mora, S. (2012). Gestión del riesgo para enfrentar mitos y realidades del calentamiento global antropogénico. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 28*, 111-125. https://doi.org/10.59069/7fffg206.

Mora, S. (2019). Plan Nacional de descarbonización. *Teclado abierto. Delfino.cr*. https://delfino.cr/2019/09/sobre-el-plan-nacional-de-descarbonizacion. Recuperado el 6 de febrero del 2025.

Mora, S. (2022). Análisis del riesgo, amenaza de la inestabilidad de laderas bajo influencia del calentamiento global antropogénico: enfoque metodológico. *Revista Geológica de América Central. 66*(1):1-25. DOI: 10.15517/rgac.v0i66.49999

Mora, S. (2025a). Costa Rica preocupada por sus emisiones y mientras tanto, las guerras... *Teclado abierto. Delfino.cr.* https://delfino.cr/2025/02/costa-rica-preocupada-por-sus-emisiones-y-mientras-tanto-las-guerras. Recuperado el 11 Feb, 2025

Mora, S. (2025b). Comunicación social y calentamiento global antropogénico. *Teclado Abierto. Delfino.cr.* https://delfino.cr/2025/02/comunicacion-social-y-calentamiento-global-antropogenico. Recuperado el 6 de marzo del 2025.

Mora, S. y López, A. (2023). El gas natural: ¿Es conveniente y económica y ambientalmente para Costa Rica? *Teclado Abierto. Delfino.cr.* https://delfino.cr/2023/05/el-gas-natural-es-conveniente-economica-y-ambientalmente-para-costa-rica. Recuperado el 6 de febrero del 2025.

Mora, S; Miranda, P; Soto, GJ; Porras, J; Ruiz, P; Jiménez, O. 2024. *Guía metodológica para la integrar el análisis del riesgo en proyectos de infraestructura vial. Enfoque holístico sostenible.* Decreto 42465, incorporación de medidas de resiliencia en la infraestructura. SismoConsultores, S.A; Acción PROYECTIVA (Plan de Acción País, EUROCLIMA+ en Costa Rica). Volumen 1, Guía Metodológica: https://www.researchgate.net/publication/388962968_Guia_metodologica_para_la_integracion_del_analisis_del_riesgo_en_los_proyectos_de_infraestructura_publica_vial#fullTextFileContent. Volumen 2, Estudio del caso piloto; Ruta Nacional 32: https://www.researchgate.net/publication/388960397_Aplicacion_para_la_valoracion_del_riesgo_ante_amenazas_multiples_en_proyectos_de_infraestructura_caso_Ruta_Nacional_32_Costa_Rica_2024#fullTextFileContent

Otu-Larbi, F., Neimark, B., Bigger, P., F. y Larbi, R. (2024). *A Multitemporal Snapshot of Greenhouse Gas Emissions from the Israel-Gaza Conflict.* School of Business and Management, Queen Mary University of London, UK. (pre-print; June 06, 2024). SSRN: https://ssrn.com/abstract=4855947 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4855947

Nath Bera, M. (2025). Militarism: *A Leading Cause of Environmental and Climate Crises. 28 de abril, 2025.* International Union of Scientists. https://www.iuscientists.org/militarism-and-climate-crises/

ONU. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.* Organización de las Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*1woraez*_ga*NjMxNDA5NjA0LjE3ND-Y5MDA4MTk.*_ga_TK9BQL5X7Z*czE3NTEzODgzNzgkbzIkZzEkdDE3NTEzODgzOTIkajQ2JGwwJGgw; ISBN: 978-92-1-002493-8; ISSN: 2521-6902

Parkinson, S., Cottrell, L. (2022). *Estimating the Military's Global Greenhouse Gas Emissions. Scientists for Global Responsibility (SGR) with, Conflict and Environment Observatory (CEOBS).* ISBN: 978-1-8383986-1-3; https://ceobs.org/projects/military-emissions/

