

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Número 47 • 2021

ISSN 2422-5703 (En línea)

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires
editor@editoresasagai.org.ar
www.editoresasagai.org.ar
www.asagai.org.ar



Editada en la Ciudad de Córdoba - Argentina

EDITOR JEFE

MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman

UCIS Consultores

editores@editoresasagai.org.ar

EDITORIA ASOCIADA

Dra. Marcela Perez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Argentina

maperez@fich.unl.edu.ar

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Carlos Costa

Departamento de Geología

Universidad Nacional de San Luis

Argentina

costa@unsl.edu.ar

Lic. Luis Mario Giaconi

Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)

Universidad Nacional de La Plata

Argentina

lmgiaconi@gmail.com

Dr. Mauricio Giambastiani

Universidad Nacional de La Rioja

Argentina

mgiambastiani@unlar.edu.ar

Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo

Departamento de Geodinámica

Universidad Complutense de Madrid

España

vallejo@geo.ucm.es

Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé

Departamento de Engenharia Geotécnica

Politécnico do Porto

Portugal

hic@isep.ipp.pt

Dr. Clemente Irigaray Fernández

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Granada

España

clemente@ugr.es

Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental

Universidade Federal de Santa Maria

Brasil

malvamancuso@ufsm.br

Dra. Ofelia Tujchneider

Departamento de Hidrología y Ambiente

Universidad Nacional de El Litoral.

Santa Fe

Argentina

pichy@fich1.unl.edu.ar

Dr. Marcelo E. Zeballos

Área de Geotecnia

Departamento de Construcciones Civiles

Universidad Nacional de Córdoba

Argentina

marcelo.zeballos@unc.edu.ar

SECRETARIA

Dra. María Paula Bunicontró

IGEBA (CONICET-UBA)

Argentina

secretaria.editores@editoresasagai.org.ar

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño

Paula Paredes

paulaparedes13@gmail.com

Webmaster

Guillermo Saint

saintdisegno@gmail.com

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA 2018 - 2022

PRESIDENTE	<i>Fabio Sergio Luna</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Julia Löffler</i>
SECRETARIO	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
TESORERO	<i>Alejandro Emmanuel Celli</i>
VOCAL TITULAR	<i>Cristian Elías Cocchiarale</i>
VOCAL TITULAR	<i>María Victoria Altinier</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén Alvaro López</i>
REVISORA DE CUENTAS TITULAR	<i>Cristina Dapeña</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José Gabriel Salminci</i>
REVISORA DE CUENTAS SUPLENTE	<i>María Beatriz Ponce</i>

Maipú 645, Piso 1º - C1006ACG - Ciudad Autónoma de Buenos Aires
asagai@asagai.org.ar
www.asagai.org.ar

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Restitución de fotografías aéreas históricas para determinar el nivel de colmatación del embalse Cabra Corral, Salta, Argentina	<i>Núñez, Virgilio</i>	1
Características y evolución de manantiales captados para usos múltiples en el distrito Vichigasta, La Rioja, Argentina	<i>Silva, Santiago H. - Poveda, María E. Rodríguez, Corina I. - Miguel, Roberto E.</i>	17
Riesgo geomorfológico de médanos migrantes: minimización mediante la extracción de áridos en Arenas Verdes, municipio de Lobería (Buenos Aires)	<i>Bertola, G. R. - Farenga, M. - Taverna, B. Antenucci, D. - del Río, J. L.</i>	31
Caracterización geomecánica de los taludes de la autovía RP N° 20, municipio de El Volcán, provincia de San Luis	<i>Denaro, Juan F. - Sales, Daniel A.</i>	43
Análisis hidrológico del sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande (provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur - Argentina) para proponer medidas de mitigación a la ocurrencia de tormentas de polvo	<i>Perdomo, Santiago - Ruiz, María Soledad Noir, Gerardo - Kruse, Eduardo Emilio</i>	57
Directrices para autores		71
Formulario de suscripción o compra		75

MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

Misión y objetivos de la publicación

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* es la publicación oficial en Argentina de la asociación miembro de la *International Association of Engineering Geology and the Environment*. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* se define, en los estatutos de la IAEG, como “la ciencia dedicada a la investigación, estudio y solución de los problemas ambientales e ingenieriles que correspondan como resultado de la interacción entre la geología y las obras y actividades del ser humano, así como de la predicción y del desarrollo de medidas previsoras o de corrección de los peligros geológicos”. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* comprende: "la definición de la geomorfología, estructura, estratigrafía, litología y los acuíferos de las formaciones geológicas, las propiedades químicas e hidráulicas de todos los materiales involucrados en la construcción, extracción de recursos y cambio ambiental; la valoración del comportamiento hidrológico y mecánico de los suelos y macizos rocosos; la predicción de los cambios de las anteriores propiedades con el tiempo; la determinación de los parámetros a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de las obras de ingeniería y de los terrenos; el mantenimiento y mejora de la condición ambiental del terreno"

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* tiene por objeto fomentar la publicación y difusión de artículos originales de calidad en todos los ámbitos propios, así como la difusión de noticias sobre eventos y publicaciones de interés en la temática. Está dirigida a científicos y profesionales geólogos, ingenieros y tecnólogos.

En todos los casos, las opiniones vertidas en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan posiciones oficiales de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Todos los artículos son sometidos a un proceso de revisión por pares a cargo de especialistas de reconocido prestigio que colaboran, a tal fin, voluntariamente y sin lucro alguno, con la Revista.

Leyenda de protección de derechos de autor

Todos los artículos publicados en esta Revista cuentan con protección de los derechos de autor. Ninguna parte del material publicado aquí podrá ser reproducido, transmitido, almacenado o utilizado en ninguna forma o por cualquier medio gráfico, electrónico, o mecánico, incluyendo, pero no limitándose a, el fotocopiado, grabación, escaneo, digitalización, grabación en cinta, distribución en la Web, redes de información, o sistemas de almacenamiento y recuperación, sin permiso previamente aceptado del Editor.

El autor podrá incluir una versión del artículo en su propio sitio Web o en el de su institución. Los Autores podrán reproducir el Artículo, total o parcialmente, y difundir su contenido o ponerlo a disposición del público, en formato impreso o electrónico, como parte de un contenido docente o como una recopilación, para su uso en el ámbito académico o de investigación en la institución a la que pertenezcan, citando que fue publicado en la revista.

Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista deberán contactarse con la Editorial (editores@editoresasagai.org.ar).

En la página 75 encontrará el formulario a completar a tal efecto

Aims and objectives

The Journal of Engineering and Environmental Geology (JEEG) is the official publication in Argentina of the corresponding association of the International Association of Engineering Geology and the Environment. "Engineering geology, is defined in the statutes of the IAEG as the science devoted to the investigation, study and solution of engineering and environmental problems which may arise as the result of the interaction between geology and the works or activities of man, as well as of the prediction of and development of measures for the prevention or remediation of geological hazards. Engineering geology embraces: the definition of the geomorphology, structure, stratigraphy, lithology and ground water conditions of geological formations; the characterisation of the mineralogical, physico-geomechanical, chemical and hydraulic properties of all earth materials involved in construction, resource recovery and environmental change; the assessment of the mechanical and hydrological behaviour of soil and rock masses; the prediction of changes to the above properties with time; the determination of the parameters to be considered in the stability analysis of engineering works and earth masses; the improvement and maintenance of the environmental condition and properties of the terrain".

The aims of this journal are the publication and diffusion of original quality paper in all related fields and also the diffusion of news about related events and publications of interest. It is addressed to scientist and professional geologists, engineers and technologists.

In any case, the opinions expressed in this publication are responsibility of the authors and do not reflect official positions of the Argentina Association of Engineering Geology. All items are submitted to a peer review process by renowned specialists who collaborate to that end, voluntarily and without any profit, with the Journal.

Authors Copyrights

All papers published in this Journal are protected by copyrights. No part of published material covered herein may be reproduced, transmitted, stored, or used in any form or by any means graphic, electronic, or mechanical, including but not limited to photocopying, recording, scanning, digitizing, taping, Web distribution, information networks, or information storage and retrieval systems, without a previously accepted permission by the Editor.

The author(s) will be allowed to include a paper version in his own or institutional Web site. The author(s) may reproduce the paper, totally or partially, and diffuse it contain o let it available to the public in impressed or electronic format only as a part of a teaching context or as a state-of-the art reviewing, for it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.

Price of the Journal

All interested in buying a copy of any Journal issue should be in contact with the Editor (editores@editoresasagai.org.ar).

In page 75 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.



Restitución de fotografías aéreas históricas para determinar el nivel de colmatación del embalse Cabra Corral, Salta, Argentina

Restitution of historical aerial photographs to determine the sedimentation level of the Cabra Corral reservoir, Salta, Argentina

Núñez, Virgilio

Recibido: 19 de febrero de 2021 • Aceptado: 29 de junio de 2021

Resumen

A partir de fotografías aéreas históricas (Spartan Air Service, década de 1970) correspondientes al sector del embalse Cabra Corral, se generó un modelo topográfico digital mediante restitución fotogramétrica utilizando el software libre PHOTOMOD 6.0.2.1823 Lite x64 © Racurs, 2015. Se usaron 149 puntos de control, 94 obtenidos de productos del levantamiento aerofotogramétrico realizado por el Instituto Geográfico Nacional (julio de 2014), y 55 de los planos topográficos entregados por la empresa Damond - Dinerman y CIA. S.A. (1969).

A pesar de la mala calidad de las fotografías aéreas históricas y de la incertidumbre de la cámara utilizada por Spartan Air Service, se pudo obtener un modelo topográfico digital de la condición previa al llenado del embalse, generado con adecuadas precisiones: precisión_{r(95%)} = 0,81 m, precisión_{z(95%)} = 1,18 m. Utilizando datos batimétricos del año 2005 se generó el modelo digital de elevaciones actual.

A partir de la diferencia entre ambos modelos digitales de elevaciones se pudo estimar que el volumen de material depositado en el embalse alcanza los 352,97 hm³, representando una pérdida del 10,86% de su capacidad; la tasa de sedimentación anual, estimada en 10,7 hm³, constituye una merma de la capacidad anual del 0,33%.

También se pudo determinar la conformación de los deltas de las dos redes de avenamiento principales (cuenca del río Pasaje o Juramento): los ríos Arias o Arenales (Norte) y Guachipas (Sur); el delta del primero más potente, alargado y estrecho, mientras que el del segundo de tipo fluvio-lacustre es denominado en pie de ave.

Palabras clave: fotografías aéreas históricas, restitución fotogramétrica, embalses, colmatación, Cabra Corral, SIG.

Instituto de Recursos Naturales y Eco Desarrollo (IRNED), Facultad de Ciencias Naturales (FCN), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina.

Tel.: 054 387 4255438; fax: 054 387 4255455.

✉ virgilionez@gmail.com

Abstract

From historical aerial photographs (1970s) corresponding to the sector currently occupied by the Cabra Corral reservoir

(Salta Province, Northwest of Argentina), a digital topographic model was generated through photogrammetric restitution using the free software PHOTOMOD 6.0.2.1823 Lite x64 © Racurs, 2015. 149 ground control points were used, 94 obtained from aerial photogrammetric survey carried out by the National Geographic Institute (2014, July), and 55 from the topographic map delivered by Damond - Dinerman & Co. A.S. (1969).

Despite the poor quality of the historical aerial photographs and the uncertainty of the camera used by Spartan Air Service, it was possible to obtain a digital topographic model of the condition prior to filling the reservoir, which was adequate considering the accuracies ($accuracy_r(95\%) = 0,81 \text{ m}$, $accuracy_z(95\%) = 1,18 \text{ m}$). Using bathymetric data from 2005, the current digital elevation model was generated.

From the difference between both digital elevation models, it was possible to estimate that the volume of material deposited in the reservoir reaches $352,97 \text{ hm}^3$, representing a loss of 10,86% of its capacity; the annual sedimentation rate, estimated at $10,7 \text{ hm}^3$, constitutes a decrease in the annual capacity of 0,33%.

It was also possible to determine the conformation of the deltas of the two main drainage networks (Pasaje or Juramento river basin): the Arias or Arenales (North) and Guachipas (South) rivers; the delta of the first is more powerful, elongated and narrow, while that of the second, of the fluvio-lacustrine type, is called bird's foot.

Keywords: historical aerial photographs, digital photogrammetric restitution, dam, sedimentation, Cabra Corral, GIS.

INTRODUCCIÓN

El embalse Cabra Corral es un importante reservorio de agua dulce ubicado en los departamentos de Chicoana, La Viña y Guachipas, Provincia de Salta, Noroeste de Argentina (Figura 1). Dicho reservorio, recibe principalmente los aportes superficiales de dos importantes redes de avenamiento, los ríos Arias o Arenales (Norte) y Guachipas (Sur); el embalse Cabra corral desagua sobre el río Pasaje o Juramento.

El embalse Cabra Corral es parte del complejo hidroeléctrico homónimo cuyo fin primordial es la generación de energía, para lo cual cuenta con una presa principal de eje curvo ($25^{\circ} 16' 0.01'' \text{ S}$, $65^{\circ} 19' 49.66'' \text{ W}$), de nombre General Manuel Belgrano, construida de materiales sueltos con una altura de 94,75 m sobre el lecho del río Pasaje o Juramento y una longitud de 510 m, con coronamiento en cota 1.043,75 m s.n.m., la cota de máxima normal y extraordinaria es de 1.037,00 m s.n.m., mientras que la cota de mínima normal es de 1.017,00 m s.n.m. y la de mínima extraordinaria de 960,00 m s.n.m.; la presa cuenta con tres turbinas Francis con 34,60 MW de potencia unitaria las que generan en promedio 250 GWh anuales (López et al., 2010). El espejo de agua del embalse cubre actualmente $110,03 \text{ km}^2$ a cota 1.037,00 m s.n.m.

La construcción de la presa estuvo a cargo de la empresa Panedile Argentina SA (PANEDILE, 2018), (Elias, 2008), se inició en febrero de 1966 y se concluyó en 1972; la operación de la presa comenzó bajo el control de Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado (López et al., 2010).

En 1948, Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado contrato la realización de los estudios de factibilidad a la empresa norteamericana Pearson, Brinekerhoff, Hogan y Mac Donald, representada en Argentina por Damond - Dinerman y CIA. S.A.; el proyecto fue revisado y corregido en 1957 por el técnico en diques de fama mundial Dr. Arturo Casagrande (Elias, 2008).

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Planos topográficos y fotografías aéreas pancromáticas históricas

De los estudios preliminares se cuenta con planos topográficos de escala 1:25.000, equidistancia 10 m (Olmos et al.,

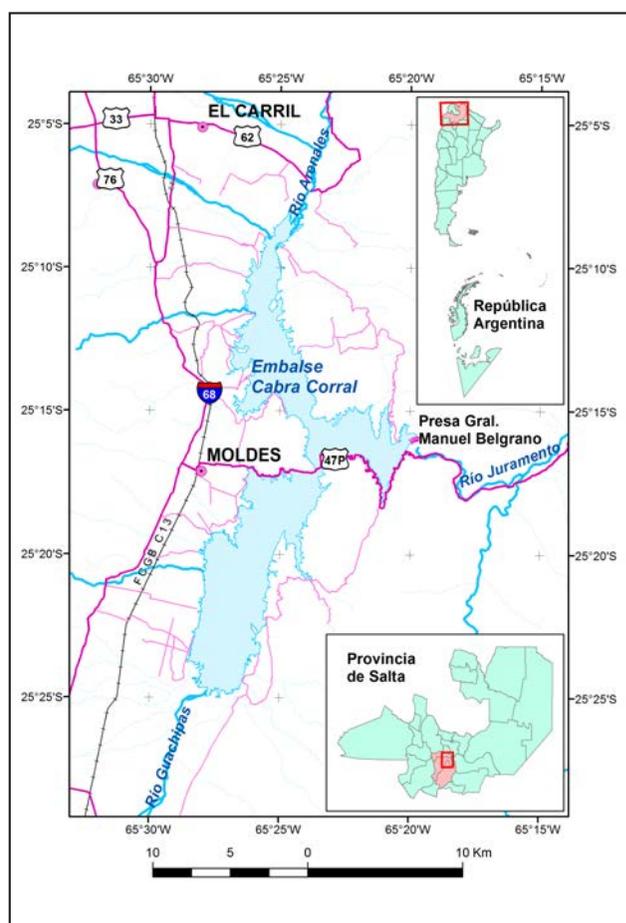


Figura 1. Mapa de ubicación. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

2011), realizados probablemente en el año 1969 por la empresa Damond - Dinerman y CIA. S.A. (S. G. Mosa & Núñez, 2001); las curvas de nivel de dichos planos adolecen de errores groseros y no se condicen estrictamente con la realidad (topografía). Al parecer, dichos estudios topográficos fueron realizados con

técnicas poco precisas, lo que confiere un significativo nivel de de incertidumbre a los datos que constituyen la base para el cálculo de la pérdida de capacidad del embalse por efecto de la sedimentación (Olmos *et al.*, 2011).