Poder Judicial (2024). Muertes por accidentes de tránsito en Costa Rica. *Anuario de estadísticas policiales. Dirección de Planificación.* https://sistemaplanificacion.poder-judicial.go.cr/php/estadistica_ju_po/Muertes_en_accidentes_de_tr%C3%A1nsito_2023_-_An%C3%A1lisis2024-10-25_13-57-32.pdf

Reiners, P. (2025), Real climate solutions are beneath us. *Eos, 106*, https://doi.org/10.1029/2025EO250168

Shaw, T., Stevens, B. (2025). The other climate crisis. *Nature*. 639, 877–887 (2025). https://doi.org/10.1038/s41586-025-08680-1

UE. (1981). Convenio de Ginebra sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia. Unión Europea. Documento 21979A1113(01). *Diario Oficial n° L 171 de 27/06/1981* p. 0013–0024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:21979A1113(01)

UNEP-United Nations Environment Programme (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments.* Nairobi. https://doi.org/10.59117/20.500. 11822/46404

EL IMPACTO DE LA ACCIÓN ANTRÓPICA EN EL YACIMIENTO PALEONTOLÓGICO DE LA FORMACIÓN LAS AGUADITAS. CORDÓN DE LOS BLANQUITOS, PRECORDILLERA CENTRAL

Dinia Schmitter De Salvo[1], Laura I. León[1] y Ana Paula Forte[1,2]

[1]Instituto de Geología Emiliano Aparicio (INGEO), FCEFN, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina. Ignacio de la Roza 590 Oeste, Rivadavia, San Juan, Argentina.

[2]CONICET Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ingeniería (UNSJ), Av. Libertador Gral. San Martín 1109, San Juan, Argentina.

Mail de contacto: diniaschmitter@gmail.com

RESUMEN

La Formación Las Aguaditas aflora en el flanco oriental del Cordón de Los Blanquitos al sudoeste de la localidad de Jáchal, con un espesor aproximado de 260 m en su sección tipo. Consiste en una sucesión de bancos carbonáticos y margosos tabulares, de colores oscuros y tonalidades amarillentas en superficies meteorizadas, con intercalaciones de conglomerados y brechas intraformacionales en su sección superior y niveles pelíticos en su parte inferior. El registro fosilífero está caracterizado por la presencia de graptolitos perteneciente a la parte alta de la Zona de Paraglossograptus tentaculatus y la Zona de Nemagraptus gracilis (Ordovícico Medio y Superior), conodontes de la Zona de Pygodus anserinus del Sandbiano temprano y trazas fósiles. Estas rocas son utilizadas como "lajas" para revestimiento en hogares, lo que conlleva a un proceso de destrucción en estos ámbitos geológicos y paleontológicos.
La acción del hombre en espacios que encierran registros patrimoniales paleontológicos de gran relevancia, plantea la necesidad de comprender las consecuencias de la escasa planificación y gestión de estos espacios naturales que incluyen: pérdida de información acerca del registro fósil, dificultad de obtener datos para futuras investigaciones por el deterioro o extracción de material fosilífero e impacto directo en la educación y divulgación de la paleontología. Debido a que las planchas fosilíferas, han sido removidas del espacio original como consecuencia de la actividad humana, se plantea el conflicto entre ciencia y desarrollo económico, demostrando que existe la necesidad de establecer mecanismos de protección del patrimonio paleontológico y geológico. Éstos deben realizarse respetando las vías legales para su reconocimiento y la sensibilización de la importancia del registro paleontológico a fin de establecer en la comunidad la importancia de estos yacimientos observando que es insustituible cuando se deteriora o elimina al retirar una pieza de su espacio natural.