Para resolver el inconveniente planteado precedentemente, se procedió a la restitución fotogramétrica de fotografías aéreas pancromáticas históricas obtenidas, en la década de 1970 (no se dispone de la fecha exacta, probablemente en 1969) durante la construcción de la presa General Belgrano, por la empresa Spartan Air Service, com. pers. Ing. Miguel Menéndez. Copias en papel del material fotográfico pancromático, formato 23x23 cm y de escala media 1:35.000, se encuentran en los archivos del Instituto de Recursos Naturales y Eco Desarrollo (IRNED), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Las fotografías adolecen de varios inconvenientes: no se conoce la cámara utilizada en el levantamiento (se supone CARL ZEISS RMK TOP 15) y, por tanto, los parámetros de la misma; las copias son de baja calidad sub o sobre expuestas; debido a la antigüedad y al material de soporte (papel de alto gramaje) las fotografías presentan pérdida de la calidad tonal, deformaciones y hasta resquebrajaduras en la emulsión.

Las fotografías aéreas pancromáticas (1969) fueron escaneadas a una resolución de 1.200 dpi, dimensiones del píxel = 22,62 µm, distancia de muestra en el terreno (en teledetección corresponde a la resolución espacial y se conoce como GSD, acrónimo en Inglés de ground sample distance) = 792 mm, 8 bits, escala de grises, formato JPG, con un escáner Epson Expression 10000XL

A3, resolución de hardware 2.400 x 4.800 dpi, color de 48 bits y densidad óptica de 3,8 Dmax (Epson, 2004).

Fotografías aéreas digitales y modelos digitales de elevaciones

Para el ajuste de los sectores emergidos del embalse se dispuso de datos provenientes de los productos generados a partir de un levantamiento aerofotogramétrico realizado por la Dirección de Sensores Remotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con una aeronave Cessna Citation birreactor (IGN, n.d.) y un Sistema Vecxel Ultracam XP (f:100 mm, píxel 6 µ, Compensador de movimiento TDI, IMU POSAV 510, GNSS (acrónimo en Inglés de Global Navigation Satellite System) Doble frecuencia GPS+GLONASS, Plataforma giroestabilizada Ultramount GSM3000, Sistema de navegación Applanix POSTrack 510) (IGN, 2018) durante el 20/07/2014. Los parámetros del levantamiento son: Resolución espacial 0,5 m; Resolución espectral cuatro bandas (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano); Formato de imagen Tiff estándar con TFW; Sistema de Proyección Gauss-Krüger Faja 3; Marco de Referencia POSGAR 07 – Época 2006.632; Estación de Referencia: UNSA (RAMSAC) (IGN, 2014b). Las fotografías aéreas digitales correspondientes al área de estudio tienen la siguiente codificación: 2566-22-4-b y d; 2566-23-1-c y d; 2566-23-3-a, b, c y d; 2566-28-2-b y d; 2566-29-1-a, b, c y d (Figura 2).

La Dirección de Sensores Remotos del IGN proveyó además los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) individuales en formato LAS (sin clasificar), con los mismos parámetros de la fotografías aéreas, alturas elipsoidales, paso de grilla de 15 m, los que fueron generados a partir de las fotografías orientadas, producto de una aerotriangulación de homogenización y tienen la misma codificación (IGN, 2014a). Los MDE fueron ajustados a cota ortométrica en el año 2017, referido al Sistema de Referencia Vertical de la República Argentina (Lauria *et al.*, 2002), y se recortó el sector con agua en superficie. Dichos MDE fueron unidos en un mosaico y proyectados al Sistema de Coordenadas Gauss Krüger, Faja 3, Sistema de Referencia POSGAR 07. Al mencionado mosaico se le recortó el sector correspondiente a la cota de seguridad del embalse 1.037,00 m s.n.m. (López *et al.*, 2010) (Figura 3).

Las coordenadas x,y,z de los puntos de control de terreno (PCT) correspondientes a los sectores emergidos del embalse (94 puntos), fueron obtenidos de las fotografías aéreas digitales y los MDE registrados por el IGN en 2014 (Figura 2 y Figura 3). Los PCT de los sectores sumergidos del embalse se obtuvieron a partir de la información de los planos topográficos provistos por la empresa Damond - Dinerman y CIA. S.A. (S. G. Mosa & Núñez, 2001) con la consecuente incertidumbre, ya que no se contaba con otra fuente más confiable.

Restitución de las fotografías aéreas pancromáticas

La restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969) se llevó a cabo con la versión libre del software PHOTOMOD 6.0.2.1823 Lite x 64 © Racurs, 2015 (RACURS, 2015c). En una primera instancia se creó el proyecto, se definió el tipo proyección central y el Sistema de Coordenadas POSGAR 07 Argentina Faja 3; posteriormente se establecieron tres líneas de vuelo para cargar las fotografías que cubren el área de interés, 35 en total. Cada línea de vuelo se conformó de la siguiente manera: 314, fotografías 031 a 047; 315, fotografías 034 a 045; 316, fotografías 010 a 015.

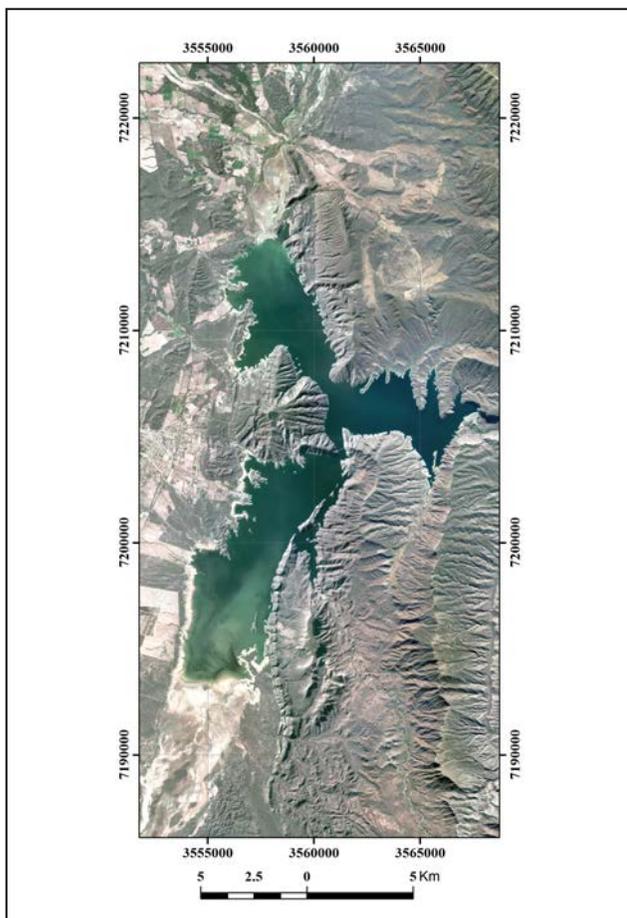


Figura 2. Mosaico de las fotografías aéreas digitales, IGN 2014. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

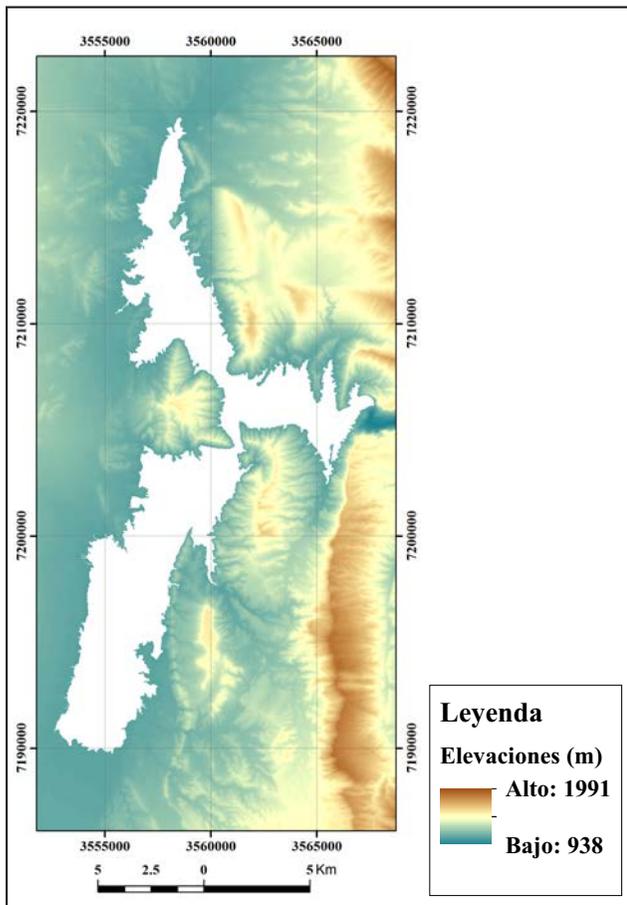


Figura 3. Mosaico de los MDE, IGN 2017, con recorte de la cota 1037.00 m s.n.m. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

Orientación interior

Luego de cargar, corregir radiométricamente y ubicar relativamente las fotografías en cada línea de vuelo, se inició el proceso de aerotriangulación. Para la orientación interior y dado que no hay certeza de la cámara empleada en el levantamiento, se utilizaron los datos de calibración de una cámara CARL ZEISS RMK TOP 15, serie N° 141.308, formato 23 x 23 cm, lente Pleogon A3, serie N° 141.330, f: 154,007 mm, máxima apertura f:4, fecha de calibración 01/07/2002 (*Deutscher Kalibrierdienst DKD-K-05202. RMK Top 15, 2002*) (Tabla 1); la medición de las marcas fiduciales se realizó manualmente para todas las fotografías y se usó una transformación de tipo Projectiva.

Dada la incertidumbre de la cámara que fuera utilizada para el levantamiento fotográfico se procedió a aplicar la auto calibración de tipo física de los parámetros de la cámara CARL ZEISS RMK TOP 15 (coordenadas del punto principal, distancia focal y coeficientes de distorsión) (*RACURS, 2015b*). La aproximación por fórmula física utiliza el método de mínimos cuadrados y entrega los coeficientes de distorsión y el RMSE (root-mean-square error) de aproximación usando las siguientes ecuaciones (*RACURS, 2015b*):

Tabla 1. Datos de calibración de la cámara CARL ZEISS RMK TOP 15 (RACURS, 2015c). Referencias: R, radio.

#	X (mm)	Y (mm)
Punto principal	0,005	0,005
Marca fiducial 1	-112,987	-112,996
Marca fiducial 2	-112,997	113,007
Marca fiducial 3	113,000	113,006
Marca fiducial 4	113,008	-112,992
Distorsión radial		
Punto de simetría (distorsión cero)	0,007	0,005
R (mm)	dR (micrones)	
10	0,00	
20	-0,001	
30	-0,001	
40	0,000	
50	0,001	
60	0,001	
70	0,002	
80	0,001	
90	0,001	
100	0,000	
110	-0,001	
120	-0,002	
130	-0,001	
140	0,001	
150	0,000	

$$x_{corr} = x - k_1xr^2 - k_2xr^4 - k_3xr^6 - P_1(2x^2 + r^2) - 2P_2xy - b_1x - b_2y \tag{1}$$

$$y_{corr} = y - k_1yr^2 - k_2yr^4 - k_3yr^6 - P_1(2y^2 + r^2) - 2P_2xy - a_1x - a_2y \tag{2}$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \tag{3}$$

donde:

x, y : coordenadas del punto de simetría (distorsión cero) en mm;

k_1, k_2, k_3 : coeficientes de distorsión radial;

P_1, P_2 : coeficientes de distorsión tangencial;

a_1, a_2, b_1, b_2 : coeficientes de deformación de la imagen.

Orientación exterior

El diseño del bloque por proyección central se inició especificando el solapamiento longitudinal (60%) y lateral (30%) y vinculando las fotografías manualmente mediante enlaces rápidos (*Lizana, 2011*). Para la orientación relativa se midieron

manualmente al menos dos puntos de enlace por cada una de las seis zonas estándar (RACURS, 2015a), o de Otto Von Grüber (García Flores & Ortiz de Elguea, 2012), (Lizana, 2011); se usaron 264 puntos en total.

Para la orientación absoluta se identificaron, incorporaron y midieron 149 PCT, para los cuales se fijó una precisión en metros de 0.2 desviaciones estándar para las coordenadas x,y y de 0.4 desviaciones estándar para la coordenada z; para los ángulos Omega-Phi-Kappa se estableció una precisión en grados de 0,005 desviaciones estándar. Se usaron más de 6 PCT por cada estereo par para ajustar el bloque de fotografías (RACURS, 2015a).

Los puntos de enlace y de control de terreno (Figura 4) fueron transferidos en la ventana 3D y se comprobó que el coeficiente de correlación superase el 0,90, acreditándose también que los paralajes verticales no excediesen el tamaño del píxel (RACURS, 2015a).

Durante la orientación relativa el software PHOTOMOD (RACURS, 2015c) calcula los valores umbrales de los errores promedio en los tripletes utilizando las siguientes ecuaciones (RACURS, 2015a), (Quirós Rosado, 2018):

$$E_{mean}^{xy} = \sqrt{2} \cdot 0,5 \text{ pixel} \quad (4)$$

$$E_{mean}^z = \frac{f}{b} E_{mean}^{xy} \quad (5)$$

donde:

E_{mean}^{xy} : error promedio en xy;

E_{mean}^z : error promedio en z;

f : distancia focal de la cámara;

b : base del levantamiento en la fotografía.

Por otra parte, se dispone de la siguiente ecuación para calcular los valores de errores máximos aceptables en tripletes (RACURS, 2015a):

$$E_{max} \approx 2 * E_{mean} \quad (6)$$

Ajuste del bloque de fotografías

Para el ajuste del bloque se utilizó en una primera instancia el método de cálculo por esquema del bloque y el ajuste manteniendo la aproximación inicial para detectar errores tales como las coordenadas de los PCT incorrectamente especificadas (RACURS, 2015b). Para la aproximación inicial del bloque se usaron las coordenadas de los PCT, de los centros de proyección y los ángulos de la orientación exterior, ejecutándose la georreferenciación directa para calcular las coordenadas de los puntos de enlace usando los datos de la orientación exterior.

Para la compensación de los errores sistemáticos de las coordenadas de los centros de proyección, se utilizó la opción de comunes para el bloque que es la recomendada si no se dispone de mediciones GNSS para los mismos (RACURS, 2015b). Para el ajuste por haces de rayos se usó una precisión (RMSE) de un píxel (debido a la falta de los datos de calibración de la cámara y a la mala calidad y conservación del material fotográfico) (RACURS, 2015b) y un mismo peso de uno para los parámetros de: mediciones en las imágenes, PCT, centros de proyección y los ángulos de la orientación exterior. Finalmente

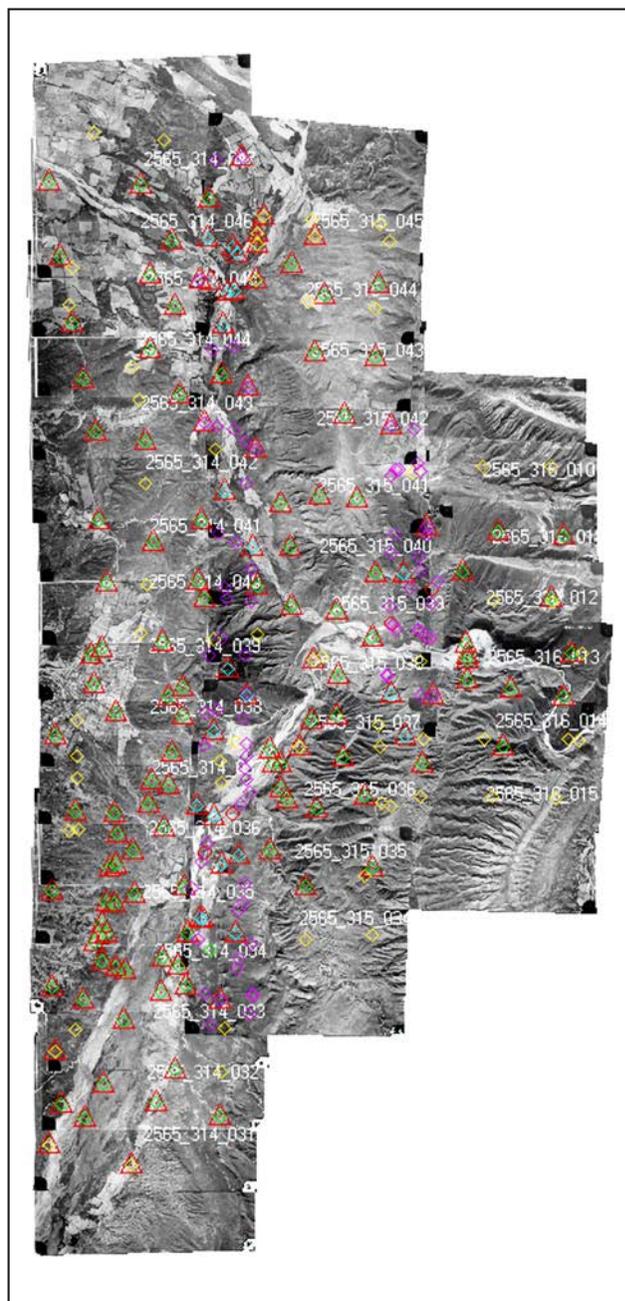


Figura 4. Diseño del bloque de fotografías aéreas pancromáticas (1969) con la ubicación de los puntos de enlace y PCT.

se procedió a realizar el ajuste del bloque de fotografías con todos los parámetros establecidos en las etapas anteriores referidos, aproximación inicial y georreferenciación directa.

Luego del ajuste del bloque de fotografías, PHOTOMOD (RACURS, 2015c) entrega un reporte con todos los parámetros, incluidos los residuales en x,y,z,xy para los PCT e indica los siguientes estadísticos: media absoluta, RMSE y el valor máximo.

Precisión horizontal

El error horizontal en un punto i es definido como (FGDC, 1998):

$$\sqrt{[(x_{data,i} - x_{check,i})^2 + (y_{data,i} - y_{check,i})^2]} \quad (7)$$

donde:

$x_{data,i}, y_{data,i}$ son las coordenadas del i-ésimo punto de control en el conjunto de datos;

$x_{check,i}, y_{check,i}$ son las coordenadas del i-ésimo punto de control en la fuente independiente de mayor precisión;

n es la cantidad de puntos de verificación probados;

i es un número entero que va de 1 a n .

Por lo tanto el RMSE horizontal es (FGDC, 1998):

$$RMSE_r = \sqrt{\left[\sum ((x_{data,i} - x_{check,i})^2 + (y_{check,i} - y_{check,i})^2) / n \right]} \quad (8)$$

$$= \sqrt{[RMSE_x^2 + RMSE_y^2]}$$

Para calcular la precisión horizontal se debe verificar que $RMSE_x \neq RMSE_y$ y que la razón entre el $RMSE_{mín}(x,y)$ y el $RMSE_{máx}(x,y)$ se encuentre en el intervalo (0,6 - 1,0) definido por el National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) del Federal Geographic Data Committee (FGDC) (Case 2) (FGDC, 1998), (Greenwalt & Shultz, 1968), entonces, el error estándar circular (con una confianza del 39,35%) puede aproximarse a:

$$RMSE_r = 0,5 * (RMSE_x + RMSE_y) \quad (9)$$

Los residuales fueron analizados estadísticamente con el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011) para comprobar su precisión. Para verificar la Normalidad de la distribución de los errores (residuales xy) se generó un gráfico Q-Q plot que contrasta los cuantiles observados vs. los parámetros de la distribución teórica estimados a partir de la muestra por máxima verosimilitud (Balzarini et al., 2008); el coeficiente de correlación r permite comprobar que la distribución de los datos observados concuerda con la teórica. La recta de correlación se traza empleando el intervalo del 95% de confianza (Mena, 2016). Para verificar la independencia entre los componentes x,y del error circular se utilizó el análisis de correlación de Pearson, que es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables (Balzarini et al., 2008). Comprobada la distribución normal y la independencia entre los componentes x,y , la precisión horizontal del error estándar circular según NSSDA puede aproximarse de acuerdo con la siguiente fórmula (FGDC, 1998):

$$Precisión_r \sim 2,4477 * 0,5 * (RMSE_x + RMSE_y) \quad (10)$$

El factor 2,4477 se utiliza para calcular la precisión horizontal al nivel de confianza del 95% (Greenwalt & Shultz, 1968).

Precisión vertical

El error vertical en un punto i es definido como (FGDC, 1998):

$$RMSE_z = \sqrt{\left[\sum (z_{data,i} - z_{check,i})^2 \right] / n} \quad (11)$$

donde:

$Z_{data,i}$ es la coordenada vertical del i-ésimo punto de control en el conjunto de datos;

$Z_{check,i}$ es la coordenada vertical del i-ésimo punto de control en la fuente independiente de mayor precisión;

n es el número de puntos que se verifican;

i es un número entero de 1 a n .

Habiendo eliminado la mayoría de los errores sistemáticos, se procedió a verificar la Normalidad de la distribución del error vertical, generando un gráfico Q-Q plot (Balzarini et al., 2008) y el coeficiente de correlación de Pearson (r) empleando el intervalo del 95% de confianza (Mena, 2016).

Para calcular el error vertical al 95% de nivel de confianza se aplica el factor 1,9600 (Greenwalt & Shultz, 1968). Por lo tanto, la precisión vertical (precisión_z) informada de acuerdo con la NSSDA (FGDC, 1998) se calculará mediante la siguiente fórmula (FGDC, 1998):

$$Precisión_z = 1,9600 * RMSE_z \quad (12)$$

Digitalización de las curvas de nivel

Ajustado el bloque de fotografías se procedió a digitalizar las curvas de nivel manualmente dada la imposibilidad de calcular puntos automáticamente por las deficiencias en el material fotográfico, ya mencionadas precedentemente, y por las limitaciones de la versión libre del software PHOTOMOD (RACURS, 2015c). Las curvas de nivel se digitalizaron fijando la marca en z para cotas específicas con una equidistancia de 5 m, muy superior a la utilizada como referencia para escala 1:10.000 en relieves medios (Quirós Rosado, 2018) teniendo en cuenta que las fotografías utilizadas son de escala promedio 1:35.000. Por otra parte, se consideró la premisa definida para la tolerancia altimétrica que establece que el 90% de los PCT debe tener errores menores a un cuarto de la equidistancia, dependiendo de la escala (Quirós Rosado, 2018).

Obtenidas las curvas de nivel se procedió a exportarlas en formato forma (shp) para su utilización en el software de aplicación en Sistemas de Información Geográfica ArcGis © 10 (ESRI, 2010). Cada curva de nivel exportada almacena la cota de dos formas: la primera como componente geométrico 3D (x,y,z) indicado en la base de datos por la propiedad ZM del campo Shape (polyline ZM); mientras que la segunda, almacenada también en la base de datos como uno de los atributos de la polilínea en un campo específico (para este caso CODE).

Mapas topográficos y modelos digitales de elevaciones

A partir del MDE provisto por el IGN (Figura 3) se generó el mapa topográfico (curvas de nivel con equidistancia de 5 m) para los sectores aledaños al embalse por encima de la cota 1.037,00 m s.n.m.; a dicho MDE se le adicionaron las curvas de nivel generadas mediante la restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969) para producir el mapa topográfico previo al llenado del embalse.

Usando de base el mapa topográfico previo se generó la red irregular de triángulos (TIN, acrónimo en Inglés de triangulated irregular network) para la situación previa al llenado del embalse (TIN previo), create TIN - 3D Analyst (ESRI, 2010), que luego fue utilizada para producir por conversión (TIN to Raster, 3D Analyst (ESRI, 2010) el MDE del vaso previo al llenado del embalse (MDE previo), con una resolución de 5 m.

Todos las presentaciones gráficas de los mapas topográficos y de los MDE fueron editadas en software de la familia ArcGIS © 10 (ESRI, 2010), como: ArcMap™ 10.0 y ArcScene™ 10.0.

Aplicación de los datos de la restitución

Cálculo de los volúmenes de agua almacenados en el embalse

Para poder determinar el volumen de sedimentos depositados históricamente sobre el vaso del embalse Cabra Corral, es requerida la generación de un MDE de la situación actual (MDE actual); de esta forma es posible calcular la diferencia entre el MDE previo, que representa las características topográficas del sector previo al llenado del embalse, y el MDE actual, que reproduce la nueva topografía de los sectores afectados por deposición de material de acarreo debido al efecto del espejo de agua, cambio del nivel de base, sobre la velocidad de escurrimiento de los cauces de aporte.

Para generar el MDE actual se siguió un procedimiento similar al descrito anteriormente en Mapas topográficos y modelos digitales de elevaciones, solo que para este caso se usaron los datos (puntos) de la batimetría realizada en 2005 (S. G. Mosa & Núñez, 2005) (Figura 5) y los vértices de las curvas de nivel de cotas 1.025 y 1.030 m s.n.m. del mapa topográfico previo, extraídos con la herramienta Feature Vertices To Point (ESRI, 2010). La mencionada batimetría (2005) se realizó con dos ecosondas: una de registro continuo marca Furuno FE-6300 de 200 kHz y otra de registro digital Raytheon Apelco 560 de 50 kHz, ambas ajustadas a un alcance 80 m de profundidad y con una precisión de la medición del orden de 10 cm.

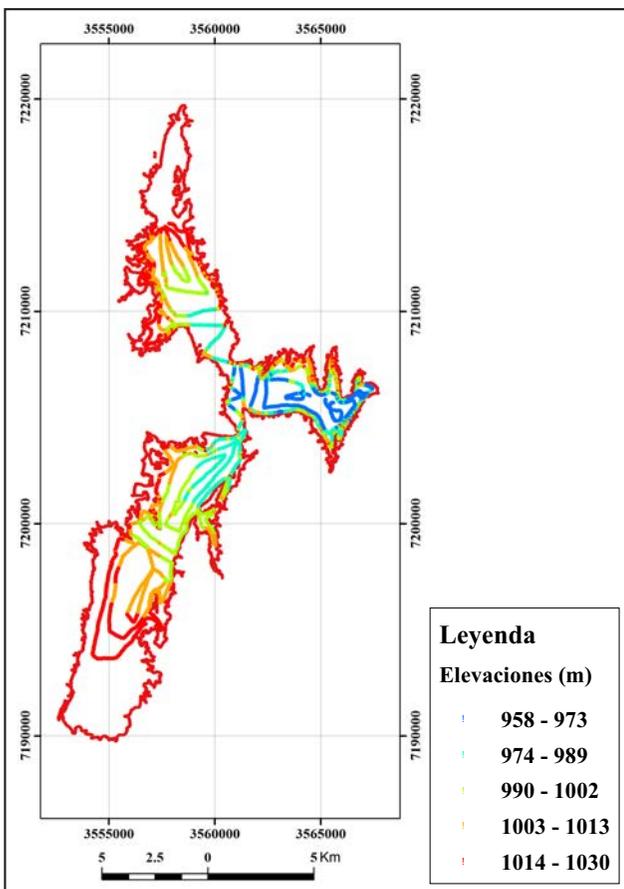


Figura 5. Puntos del levantamiento batimétrico 2005. Coordenadas Gauss-Krüger. Faja 3, POSGAR 07.

Luego se procedió a interpolar los datos (puntos y vértices) con el método geoestadístico de Kriging ordinario (ESRI, 2010), opción de semivariograma esférico con un radio de búsqueda de 24 puntos y sin especificar la máxima distancia de búsqueda, para producir el modelo batimétrico digital actual. Debe aclararse que se probaron diferentes configuraciones, resultando más adecuada la que se presenta en los Resultados y discusión.

Del modelo batimétrico digital actual se extrajeron las curvas de nivel con equidistancia 5 m, usando el módulo Contour de 3D Analyst (ESRI, 2010), para configurar el mapa topobatimétrico actual. Las curvas de nivel del mapa topobatimétrico actual fueron unidas con las curvas de nivel superiores a la cota 1.030 m s.n.m. del mapa topográfico previo para configurar el mapa topográfico de la situación actual, año 2005. Posteriormente se generó la TIN actual a partir del mapa topográfico actual y por conversión (TIN to Raster) (ESRI, 2010) el MDE actual, año 2005.

Utilizando la herramienta Surface Volume, 3D Analyst (ESRI, 2010), se calcularon los volúmenes almacenados en ambas situaciones: inicial (MDE previo) y actual (MDE actual, año 2005), usando como plano de corte a la cota máxima extraordinaria o máxima normal de 1.037.00 m s.n.m. (López et al., 2010).

Por otra parte, se procedió a realizar la diferencia entre el MDE actual y el MDE previo para detectar los sectores donde se depositó material de arrastre (sedimentos), principalmente en los deltas de los ríos Arenales y Guachipas (Figura 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros de la auto-calibración de la cámara CARL ZEISS RMK TOP 15

Aplicando la auto calibración de tipo física según las ecuaciones (1) y (2) se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2. Como puede verse, todos los parámetros fueron optimizados permitiendo corregir los errores por la falta de los datos de calibración y reducir drásticamente las deformaciones debidas a la antigüedad de las fotografías y al material de base que soporta la emulsión fotográfica (papel).

Tabla 2. Coeficientes del ajuste por fórmula física de la cámara CARL ZEISS RMK TOP 15.

Parámetro	Valor original	Optimizado	Resultado	Optimizado
Dx_0	0	+	0,1828328	+
Dy_0	0	+	0,03628953	+
DF	0	+	1,03605281	+
K_1	$6,11e^{-12}$	+	$1,85e^{-08}$	+
K_2	$-8,54e^{-16}$	+	$-7,1425e^{-12}$	+
K_3	$2,71e^{-20}$	+	$1,96e^{-16}$	+
P_1	0	+	$-6,06e^{-07}$	+
P_2	0	+	$7,18e^{-07}$	+
b_1	0	+	-0,00032267	+
b_2	0	+	$-4,86e^{-05}$	+

Parámetros:

Dx_0 : Desplazamiento sobre el eje X en mm desde el punto principal;

Dy_0 : Desplazamiento sobre el eje Y en mm desde el punto principal;

DF: desviación del valor de la distancia focal en mm;

K_1, K_2, K_3 : coeficientes de distorsión radial;

P_1, P_2 : coeficientes de distorsión tangencial;

b_1, b_2 : coeficientes de deformación de la imagen.

Ajuste del bloque de fotografías

Para el ajuste del bloque de fotografías se estimó una exactitud general $\Sigma\sigma_0 = 2,983$, que representa las discrepancias en el encaje respecto a los umbrales especificados para las mediciones de coordenadas de los puntos y los datos de entrada (PCT y centros de proyección). Si bien dicha exactitud general supera a la esperada (RACURS, 2015b), debe tenerse presente la mala calidad del material fotográfico, la imprecisión de las coordenadas y la incertidumbre en la localización de algunos PCT correspondientes a los sectores del embalse actualmente sumergidos (55 puntos), cuyos datos y localizaciones provienen de los estudios preliminares que resultan poco confiables (Olmos et al., 2011), (S. G. Mosa & Núñez, 2001). Para mejorar la exactitud general se requiere reserir la precisión (RMSE) en la medición de los puntos sobre las imágenes.

Errores en los puntos de control de terreno

En la Tabla 3 se presentan los valores absolutos de los parámetros correspondientes al ajuste del bloque de fotografías referidos a los PCT (reporte del ajuste del bloque, PHOTOMOD (RACURS, 2015c).

Teniendo en cuenta que la precisión (RMSE) usada para el ajuste por haces de rayos fue de un píxel y que la distancia de muestra en el terreno (GSD) es de 792 mm, los RMSE horizontales y verticales de referencia para los tripletes arrojaron los siguientes valores: 0,56 m ecuación (4) y 0,94 m ecuación (5). En ese caso, los valores de errores máximos aceptables en tripletes serían: en xy = 1,12 m y en z = 1,87 m, ecuación (6).

Tabla 3. Valores absolutos de los parámetros referidos a los residuales en x,y,z,xy de los PCT. Referencias: m, medido; g, geodésico.