Palabras clave: Las Aguaditas, paleontología, patrimonio

ABSTRACT

The Las Aguaditas Formation outcrops on the eastern flank of the Cordón de Los Blanquitos, southwest of the town of Jáchal, with an approximate thickness of 260 m in its type section. It consists of a succession of dark-colored, yellowish-toned tabular carbonate and marl beds on weathered surfaces, with intercalations of conglomerates and intraformational breccias in its upper section and pelitic levels in its lower part. The fossil record is characterized by the presence of graptolites belonging to the upper part of the Paraglossograptus tentaculatus Zone and the Nemagraptus gracilis Zone (Middle and Upper Ordovician), conodonts from the Pygodus anserinus Zone of the early Sandbian, and trace fossils. These rocks are utilized as "slabs" for cladding in homes, leading to a process of destruction in these geological and paleontological contexts. Human activity in areas that contain paleontological heritage records of great relevance raises the need to understand the consequences of the inadequate planning and management of these natural spaces, which include: loss of information regarding the fossil record, difficulty in obtaining data for future research due to deterioration or extraction of fossil material, and direct impact on the education and dissemination of paleontology. As the fossil slabs have been removed from their original space due to human activity, a conflict between science and economic development arises, demonstrating the necessity to establish mechanisms for the protection of paleontological and geological heritage. These must be carried out by respecting legal avenues for their recognition and raising awareness of the importance of the paleontological record to highlight to the community the significance of these deposits, noting that they are irreplaceable when deteriorated or removed from their natural setting.

Keywords: Las Aguaditas, paleontology, heritage

INTRODUCCIÓN

La Formación Las Aguaditas fue formalmente definida por Baldis et al. (1982) en la quebrada epónima, al suroeste de la ciudad de Jáchal, si bien en el área existían estudios previos como los de Jelin (1970), De Ormachea (1972) y Baldis y Blasco (1974). Esta unidad aflora en el flanco oriental del Cordón de Los Blanquitos al sudoeste de la localidad de Jáchal, con un espesor aproximado de 300 m en su sección tipo en la Quebrada de Las Aguaditas. En general consiste de bancos carbonáticos y margosos de ambiente de talud, con intercalaciones de conglomerados y brechas intraformacionales en su sección superior. La sucesión se ubica sobre la Formación San Juan en paraconcordancia, mediando entre ambas unidades, una superficie costrificada (*hardground*), mientras que su límite superior está representado por una discordancia erosiva que la separa de la Formación La Chilca (Astini, 1997). Se diferenciaron tres ciclos sedimentarios vinculados a fluctuaciones del nivel del mar en esta unidad (Astini, 1997). Brussa (1996; 1997) describió una fauna de graptolitos en la Formación Las Aguaditas, perteneciente a la parte alta de la Zona de *Paraglossograptus tentaculatus* y la Zona de *Nemagraptus gracilis* (Ordovícico Medio y Superior). Recientemente estudios bioestratigráficos de detalle fueron desarrollaros por Serra et al. (2017) y Feltes et al. (2016), estos últimos, registraron conodontes del Darriwiliano medio al Sandbiano bajo, además verificaron una edad darriwiliana media para el contacto entre las formaciones San Juan y Las Aguaditas en su sección tipo. La Formación Las Aguaditas fue también identificada en el perfil río de Las Chacritas (Peralta et al., 1999), donde yace en paraconcordancia sobre la Formación Las Chacritas (Darriwiliano medio). En dicha área, Serra et al. (2015; 2017) describieron graptolitos de la Zona de *Nemagraptus gracilis* y conodontes de la Zona de *Pygodus anserinus* del Sandbiano temprano.

Durante campañas de estudio orientadas al análisis bioestratigráfico e icnológico de la Formación Las Aguaditas, se detectó un deterioro notable del registro fósil, atribuible a la intervención humana en la zona. En particular, la remoción y extracción de lajas fosilíferas para su uso como revestimiento ornamental ha comprometido severamente la preservación de estructuras biogénicas, impidiendo la obtención de datos clave para la interpretación paleoambiental y bioestratigráfica.