Parámetro	$X_m - X_g$ (m)	$Y_m - Y_g$ (m)	$Z_m - Z_g$ (m)	E_{xy} (m)
media absoluta	0,210	0,235	0,450	0,344
RMSE	0,300	0,363	0,603	0,471
máximo	1,190	1,810	2,370	2,170

Considerando los valores de referencia para los errores horizontales y verticales, los RMSE correspondientes a los residuales en xy (0,471 m) y en z (0,603 m) (Tabla 3) resultan satisfactorios. No así para los errores máximos que fueron superados para xy en 1,05 m y para z en 0,5 m. Todos los PCT (55) con errores máximos en x,y,z,xy se ubican en los sectores actualmente sumergidos, siendo por lo tanto la fuente de incertidumbre ya comentada.

Precisión horizontal

El gráfico Q-Q plot (Figura 6) y el coeficiente de correlación r (0,884) permiten comprobar que los errores circulares presentan una distribución de tipo Normal. Por otra parte, el coeficiente de correlación de Pearson ($r = -0,29$) indica una correlación inversa y pobre (Figura 7), mientras que la probabilidad de $3,5 \cdot 10^{-4}$ indica que no es posible rechazar la hipótesis nula ($H_0: r=0$) para un nivel de confianza superior al 99,99%, lo que revela la independencia entre los componentes x,y del error circular requerido por el NSSDA (FGDC, 1998).

Habiendo verificado que $RMSE_x \neq RMSE_y$ y que la razón entre el $RMSE_{\min(x,y)}$ (0,300 m) y el $RMSE_{\max(x,y)}$ (0,363 m) se encuentre en el intervalo 0,6 - 1,0, NSSDA, FGDC, Case 2 (FGDC, 1998) (0,826 m), se aproximó el error estándar circular $RMSE_r$ (con una confianza del 39,35%) aplicando la ecuación (9), resultando de 0,13 m. Por otra parte, teniendo en cuenta la distribución normal y la independencia entre los componentes del error, se aplicó la ecuación (10) obteniendo una precisión $r(95\%)$ de 0,81 m.

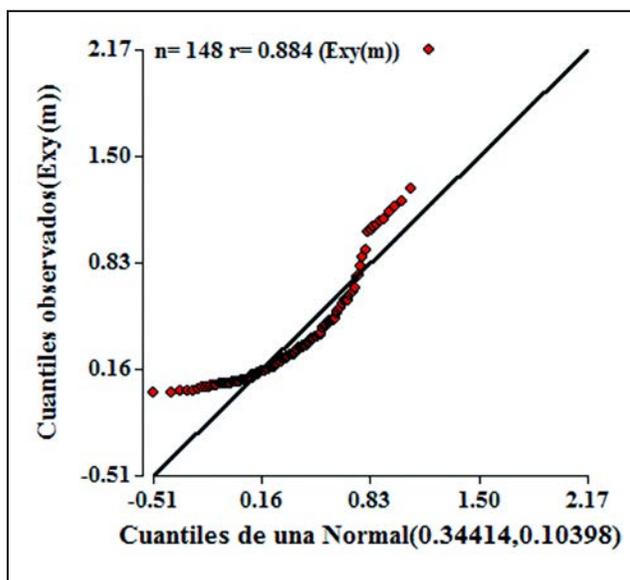


Figura 6. Q-Q plot de los errores circulares xy.

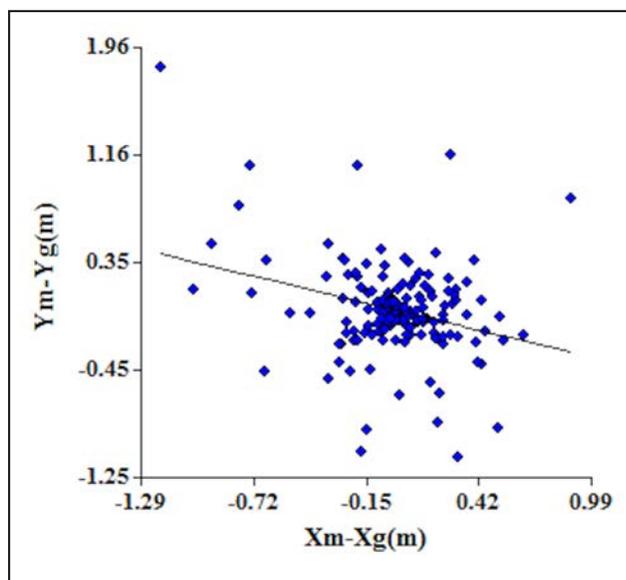


Figura 7. Diagrama de dispersión de los componentes x,y del error circular.

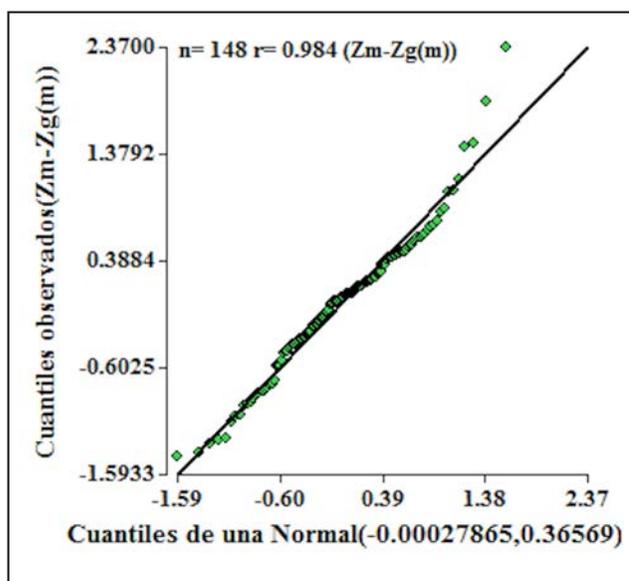


Figura 8. Q-Q plot de los RMSE_z.

Precisión vertical

El gráfico Q-Q plot (Figura 8) y el coeficiente de correlación de Pearson ($r=0,984$) asociado, permitió comprobar que la distribución de los datos observados se ajusta a la teórica (Normal).

La componente vertical del error para el ajuste del bloque de fotografías RMSE_z fue de 0,603 m ecuación (11), mientras que la precisión_{z(95%)} resultó de 1,18 m, ecuación (12).

MAPAS TOPOGRÁFICOS Y MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

Curvas de nivel

Como primera medida, y teniendo en consideración la premisa definida para la tolerancia altimétrica (Quirós Rosado, 2018), se verificó que la relación entre la precisión_z y la equidistancia fijada cumplen con la condición de que el 90% de los PCT deben tener errores menores a un cuarto de la equidistancia; la precisión_{z(95%)} ($= 1,18 \text{ m}$) $< \frac{1}{4}$ equidistancia ($= 5 \text{ m}$).

En la Figura 9 se muestran las curvas de nivel de los planos originales y las generadas por restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969) (Figura 10) adicionadas a las provistas por el IGN, correspondientes al sector próximo a la presa. Puede verse claramente las fuertes discrepancias entre ambas representaciones topográficas, siendo evidentes los errores y el nivel grosero de generalización de las curvas de nivel de los planos originales del embalse.

Modelos topográficos digitales

En la Figura 11 se presenta el mapa topográfico previo, conformado por los datos provistos por el IGN (Figura 3) y las curvas de nivel generadas durante la restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969) (Figura 10). En la Figura 12 se muestra la TIN previa creada a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico previo de la Figura 11. Finalmente, la Figura 13 representa el MDE previa producido a partir de la TIN previo.

Mosaico de fotografías aéreas históricas

Además, utilizando la herramienta de Ortorectificación (RACURS, 2015c), se orto rectificaron cada una de las fotografías

aéreas pancromáticas (1969), las que luego fueron unidas en un mosaico (Figura 14).

Generación del modelo digital de elevaciones para la situación actual

La Figura 15 representa el modelo batimétrico digital actual (MBDa) obtenido mediante interpolación de los datos (puntos) de la Figura 5 y de los vértices de las curvas de nivel de 1.025 y 1.030 m s.n.m. del mapa topográfico previo (Figura 11).

Las curvas de nivel extraídas del modelo batimétrico digital actual (Figura 15), que constituyen el mapa topobatimétrico actual (MTBa) (Figura 16), fueron unidas con las curvas de nivel superiores a la cota 1.030 m s.n.m. del mapa topográfico previo (Figura 11) para configurar el mapa topográfico actual (Figura 17). Posteriormente se usó la TIN actual (Figura 18), obtenida del mapa topográfico actual, para producir el MDE actual, año 2005 (Figura 19).

Volúmenes de agua almacenados en el embalse

Las diferencias en área y volumen entre los MDE previo y MDE actual y la tasa de sedimentación anual se presentan en la Tabla 4, mientras que en la Figura 20 se muestra el MDE de las diferencias entre MDE previo y MDE actual. El MDE de las diferencias resulta muy ilustrativo de los sectores donde ocurren las mayores acumulaciones de material arrastrado por las corrientes superficiales.

Es notable la diferencia en la conformación de ambos deltas, ríos Arias o Arenales y Guachipas (Figura 1), en dos aspectos fundamentales: la potencia del paquete de sedimentos y la configuración del mismo. El delta del río Arias o Arenales presenta un volumen de 121,22 hm³ de sedimentos con un espesor máximo de aproximadamente 21 m (Figura 21) y tiene una configuración más alargada, debido al estrechamiento lateral controlado por las laderas del cordón oriental y por el pie de monte occidental. En contraposición, el río Guachipas discurre sobre un sector amplio del valle con laterales de escasa pendiente, lo que determinó el desarrollo gradual y progresivo de una geoforma deltaica con tipificación de depósito fluvio-lacustre, denominado en pie de ave (Tames, 2017) o delta tipo Gilbert (Gilbert, 1885); el volumen de los depósitos fue estimado en 227,99 hm³, superando en casi el doble al primero, y con un espesor máximo de 15 m (Figura 21), más aplanado que aquel.

Tabla 4. Diferencias en área y volumen entre MDE previo y MDE actual y tasa de sedimentación anual. Referencias: Área 2D, la proyectada sobre el plano; Área 3D, considerando la superficie del modelo topográfico.

MDE	Área 2D (ha)	Área 3D (ha)	Volumen (hm ³)	Año	Tasa de sedimentación (hm ³ /año)
MDE previo	11.640,05	11.824,40	3.251,49	1972	0,00
MDE actual	11.003,45	11.177,02	2.898,52	2005	10,70
Diferencia	636,61	647,37	352,97	33	

En el documento (López et al., 2010) (Pág. 131), se asignan los siguientes datos del embalse: área 117,21 km² y volumen 2.784,3 hm³, ambos a nivel máximo normal (1.037,00 m s.n.m.), verificándose una diferencia con las estimaciones realizadas en el presente trabajo, en área de +1,03 km² y en volumen de +467,19 hm³ (Tabla 4). Es probable que dicha diferencia se

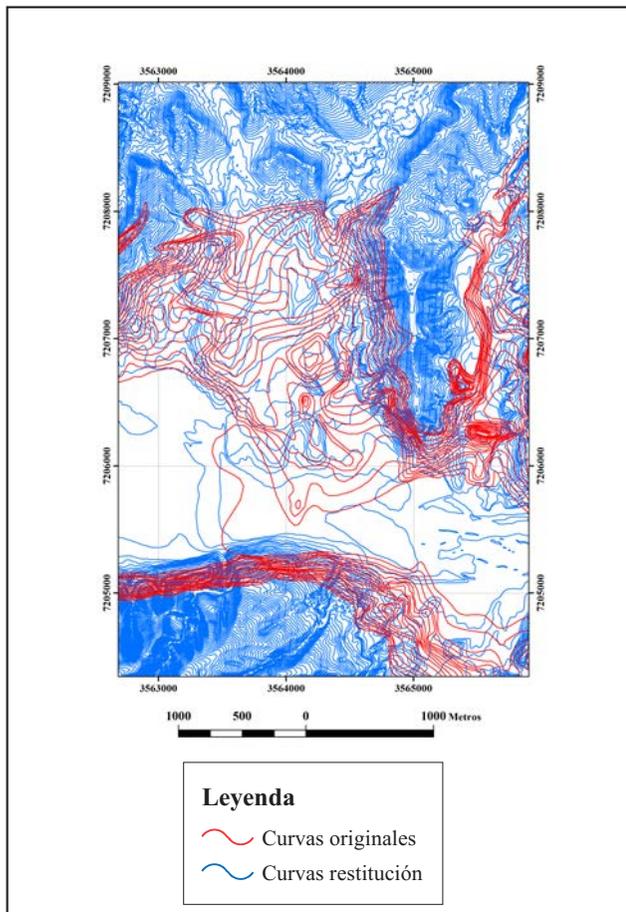


Figura 9. Curvas de nivel de los planos originales y las generadas por restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969). Sector próximo a la presa. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

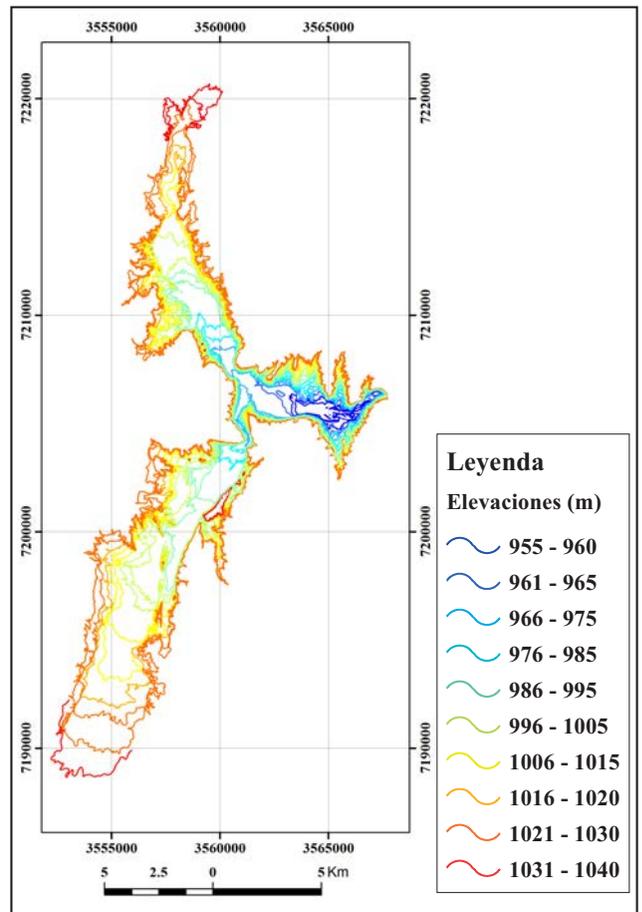


Figura 10. Curvas de nivel generadas por restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969), equidistancia 5 m. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

deba a que los datos consignados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos (López *et al.*, 2010) provengan de una fuente que utilizó las curvas de nivel de los planos topográficos originales del vaso realizados por la empresa Damond - Dinerman y CIA. S.A. (S. G. Mosa & Núñez, 2001). En realidad, las curvas de nivel de dichos planos deben considerarse como curvas de forma ya que son muy generales, adolecen de errores groseros y no se conciben con la topografía real.

Es notable la diferencia en la conformación de ambos deltas, ríos Arenales y Guachipas, en dos aspectos fundamentales: en cuanto a la potencia del paquete de sedimentos el primero supera al segundo en aproximadamente en 6 m y tiene una configuración más alargada; por otra parte, considerando el volumen de los depósitos el segundo prevalece sobre el primero en casi el doble, 106,77 hm³ y presenta un arreglo espacial más extendido lateralmente.

Obviamente, la diferencia en la conformación de los deltas es debida a las características topográficas de ambas redes de avenamiento en los sectores de afluencia. La desembocadura del río Arenales sobre el embalse presenta un estrechamiento controlado por las laderas del cordón oriental y por el pie de monte occidental. En contraposición, el río Guachipas discurre sobre un sector amplio del valle con laterales de escasa pendiente.

CONCLUSIONES

El material aerofotográfico histórico puede ofrecer datos muy valiosos para la reconstrucción de las características topográficas y de las condiciones medioambientales de sitios que en la actualidad fueron drásticamente modificados. En este sentido, se hace imprescindible la adecuada conservación del material histórico y su correcta catalogación por parte de las instituciones a su cargo, para que estén disponibles a los usuarios que lo requieran.

A pesar de la mala calidad de las fotografías aéreas pancromáticas (1969), de no contar con los datos de calibración de la cámara y de la incertidumbre en la localización y coordenadas de algunos PCT se pudo obtener un modelo topográfico digital de la condición previa al llenado del embalse, que resultó adecuado considerando las precisiones (precisión_{±(95%)} = 0,81 m, precisión_{±(95%)} = 1,18 m) alcanzadas durante todo el proceso de ajuste del bloque de fotografías.