Este trabajo se propone reflexionar sobre el impacto de las acciones humanas en un sitio de relevancia geológica y paleontológica, subrayando la necesidad de preservar el patrimonio natural de la región. A partir del caso del yacimiento de la Formación Las Aguaditas, se plantea la importancia de generar conciencia social y políticas de protección efectiva, que integren el conocimiento científico con las realidades y necesidades de las comunidades locales, en un marco de diálogo e inclusividad para una genuina conciencia patrimonial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el desarrollo de un proyecto de investigación realizado en la zona, se muestreó para palentología y la extracción de los ejemplares permitió el hallazgo de cuatro nuevos niveles fosilíferos, los cuáles fueron evaluados en gabinete y permitieron identificar lo siguiente: en el miembro inferior se identificaron dos niveles: 1) a unos cm de la base de la Formación Las Aguaditas, con fósiles pobremente preservados y sin posibilidades de identificación y 2) a 30 metros de la base con acumulaciones monoespecíficas de Holmograptus bovis, forma común del Darriwiliano Medio. Durante el muestreo paleontológico en el miembro superior se pudo diferenciar cuatro niveles fosilíferos: 1)“parte alta de la sección superior”: Pseudoclimacograptus scharenbergi, Dicellograptus sp., Dicranograptus sp., Orthograptus sp., climacográptidos, ramas indeterminadas y braquiópodos, 2) “pelitas de la sección media de quebrada”: Dicranograptus nicholsoni, Dicellograptus sp., Pseudoclimacograptus? sp., Orthograptus sp., Glossograptus? sp., y climacográptidos indeterminados, 3) “quebrada arriba”: Orthograptus sp., Dicellograptus sp., Normalograptus sp., Dicranograptus sp. y climacográptidos indeterminados 4) Pseudoclimacograptus scharenbergi, Orthograptus? sp., Dicellograptus sp. climacográptidos indeterminados y conodontes en planos de estratificación.

Sin embargo, a partir de las salidas de campo y el análisis de imágenes satelitales en la zona de estudio se pudo advertir el impacto antrópico sobre los yacimientos paleontológicos y sus fósiles considerados registros del pasado de la vida en la Tierra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los muestreos realizados en los niveles basales de la formación no fueron aceptables debido a que no cumplían con las condiciones necesarias de conservación para su tratamiento en laboratorio, entendiendo que son las lajas o rocas utilizadas para revestir muros particulares. Los motivos que llevaron a los resultados, basados en la escasa preservación de las muestras, llevan a la reflexión sobre la necesidad de difundir, preservar y conservar el patrimonio paleontológico en un territorio para evitar su deterioro o pérdida.

La discusión se centra en el dilema de discernir la relevancia de lo que un sector del territorio revela sobre su pasado, en comparación con la explotación de un espacio natural que proporciona sustento económico a la localidad.

CONCLUSIONES

Al advertir las consecuencias de la intervención antrópica sobre estos registros paleontológicos que han sido desplazados de su ubicación original, surgen tensiones entre la ciencia y el desarrollo económico de las comunidades locales. En respuesta a esta problemática, la Ley 6801, promulgada en 1997, declara de "interés provincial implementar la protección, conservación, restauración, enriquecimiento y difusión de todos los bienes que conforman el Patrimonio Cultural y Natural de la Provincia de San Juan". Así, se requiere la identificación de áreas que contengan registros paleontológicos que deban ser protegidos, con la finalidad de ser preservados como testimonios para el conocimiento y desarrollo cultural de las futuras generaciones.

Es fundamental fomentar la sensibilización sobre el valor para que la comunidad comprenda que son insustituibles y se deterioran o desaparecen al extraer una pieza de su contexto natural. Además, es esencial capacitar a las personas para que puedan identificar espacios paleontológicos que contengan fósiles, vinculando este conocimiento al desarrollo local sostenible.