Los sistemas fotogramétricos digitales (software libre como PHOTOMOD Lite © Racurs (RACURS, 2015c) disponibles actualmente para computadoras personales, ofrecen un gran abanico de herramientas informáticas para la restitución y georeferenciación de imágenes provenientes de diferentes sensores y con accesorios de bajo costo.

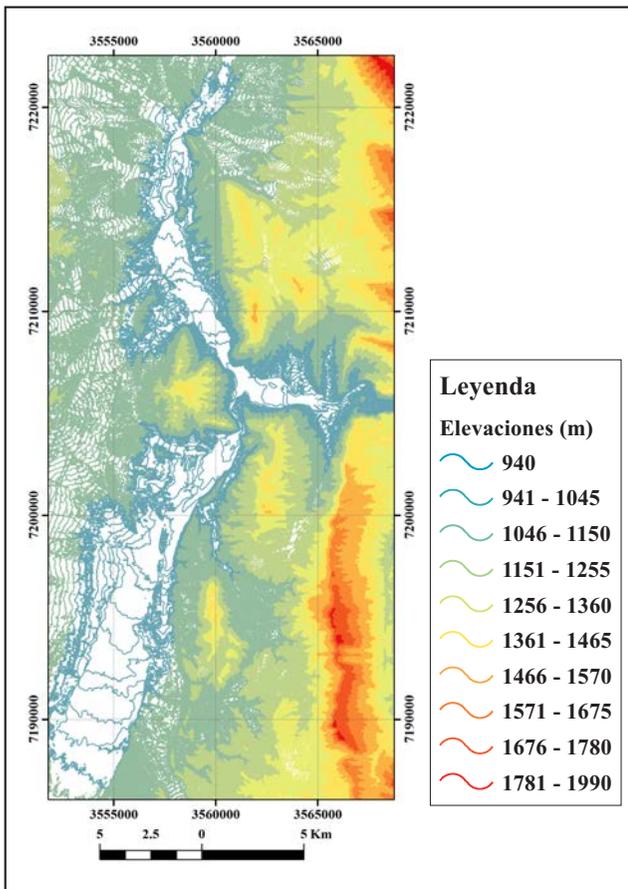


Figura 11. Mapa topográfico previo, equidistancia 5 m. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

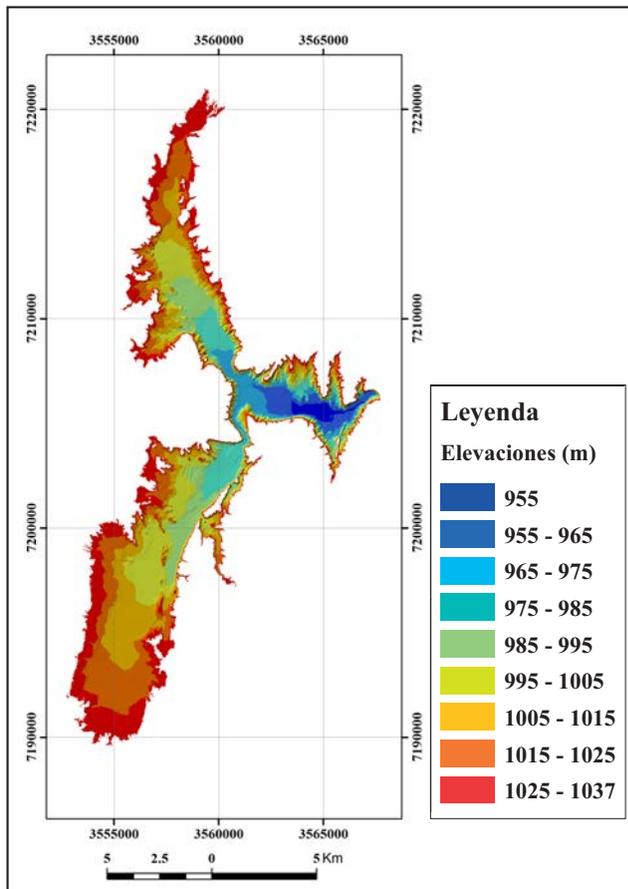


Figura 12. TIN previa. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

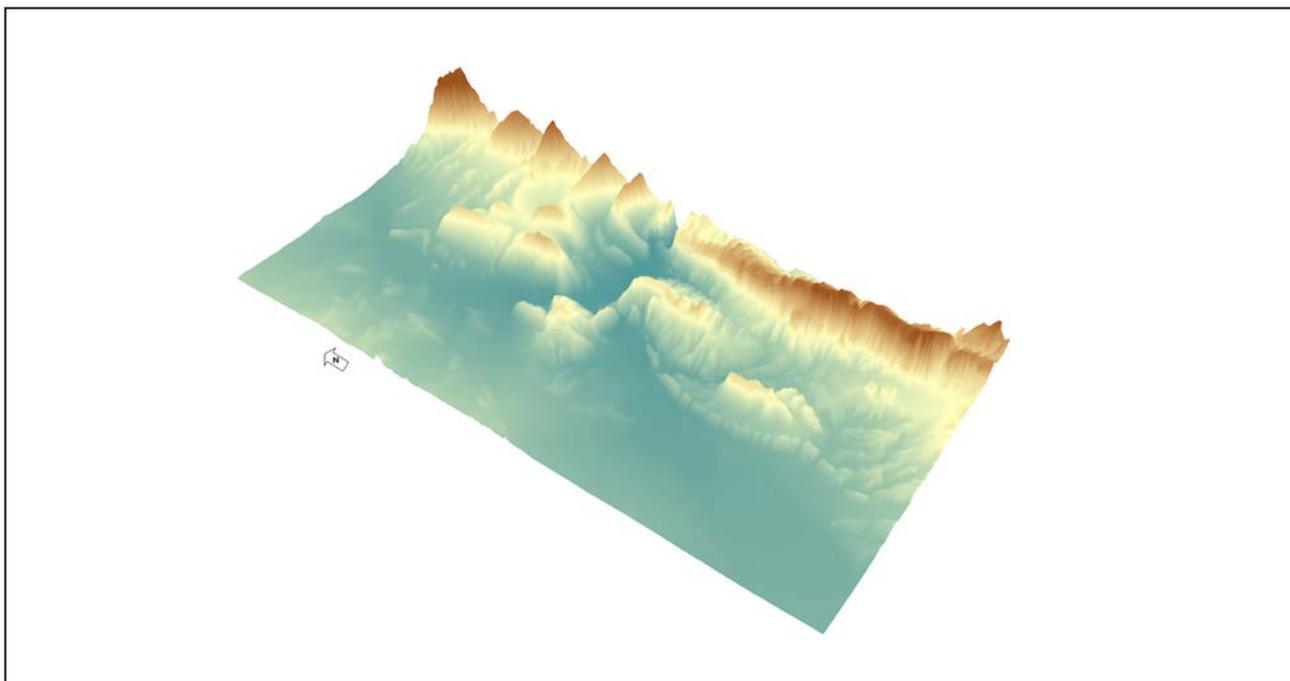


Figura 13. MDE previo, vista 3D, exageración vertical 5x.

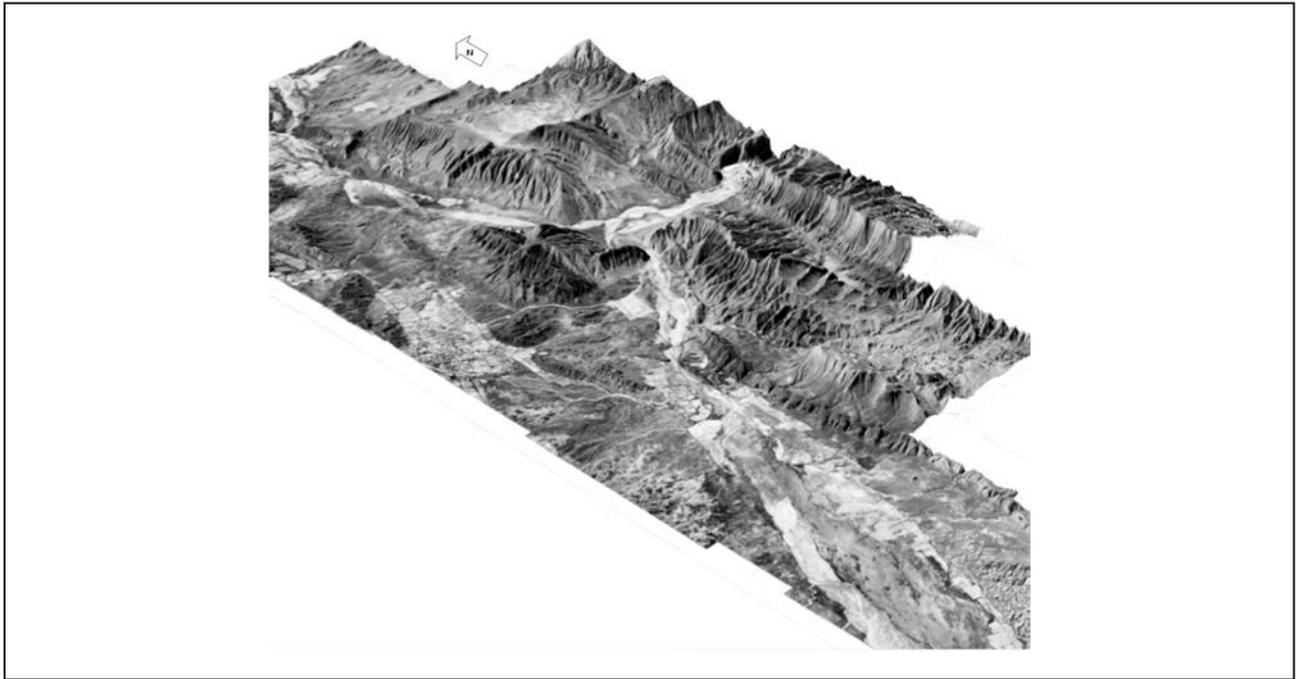


Figura 14. Vista en 3D del mosaico de las fotografías aéreas pancromáticas orto rectificadas (1969). Elevaciones provistas por el MDE previo.

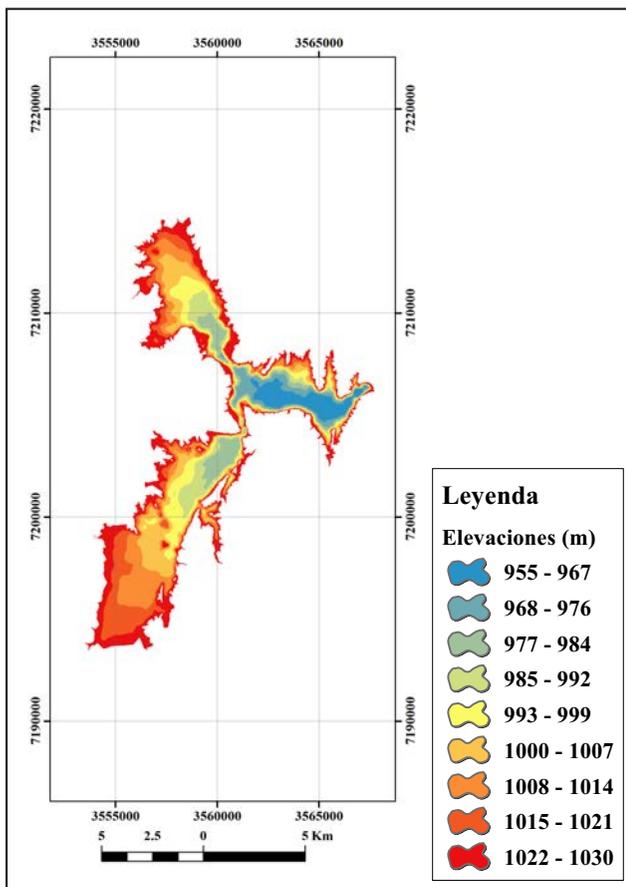


Figura 15. MBDa. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

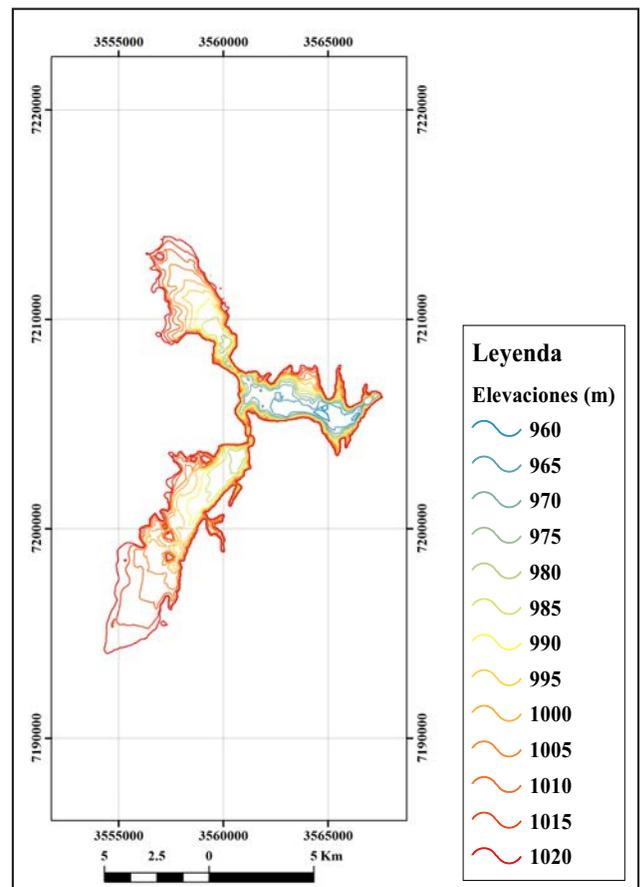


Figura 16. MTBa. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

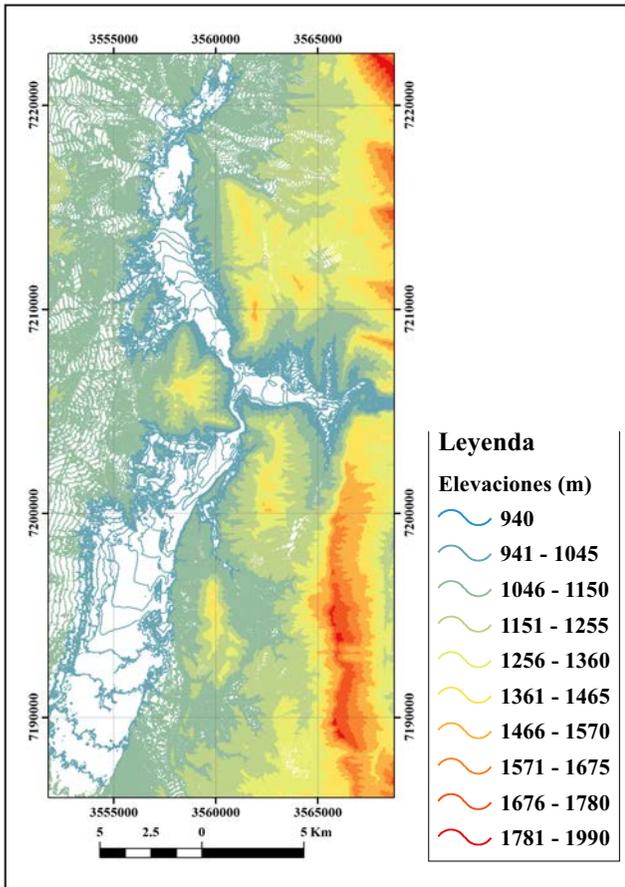


Figura 17. Mapa topográfico actual, equidistancia 5 m. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

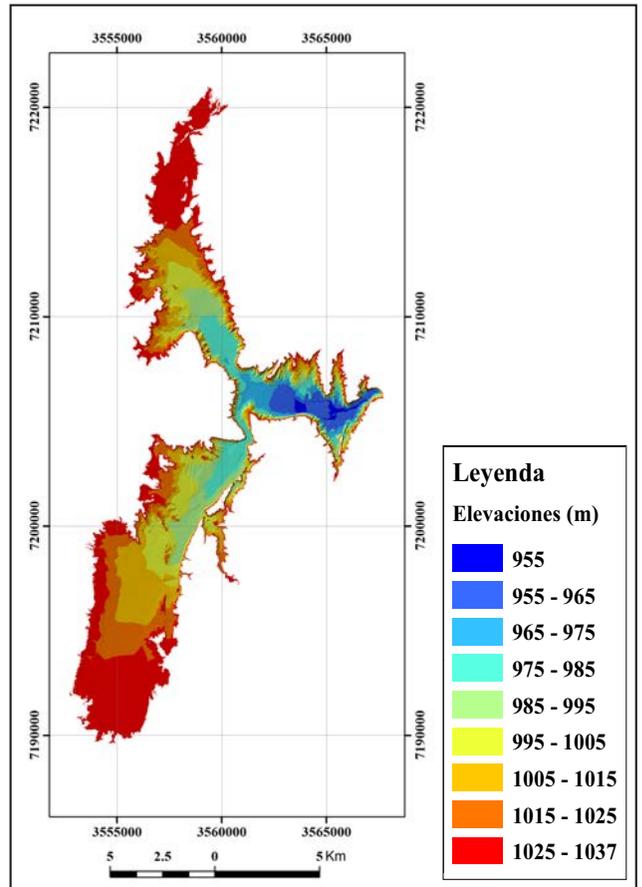


Figura 18. TIN actual. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

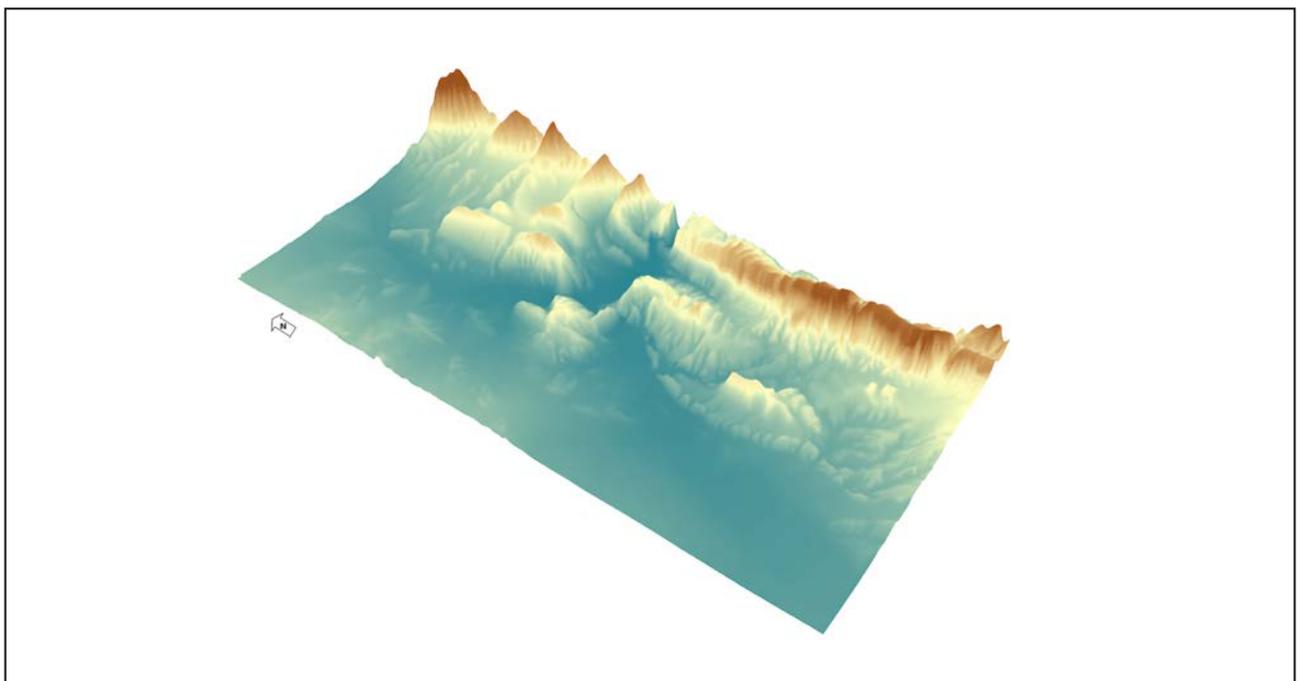


Figura 19. MDE actual, año 2005. Vista 3D, exageración vertical 5x.

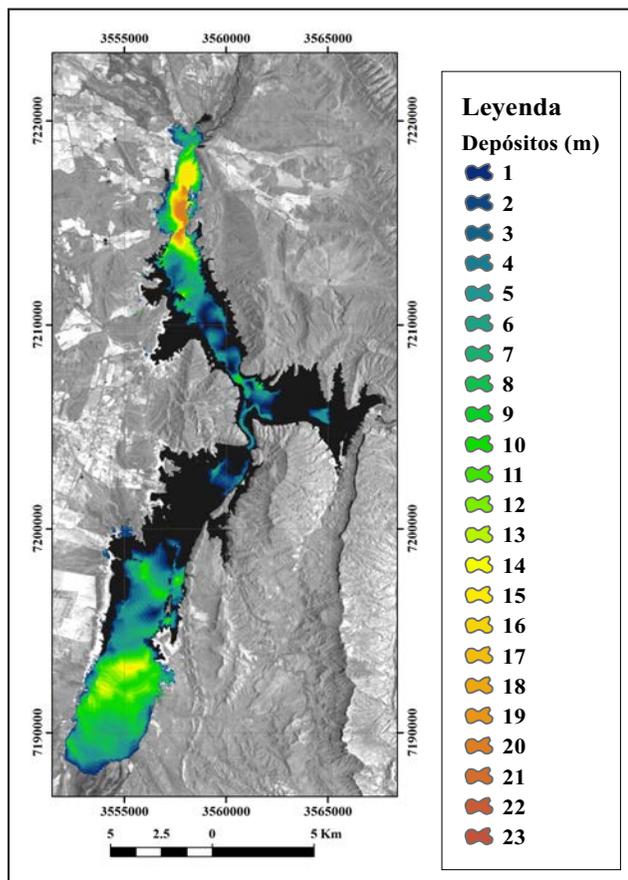


Figura 20. MDE de las diferencias. Coordenadas Gauss-Krüger Faja 3, POSGAR 07.

Las características de la topografía subacuática en los embalses son registradas mediante levantamientos batimétricos con diferentes técnicas e instrumentales (S. G. Mosa & Núñez, 2001), (S. G. Mosa & Núñez, 2005), (Ballester Mora & García Sala, 2010), (Álvarez et al., 2001).

Las herramientas de modelado digital provistas por el software ArcGis © 10 (ESRI, 2010) permitieron generar por interpolación los MDE, realizar la operación de diferencia entre el MDE actual y MDE previo, calcular el área 2D y 3D, los volúmenes de los depósitos y plasmar las salidas gráficas.

El conocimiento detallado de las características topográficas originales de sitios inundados por la construcción de presas permite la evaluación de los espesores de sedimentos depositados en el fondo de los embalses y en los sectores deltaicos a la entrada de las principales redes de avenamiento. Lo mencionado permite calcular, también, la tasa de sedimentación anual y, consecuentemente, la vida útil de un embalse con mayor fidelidad.

El estudio y discernimiento de la configuración de los deltas en el ingreso de los cursos de agua sobre los embalses, ofrece información substancial para la cuantificación y el análisis de la dinámica de la carga sólida de las cuencas superficiales de aporte; esto último resulta muy significativo también para la verificación de los modelos para la estimación de los caudales sólidos transportados por las redes de avenamiento superficial que desembocan en un embalse (G. F. Mosa, 2012), (Mutiar Basuki, 2017), (Tames, 2017), (Romero, 2017).

A partir de la restitución de las fotografías aéreas pancromáticas (1969) y de los datos de la batimetría realizada en 2005 (S. G. Mosa & Núñez, 2005), fue posible establecer el volumen

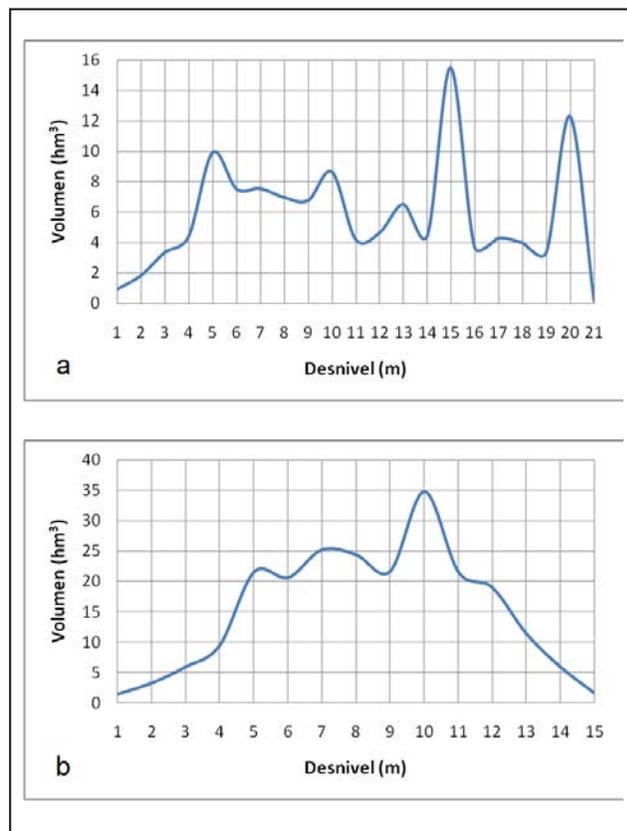


Figura 21. Volúmenes de sedimentos acumulados en función del espesor de los mismos: a, río Arias o Arenales; b, río Guachipas.

de sedimentos y la conformación deltaica de los ríos Arias o Arenales y Guachipas: el primero muestra un delta con una configuración más alargada, estrechada por las geoformas laterales y cuyo volumen fue estimado en 121,22 hm³ con un espesor máximo de aproximadamente 21 m; el segundo, al discurrir sobre un sector amplio del valle, conformó un depósito fluvio-lacustre, denominado en pie de ave (Tames, 2017) o delta tipo Gilbert (Gilbert, 1885), con una potencia máxima de 15 m y un volumen que casi duplica al primero, 227,99 hm³.

La diferencia en volumen de almacenamiento para el período 1972-2005, a cota 1.037,00 m s.n.m., de 352,97 hm³ representa una pérdida del 10,86% de la capacidad del embalse. Por su parte, la tasa de sedimentación anual, estimada en 10,7 hm³, constituye una merma de la capacidad anual del 0,33%. La discrepancia de 3,76 hm³, entre volumen total de material depositado en el embalse (352,97 hm³) y la suma de las masas correspondientes a ambos deltas (349,21 hm³), es debida a la acumulación de sedimentos en otros sectores del vaso.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Isabel Sassone (Dirección de Sensores Remotos, IGN), por proveer las fotografías aéreas y los modelos digitales de elevaciones del levantamiento del año 2014. Al Ing. Miguel Menéndez y al Dr. Rodolfo Amengual (FCN, UNSa) por el aporte de datos sobre las fotografías aéreas históricas. Al Lic. Miguel Aguirre (FCN, UNSa) por su colaboración en la configuración de la estación fotogramétrica digital. A la empresa RACURS (www.racurs.ru) por ofrecer la versión libre del software PHOTOMOD.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ÁLVARES, M. T., FERNANDES, S., ANA CATARINA, M., PIMENTA, M. T., & VERÍSSIMO, M. R. (2001).
Monitorização batimétrica em albufeiras.
Retrieved from www.inag.pt
- BALLESTERO MORA, L., & GARCÍA SALA, D. (2010).
Estudio batimétrico con ecosonda multihaz y clasificación de fondos.
Universitat Politècnica de Catalunya.
- BALZARINI, M. G., GONZALEZ, L., TABLADA, M., CASANOVES, F., DI RIENZO, J. A., & ROBLEDO, C. W. (2008).
InfoStat Software Estadístico Manual del Usuario.
Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- DEUSTCHER KALIBRIERDIENTS DKD-K-05202. RMK TOP 15. (2002).
Obercochen.
- DI RIENZO, J. A., CASANOVES, F., BALZARINI, M. G., GONZALEZ, L., TABLADA, M., & ROBLEDO, C. W. (2011).
InfoStat. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. }
Retrieved from <http://www.infostat.com.ar/>
- ELIAS, J. (2008).
Complejo Hidroeléctrico Cabra Corral.
Retrieved May 24, 2018, from <http://desarrolloydefensa.blogspot.com.ar/search/label/Energía?updated-max=2008-04-10T10:21:00-07:00&max-results=20&start=634&by-date=false>
- EPSON. (2004).
Epson Expression 10000XL.
Escáner para gráficos en color Manual del usuario.
- ESRI. (2010).
ArcGis © 10.
Retrieved from <https://www.esri.com/>
- FGDC. (1998).
Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3. Reston, Virginia.
Retrieved from <http://fgdc.er.usgs.gov/fgdc.html>
- GARCÍA FLORES, P., & ORTIZ DE ELGUEA, E. (2012).
Influencia del GSD en la orientación de un bloque fotogramétrico.
Vizcaya.
- GILBERT, G. K. (1885).
The topographic features of lake shores.
(USGS, Ed.), *Annual Report. Retrieved from [//catalog.hathitrust.org/Record/001520358](http://catalog.hathitrust.org/Record/001520358)*
- GREENWALT, C. R., & SHULTZ, M. E. (1968).
Principles of Error Theory and Cartographic Applications.
St. Louis, Missouri.
- IGN. (n.d.).
Vuelos Fotogramétricos.
Retrieved August 27, 2018, from <http://www.ign.gob.ar/category/temática/fotogrametria/vuelos-fotogrametricos>
- IGN. (2014a).
Modelo de elevaciones rápido.
2014 Salta. Sector 2. Buenos Aires. Retrieved from <http://www.ign.gob.ar/category/temática/geodesia/mde-ar>
- IGN. (2014b).
Mosaico de ortofotos rápidas.
2014 Salta. Sector 2. Buenos Aires. Retrieved from <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Fotogrametria/mapaSegunCubrimientoAerofotografico>
- IGN. (2018).
Sistemas Aerofotogramétricos.
Retrieved June 4, 2018, from <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Fotogrametria/VuelosFotogrametricos>
- LAURIA, E. A., GALBAN, F. M., BRUNINI, C., FONT, G., RODRIGUEZ, R., & PACINO, C. (2002).
The Vertical Reference System in the Argentine Republic.
In H. Drewes et al. (Ed.), Vertical Reference Systems. International Association of Geodesy Symposia (Vol. 124, pp. 11–15). Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_3
- LIZANA, C. (2011).
Utilización de PHOTOMOD como estación fotogramétrica digital (DPS).
San Juan. Retrieved from http://www.racurs.ru/www_download/Contest/results/Argentina.pdf

- LÓPEZ, F., RODRÍGUEZ, A., & DÖLLING, O. R. (2010).
Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina.
(O. R. Dölling, Ed.) (1st ed.). Buenos Aires: Subsecretaría de Recursos Hídricos.
- MENA, M. (2016).
La Estadística como Herramienta en Ciencias de la Tierra.
(Librería Akadia, Ed.) (1st ed.). Buenos Aires.
- MOSA, G. F. (2012).
Estimación de la producción de sedimentos en la cuenca del Río Arias-Arenales aplicando el modelo de Miraki y análisis del nivel de aporte en la depositación histórica del Dique Cabra Corral.
Universidad Nacional de Salta.
- MOSA, S. G., & NÚÑEZ, V. (2001).
Batimetría y estudio de colmatación del embalse Cabra Corral, Provincia de Salta.
Salta.
- MOSA, S. G., & NÚÑEZ, V. (2005).
Batimetría y estudio de colmatación del embalse Cabra Corral, Provincia de Salta.
Salta.
- MUTIARA BASUKI, T. (2017).
Water and sediment yields from two catchments with different land cover areas.
J. Degrad. Min. Land Manage, 4(4), 853–861. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2017.044.853>
- OLMOS, L. A., REUTER, A. F., PILÁN, M. T., FARIAS, H. D., ACOSTA, C., & MIRANDA, M. (2011).
Estudio Batimétrico de un embalse de montaña de morfología compleja. Cabra Corral, Salta.
In C. M. G. Hector Daniel Farias, José Daniel Brea (Ed.), *Hidráulica Fluvial: Procesos de Erosión y Sedimentación, Obras de Control y Gestión de Ríos* (p. 16). Santiago del Estero.
- PANEDILE. (2018).
Un complejo hidroeléctrico para la generación de energía y el riego de 100.000 hectáreas del Noroeste Argentino.
Retrieved May 23, 2018, from <http://site.panedile.com/cabra-corral-faltan-textos-x-diferentesetapas/>
- QUIRÓS ROSADO, E. (2018).
Introduction to Applied Photogrammetry and Cartography for Civil Engineering.
Cáceres.
- RACURS. (2015a).
PHOTOMOD. Digital Photogrammetric System. User Manual. Aerial triangulation. Version 6.0.2. Moscow: RACURS.
Retrieved from <http://www.racurs.ru/>
- RACURS. (2015b).
PHOTOMOD. Digital Photogrammetric System. User Manual. Block adjustment. Version 6.0.2. Moscow: RACURS.
Retrieved from <http://www.racurs.ru/>
- RACURS. (2015c).
PHOTOMOD 6.0.2.1823 Lite x64©. RACURS.
Retrieved from <http://www.racurs.ru>
- ROMERO, M. L. (2017).
Colmatación en diques y técnicas para su control basadas en la estimación del aporte anual de sedimentos de la cuenca alimentadora.
Universidad Nacional de Salta.
- TAMES, S. E. G. (2017).
Estimación del aporte de sedimentos en la subcuenca Las Conchas-Guachipas aplicando el modelo de Miraki y análisis del nivel de aporte en la depositación histórica del Dique Cabra Corral.
Universidad Nacional de Salta.