En conclusión, el estudio evidencia cómo la acción humana sobre estos espacios naturales, en ausencia de planificación y protección efectiva, genera tensiones entre el aprovechamiento económico y la conservación del conocimiento geológico-paleontológico. Frente a esta realidad, se considera fundamental iniciar procesos de diálogo con las comunidades locales, reconociendo sus necesidades y saberes, para promover conjuntamente una conciencia patrimonial. De este modo, la conservación del patrimonio no se impone desde afuera, sino que se construye colectivamente como un valor compartido, vinculado al desarrollo sostenible y al cuidado del territorio.





Figura 1 y 2: Fotografías del área de estudio donde se puede observar las rocas removidas co-mo consecuencia de la actividad humana

AGRADECIMIENTOS

El financiamiento para el desarrollo de la investigación fue mediante el proyecto de investigación E 1158 aprobado en la Convocatoria de proyectos CICITCA 2020-2021.

Los autores agradecen la colaboración de recursos materiales técnicos y humanos aportados en diversas instancias por la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNSJ).

REFERENCIAS

Astini, R.A. 1997. Las unidades calcáreas del Ordovícico Medio y Superior de la Precordillera Argentina como indicadores de una etapa extensional. In Jornadas de Geología de Precordillera No. 2, Actas 8-14. San Juan.

Baldis, B.A., Beresi, M. 1982. Fauna y ambiente en los sedimentos carbonáticos arenigianos de Talacasto, San Juan, Argentina. Actas VIII Congreso Geológico Argentino, 2, 399–417. San: Luis.

Baldis, B.A.; Blasco, G. 1974. Trilobites ordovícicos de la comarca de Jáchal, Precordillera Argentina. I. Telephinidae. Ameghiniana 11: 71-87.

Brussa, E.D. 1996. Las graptofaunas ordovícicas de la Formación Las Aguaditas, Precordillera de San Juan, Argentina. Parte I Familias Thamnograptidae, Dichograptide, Abrograptidae y Glossograptidae. Ameghiniana 33(4): 421-434.

Brussa, E.D. 1997. Las graptofaunas ordovícicas de la Formación Las Aguaditas, Precordillera de San Juan, Argentina. Parte II Familias Cryptograptidae, Dicranograptidae, Diplograptidae y Orthograptidae. Ameghiniana 34(1): 93- 105.

DeOrmachea, J. 1972. El Paleozoico de la quebrada Las Aguaditas, Jáchal, San Juan. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad Nacional de Córdoba, 54 pp. Inédito

Feltes, N.A. 2017. *Faunas de conodontes y graptolitos de la Formación Las Aguaditas (Ordovícico) en el cordón de Los Blanquitos, Precordillera Central de San Juan, Argentina.* Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, 457 pp. (Inédito)

Feltes, N.A., Albanesi, G.L., Bergström, S.M. 2016. Conodont biostratigraphy and global correlation of the middle Darriwilian - lower Sandbian Las Aguaditas Formation, Precordillera of San Juan, Argentina. Andean Geology, 43(1), 60–85.

Jelin, R. 1970. El Paleozoico inferior y medio de la región comprendida entre las Quebradas Los Pozos y del Tupe, Jáchal, San Juan. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 61 p. Inédito.

Peralta, S.H., Heredia, S.E., Beresi, M.S. 1999. Upper Arenigian - Lower Llanvirnian sequence of the Las Chacritas River, Central Precordillera, San Juan Province, Argentina. *Acta-Universitatis Carolinae Geologica*, 43, 123–126.

Serra, F., Albanesi, G.L., Ortega, G., Bergström, S.M. 2015 Conodont-graptolite biostratigraphy and global correlation for the Mid-Late Ordovician in the Las Chacritas River Section, Precordillera of San Juan, Argentina. Geological Magazine, 152 (5): 813-829.

Serra F., N.A. Feltes, G. Ortega & Albanesi, G.L. 2017. Lower Middle Darriwilian (Ordovician) graptolites and index conodonts from the Central Precordillera of San Juan Province, Argentina. *Geological Journal*, 53 (5): 2161-2177. https://doi.org/10.1002/gj.3043

50 AÑOS

ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

ISBN 978-631-91401-0-1