Características y evolución de manantiales captados para usos múltiples en el distrito Vichigasta, La Rioja, Argentina

Features and evolution of springs for multiple purposes in the Vichigasta district, La Rioja, Argentina

Silva, Santiago H.^{1, 2} ✉ - Poveda, María E.³ - Rodríguez, Corina I.¹ - Miguel, Roberto E.⁴

Recibido: 1 de junio de 2021 • Aceptado: 21 de septiembre de 2021

Resumen

En regiones áridas o semiáridas la presencia de agua para el desarrollo de actividades humanas es relevante, pero su calidad es fundamental en función de los usos que pretendan desarrollarse. En la provincia de La Rioja es escasa y poco actualizada la información sobre la disponibilidad y calidad del agua subterránea utilizada para riego o consumo humano dentro de determinados departamentos y distritos de riego, como es el caso de los manantiales de Vichigasta. El objetivo de este trabajo es analizar las características generales y la evolución del recurso hídrico subterráneo que aflora en manantiales y su evolución temporal en relación a estudios previos, evaluando posibles impactos de las actividades antrópicas realizadas en sus inmediaciones. Se recopilaron datos antecedentes del subsistema natural, se realizaron aforos y una caracterización físico-química bajo normas estandarizadas de conductividad eléctrica, iones mayoritarios y fluoruro. Los resultados indicaron una merma general de los caudales erogados e inclusive el agotamiento de 15 manantiales. La totalidad de los manantiales presentan aguas sulfatadas a excepción del manantial Comunal Chima, el cual evolucionó hacia aguas cloruradas que podrían asociarse a impactos por retornos de riego y la extracción de agua mediante pozos de bombeo en sus inmediaciones. Resulta necesario avanzar en estudios de detalle que permitan elaborar un conjunto de pautas tendientes a la gestión integral del recurso hídrico en esta región.

Palabras claves: Manantiales, Hidrodinámica, Hidroquímica, Impactos Ambientales

1. Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires;
 2. Becario doctoral Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires;
 3. Laboratorio de Alta Complejidad, Universidad Nacional de Chilecito;
 4. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Catamarca La Rioja. Estación Experimental Agropecuaria Chilecito.
- ✉ silvasantiago2103@gmail.com

Abstract

In arid or semi-arid regions the presence of water for the development of human activities is relevant, but its quality is essential depending on the uses that are intended to be developed. In the province of La Rioja, information on the availability and quality of groundwater used for irrigation or

human consumption is scarce and not very updated within certain departments and irrigation districts, such as the springs of Vichigasta. The objective of this work is to analyse the general characteristics and evolution of the groundwater resources that outcrop in springs and their temporal evolution in relation to previous studies, evaluating possible impacts of anthropic activities carried out nearby. Background data on the natural subsystem were collected, gauging and physical-chemical characterization were performed under standardized norms for electrical conductivity, majority ions and fluoride. The results indicated a general decrease in the flows and even the depletion of 15 springs. All of the springs show sulfated water except for the Chima Communal spring, which evolved towards chlorinated water that could be associated with impacts from irrigation returns and water extraction by means of pumping wells nearby. It is necessary to advance in detailed studies to develop a set of guidelines for the integrated management of water resources in this region.

Keywords: Springs, Hydrodynamics, Hydrochemistry, Environmental Impacts.

INTRODUCCIÓN

Los manantiales de la localidad de Vichigasta, en la provincia de La Rioja, Argentina, han sido tradicionalmente utilizados para riego por parte de pequeños productores de agricultura familiar. La actividad económica regional se basa en la producción primaria, principalmente el cultivo de olivo, vid, otros frutales de menor relevancia y hortalizas (Miguel et al., 2018). Para el productor agrícola de la zona árida y semiárida, el agua de riego tiene un valor igual o mayor que el recurso tierra, debido a que de la dotación, frecuencia y calidad del recurso utilizado depende la cantidad y calidad de producción. Para técnicos y productores, esta es la limitante fundamental para la actividad agrícola en zonas como el Valle Antinaco-Los Colorados (Cubiló et al., 2015).

Conocer y comprender el estado y dinámica del recurso hídrico, constituye la base de todo proceso de evaluación y gestión; sin embargo, sobre los manantiales de Vichigasta existe limitada información sobre sus características hidrológicas, situación que dificulta conocer el estado del sistema hídrico y su evolución en el tiempo. Aun así, se encuentran algunas mediciones puntuales y fragmentadas realizadas por Victoria (1962), Rocca et al. (1975) y García Perón (1979), siendo necesario destacar trabajos como el de Sosic (1971) donde se desarrolla para el año 1961 el único aforo puntual de la totalidad de los manantiales de la localidad. Por otra parte, Miguel et al. (2016) describen en el área de Vichigasta procesos de explotación intensiva del sistema acuífero, con incremento de tenores salinos por retornos de riego.

Miguel et al. (2018) explica que los manantiales se captan a partir de la construcción de drenes horizontales (qanats) para alcanzar el nivel freático y que luego de un tiempo, cuando los caudales disminuyen, se prolongan para obtener nuevamente el caudal deseado. A su vez, advierte que en el manantial Comunidad de Barrio Chima esta situación podría estar agravada debido al establecimiento, aguas arriba de los drenes, de un emprendimiento olivícola y dos pozos de bombeo para riego. Sumado a ello, en las inmediaciones del manantial se construyó un pozo de bombeo utilizado para el consumo humano. Esta situación impactaría tanto en la capacidad drenante (capacidad de captar y erogar agua subterránea) y la consiguiente disponibilidad de agua, como también en los procesos de recarga del acuífero con retornos de riego.

En este contexto, sumado a la preocupación manifiesta de los productores por atravesar largos periodos de sequía principalmente en época estival (Moyano, 2011), es que esta investigación busca analizar las características generales y la evolución

del recurso hídrico subterráneo que aflora en manantiales y su evolución temporal en relación a estudios previos, evaluando posibles impactos de las actividades antrópicas realizadas en sus inmediaciones.

ÁREA DE ESTUDIO

El Distrito de Vichigasta (Departamento de Chilecito) se emplaza dentro de la Cuenca Antinaco-Los Colorados, la cual posee una superficie de 2.965 km² en su valle central (Victoria, 1962) y se desarrolla con orientación NNO-SSE entre las Sierras del Famatina al Oeste y las Sierras del Velasco al Este. El límite Norte se encuentra en la localidad de Pituil mientras que el límite Sur se encuentra en la Formación de Los Colorados (Sosic, 1971) (Figura 1).

Según Auge et al. (2006), la Cuenca Antinaco-Los Colorados pertenece a la Región Hidrogeológica de Sierras Pampeanas y sus Valles, sin embargo los aportes realizados por Candiani et al. (2011) sobre las características distintivas en su composición geológica sugieren que esta región debe denominarse como Región de Famatina, estando por fuera de las Sierras Pampeanas.

Su clima es continental, templado cálido, semiárido a árido (Rosa, 2000). Según el Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N) la precipitación media anual es de 189 mm (período 1981-1990). A su vez, para los años de interés 1960-1961 se determinaron precipitaciones anuales de 219 y 183 mm respectivamente (Costa y Minetti, 2001) y para los años 2018-2019 de 232 y 230 mm anuales (Datos inéditos sistematizados en Estación Meteorológica Automática de INTA E.E.A. Chilecito). En la Figura 2 se presenta la distribución de las precipitaciones a lo largo del año. A su vez, la evapotranspiración potencial en el valle es de 1.193 mm, lo que determina un déficit hídrico a lo largo de todo el año (Costa y Minetti, 2001).

La localidad de Vichigasta se encuentra sobre el flanco oriental de la Sierra de Sañogasta, presenta una geomorfología accidentada derivada de procesos tectónicos donde las dislocaciones asociadas a fallas originaron afloramientos del Cuaternario inferior, asentados sobre un nivel base impermeable de areniscas y arcilitas rojizas perteneciente a Cuenca de Paganzo (Azcuay et al., 1987).

El agua que proviene del abanico aluvial de la Sierra de Sañogasta, infiltra y se acumula sobre los estratos impermeables, los cuales están inclinados en dirección contraria al sentido de flujo subterráneo, provocando que circule a través de un paleo-relieve y aflore originando manantiales a lo largo de la falla (Sosic, 1971). Durante la construcción del pozo de bombeo localizado 2000 m aguas arriba de los manantiales, sobre el ápice

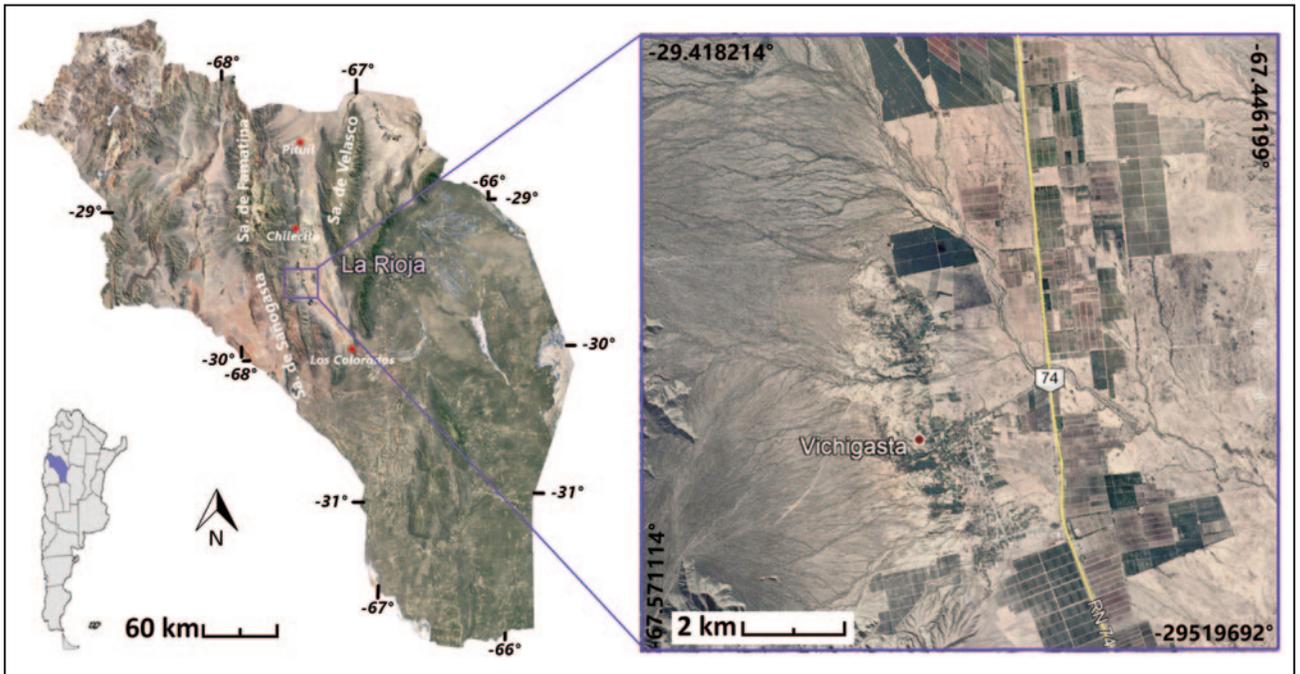


Figura 1. Ubicación geográfica del Distrito Vichigasta, provincia de La Rioja, Argentina.

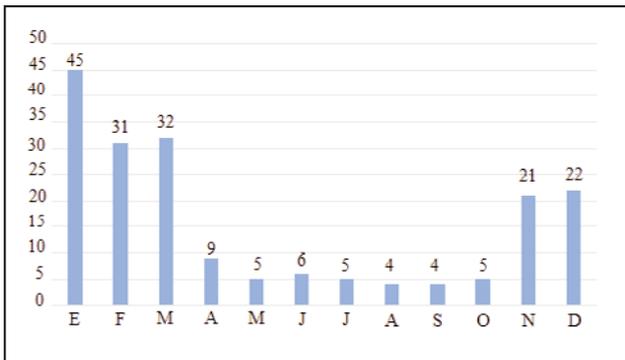


Figura 2. Distribución de precipitaciones según Chilecito Aero S.M.N (1981-1990).



Figura 3. Afloramientos de basamento en inmediaciones de manantiales.

del abanico aluvial, se determinó la profundidad del basamento rocoso a 146 metros de profundidad (ConHidro S.R.L, 2017) mientras que un pozo localizado en el área superior de la escarpa de falla, donde afloran los manantiales, alcanzó los 20 metros de profundidad antes de alcanzar el basamento rocoso, con un nivel estático de 8 m.h.b.p. (V. Ormeño, Comunicación Personal, Marzo de 2021) Este basamento impermeable de areniscas y arcilitas rojizas, aflora en inmediaciones de los manantiales (Figura 3).

Según Miguel et al. (2018) se considera a dichos manantiales como “manantial enterrado” o de tipo hipocreno (Springer y Stevens, 2009) presentando niveles de agua que se aproximan, pero no alcanzan la superficie. La descarga de estos manantiales es lo suficientemente baja, por lo que se puede evapotranspirar

en su totalidad y no presentar una expresión superficial. A fin de acceder al recurso, los pobladores realizan obras de captación (drenes horizontales) en el bordo desde la superficie hasta y debajo del nivel freático, obteniendo así un flujo de agua que satisfaga la demanda para múltiples usos (agrícola ganadero privado y comunal, consumo humano, fabricación o elaboración de productos comestibles y de la construcción, entre otros), siendo este recurso la principal fuente de agua que sustenta la actividad productiva de pequeños productores y la agricultura familiar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente se realizó la búsqueda de información antecedente en relación al medio físico-natural. Durante tres jornadas

de campo desarrolladas durante el mes de enero y febrero de 2019 se coordinó junto con referentes locales la visita a manantiales públicos y privados relevados por *Sosic (1971)*, localizando los puntos de aforo. Se efectuó el aforo semanal durante tres meses desde el 31 de enero al 25 de Abril de 2019 en 12 manantiales seleccionados en base a tres cualidades: que tengan un uso exclusivo agrícola y ocasional para consumo humano; que el acceso sea apto para vehículos de tracción simple o no demore más de 20 minutos a pie; que existan potenciales peligros en el acceso (animales o personas hostiles que no permitieran realizar los aforos correspondientes). Para la estimación del caudal se utilizaron tres métodos de aforo en virtud de las posibilidades de cada canal: micromolinete Global Water PF-111 (Figura 4), flotador de superficie y volumétrico con recipiente de volumen conocido. Paralelamente, se realizó una caracterización físico-química básica de campo con la medición in situ de temperatura (°C), pH (unidad de pH), y conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) con equipo multiparamétrico Hanna 9811-5 calibrado con soluciones específicas antes de cada salida (Figura 4).

En abril de 2019 se incorporaron 5 manantiales a los 12 seleccionados previamente debido a que fueron considerados relevantes para su análisis en laboratorio (uso asociado a riego y consumo humano). En los 17 manantiales se obtuvieron muestras de agua para determinar, además de los parámetros de campo, iones mayoritarios y fluoruro bajo normas estandarizadas *APHA (2012)* (Figura 4). Los datos se analizaron estadísticamente bajo Software Microsoft Excel® y se representaron bajo diagrama de Piper y Riverside en Software libre EASYQuim 4.0 (*GHS, 2002*).

En adición, se estableció el límite de la cuenca que alimenta la zona de los manantiales de Vichigasta, identificando a través de imágenes satelitales las divisorias de agua pertenecientes al sistema de subcuencas desarrolladas sobre el abanico aluvial de la Sierra de Sañogasta y efectuando su cierre donde se encontraría la falla, alcanzando así un área de 294 km². También se efectuó una estimación de la recarga potencial considerando que el

10 % de lo precipitado recarga el sistema hídrico subterráneo en base al criterio establecido por *Sosic (1971)* para la Cuenca Antinaco-Los Colorados.

Para evaluar la calidad química de las aguas subterráneas erogadas por los manantiales se los comparó con límites fijados por el *Código Alimentario Argentino (2012)* para agua potable. Por otra parte, se realizó el análisis particular de la evolución del Manantial Chima con datos antecedentes relevados por la Estación Experimental Agropecuaria INTA-Chilecito desde 2015 hasta 2019.

Este estudio presenta una serie de limitaciones que indefectiblemente influyen en el análisis de la situación y de las interpretaciones que se efectuarán, estas son: ausencia de información meteorológica histórica y de estaciones meteorológicas en funcionamiento en el área de estudio; inexistencia de antecedentes sobre parámetros hidrogeológicos (transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento); tiempo limitado de análisis de caudales en manantiales, ya que el trabajo se efectúa desde enero a abril de 2019 no abarcando un ciclo hidrológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del conjunto de 30 manantiales relevados por *Sosic (1971)* se identificaron y georreferenciaron un total de 23, debido a que los restantes se encuentran actualmente agotados. A su vez, durante el reconocimiento se localizaron cinco nuevas captaciones (Figura 5).

Solo tres manantiales comunales abarcan a la mayoría de los productores denominados localmente como: La Común-El Totoral, Los Altos y Comunidad de Barrio Chima. Los caudales erogados desde los manantiales se distribuyen por sistemas de canales de piedra cementados que atraviesan la localidad en el sentido de la pendiente topográfica (Figura 6). Por el contrario, los manantiales de uso privado presentan estanques y sistemas de conducción subterránea cuando el predio se encuentra alejado de la zona de surgencia natural de los manantiales.

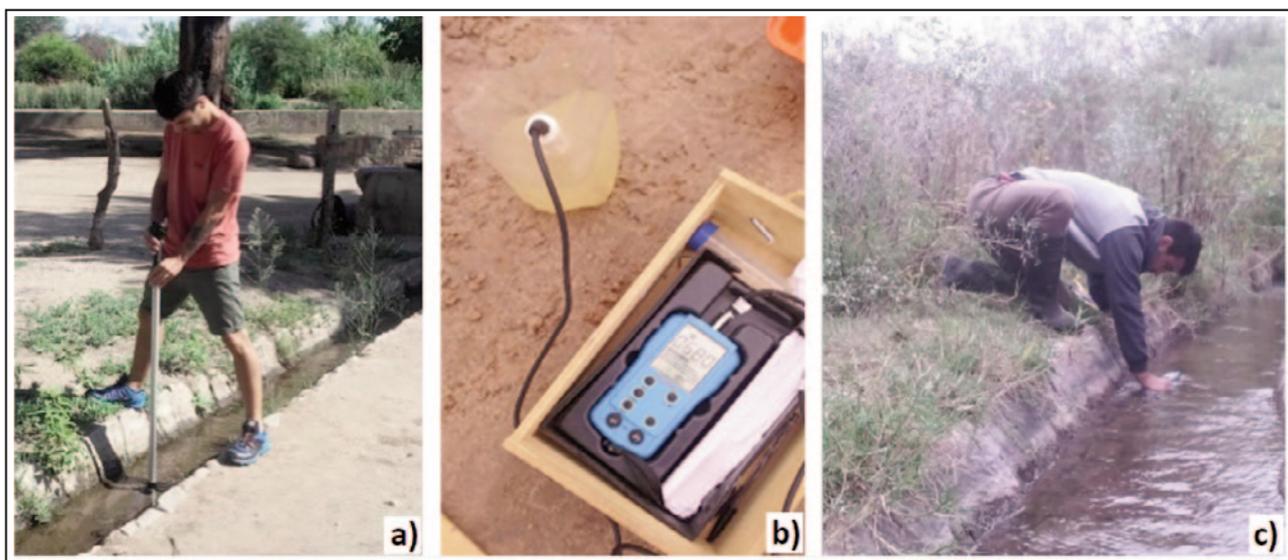


Figura 4. a) Aforo de caudal por micromolinete; b) Caracterización físico-química de campo; c) Obtención de muestra de agua para análisis físico-químico.

Se destaca que de todos los manantiales aforados solo el manantial Rivas (n°4) y La Común (n°10) incrementaron el caudal erogado con respecto a sus datos antecedentes. Los caudales medios del período presentaron valores máximos de 25,8 (L seg⁻¹) en el manantial n°10, ubicado en el centro de la localidad, y mínimos de 0,02 (L seg⁻¹) en los manantiales situados cercanos a los extremos Norte (manantial n°8 “Abalay”) y Sur

(manantial n°26 “P. Miguel”) del área de estudio respectivamente. Por otra parte, se advierte un marcado cambio en los caudales de los manantiales comunales Los Altos (n°9) y La Común (n°10), en principio se considera que, como describe *Miguel et al. (2018)*, se debe en parte a la falta de mantenimiento de los drenes horizontales utilizados para la captación.

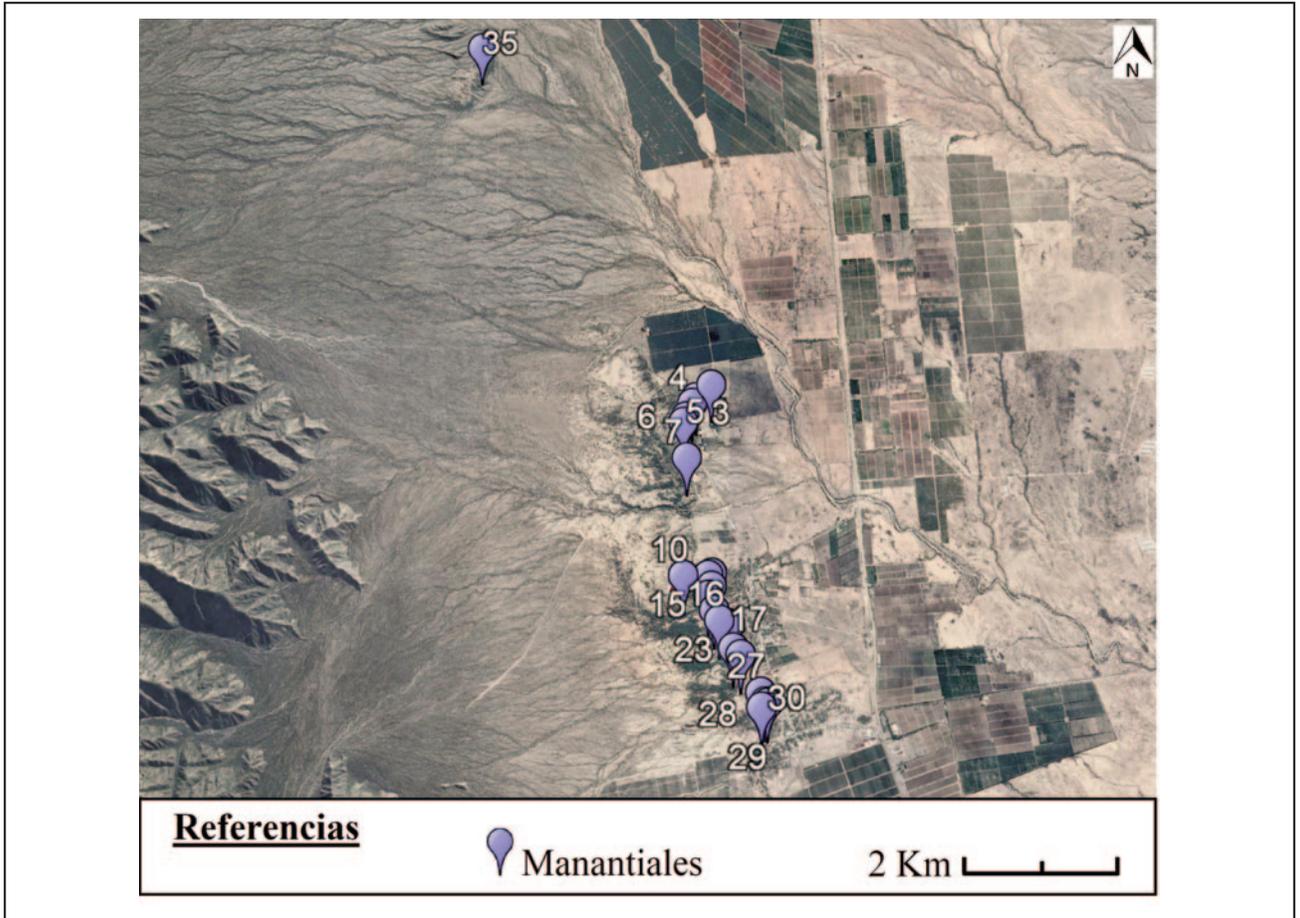


Figura 5. Ubicación de manantiales en el distrito de Vichigasta.



Figura 6. Canales de conducción de los manantiales Comunales. a) La Común- El Totoral; b) Los Altos; c) Comunidad de Barrio Chima.

Tabla 1. Comparación de caudales erogados por los manantiales entre 1961 y 2019

Nº de Orden	Área	Coordenadas		Q (L seg ⁻¹)	Q (L seg ⁻¹)
		Latitud	Longitud	1961	Enero-Mayo 2019
1	Patayaco	-29.461589 ⁰	-67.515624 ⁰	0,63	Abandonado
2	"	SD	SD	0,09	SD
3	"	-29.463603 ⁰	-67.511760 ⁰	4	1,38
4	"	-29.465931 ⁰	-67.514464 ⁰	1,75	2,5
5	"	-29.467617 ⁰	-67.515299 ⁰	0,4	0,33
6	"	SD	SD	1,26	Agotado
7	"	-29.468282 ⁰	-67.515634 ⁰	0,31	SD
8	"	-29.472417 ⁰	-67.515437 ⁰	Trabajos de captación	0,02
9	La Plaza	-29.486985 ⁰	-67.515268 ⁰	24	2,83
10	"	-29.486994 ⁰	-67.512070 ⁰	1,5	25,8
11	"	-29.486736 ⁰	-67.511578 ⁰	11,24	0,74
12	"	-29.488305 ⁰	-67.511623 ⁰	7,15	1,84
13	"	-29.488882 ⁰	-67.512042 ⁰	0,31	Agotado
14	"	-29.489417 ⁰	-67.512071 ⁰	0,31	Agotado
15	"	-29.491147 ⁰	-67.511251 ⁰	2,5	1,10
16	"	-29.492351 ⁰	-67.510523 ⁰	1,2	0,11
17	"	-29.492866 ⁰	-67.509104 ⁰	0,63	0,26
18	"	SD	SD	1	Agotado
19	"	SD	SD	Trabajos de captación	Agotado
20	"	SD	SD	0,12	Agotado
21	Chima	-29.495673 ⁰	-67.508619 ⁰	2,11	Agotado
22	"	SD	SD	0,12	Agotado
23	"	-29.496499 ⁰	-67.507589 ⁰	2	0,14
24	"	SD	SD	1	Agotado
25	"	-29.499420 ⁰	-67.504703 ⁰	1,5	Agotado
26	"	-29.465195 ⁰	-67.514018 ⁰	1,26	0,02
27	"	-29.500897 ⁰	-67.504894 ⁰	No se pudo aforar	SD
28	"	-29.502050 ⁰	-67.504257 ⁰	0,89	0,21
29	"	-29.502649 ⁰	-67.504740 ⁰	1,26	Abandonado
30	"	-29.502194 ⁰	-67.503952 ⁰	15	6,69
Nuevos Manantiales					
31	La Plaza	-29.48159 ⁰	-67.51679 ⁰	SD	0,21
32	"	-29.482621 ⁰	-67.516334 ⁰	SD	0,12
33	Patayaco	-29.465191 ⁰	-67.513887 ⁰	SD	0,14
34	"	-29.419987 ⁰	-67.545268 ⁰	SD	0,17
35	"	-29.419749 ⁰	-67.544988 ⁰	SD	0,19
Q total (L seg⁻¹)				83,54	44,8

*SD: sin dato.

En la Figura 7 se establece el límite de la cuenca de aporte potencial a la recarga de los manantiales de Vichigasta efectuando su cierre donde se encontraría la falla, alcanzando así un área de 294 km². Considerando el promedio de la precipitación media para los años 1960-1961 (201 mm) en base a Costa y Minetti (2001), el total de agua precipitada en el área sería de 59,1 (hm³ año⁻¹). Utilizando el criterio planteado por Sosic (1971) para la cuenca, en donde un 10 % de lo precipitado recarga el acuífero, se obtiene un valor de 5,90 (hm³ año⁻¹), lo que equivale a una descarga potencial en el área de falla de alrededor de 187 (L seg⁻¹), aplicando la misma fórmula y coeficiente de recarga para los años 2018-2019 con un promedio de precipitación media de 231 mm se obtiene un valor de recarga de 6,79 (hm³ año⁻¹) y una descarga potencial de 215 (L seg⁻¹).

En cuanto a la extracción del recurso hídrico subterráneo, se evidencia una marcada explotación en el área distal del abanico aluvial (aguas abajo del área de los manantiales) asociado a la producción agrícola, evidenciándose procesos de profundización

de niveles estáticos y pérdida de reservas de agua subterránea (Miguel et al., 2018). No obstante, por su localización estas extracciones no afectan la dinámica de los manantiales. Sin embargo, cabe aclarar que aguas arriba de estos se han desarrollado en los últimos años dos pozos de extracción para agua potable y dos pozos para riego en inmediaciones de los drenes, lo que puede disminuir los niveles estáticos en determinadas áreas y afectar localmente su capacidad drenante. Es esperable que, para abastecer de agua potable a la población y el riego de 110 hectáreas de olivo (lámina de 1.000 mm año⁻¹) se extraigan al menos 0,2 y 1,10 (hm³ año⁻¹) respectivamente, lo que significa una extracción total de 1,30 (hm³ año⁻¹), equivalente a un 19,14 % de la recarga. De esta manera, la descarga potencial en el área de falla se reduce de 215 (L seg⁻¹) a 173 (L seg⁻¹) para 2019. Se podría inferir que la disminución en la disponibilidad de agua para riego no tendría su origen en el volumen de agua que recarga la cuenca. Una situación de este tipo, aunque con sus particularidades hidrológicas e hidrogeológicas, se evidenció y advirtió en la Isla Gran Canaria



Figura 7. Límite de la cuenca de aporte potencial a la recarga de los manantiales de Vichigasta.

Norte por *Hernández Quezada, Cabrera y Custodio (2011)*, donde el incremento de pozos y de demanda de agua para uso agrícola afectaron los caudales erogados por los manantiales de uso tradicional.

En la Tabla 2 se detallan los datos estadísticos descriptivos de temperatura, pH y conductividad eléctrica para el conjunto de manantiales. Las temperaturas medias del conjunto son de 22,8 °C, con variaciones de acuerdo al horario de aforo y los sistemas de conducción desde la zona de surgencia de los manantiales hasta el sitio de medición y muestreo. Si bien en ningún caso esa distancia supera los 200 m, la baja velocidad de flujo y las temperaturas de verano, pueden modificar los valores registrados. El pH medio ronda 7,6 siendo aguas ligeramente alcalinas. Si bien los valores relevados de conductividad eléctrica son similares en la mayor parte de la localidad con valores menores a 807 ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en el 95% de los manantiales, se observa un aumento hacia el Suroeste del área (Barrio Chima), donde se registró el valor máximo de 1.040 ($\mu\text{S cm}^{-1}$) en el manantial Comunidad de Barrio Chima, duplicando los valores medios del resto de los manantiales ($497 \pm 144 \mu\text{S cm}^{-1}$).

Tabla 2. Valores estadísticos de los parámetros de campo en el periodo Enero-Abril 2019 (n = 12).

	Temperatura(°C)	pH	Conductividad eléctrica.($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Máximo	30,5	8,1	1040
Percentil 0,95	29,4	8,0	807
Media	22,8	7,6	497
Percentil 0,05	18,6	7,3	450
Mínimo	17,6	7,2	430
σ	$\pm 3,4$	$\pm 0,2$	± 144

En la Tabla 3 se presentan los valores de las muestras de agua analizadas en laboratorio para pH, conductividad eléctrica, iones mayoritarios y fluoruro de los 17 manantiales seleccionados, donde se observa una mayor diferenciación del manantial de Barrio Chima en relación a los valores de conductividad eléctrica

Tabla 3. Iones mayoritarios, pH, conductividad eléctrica, dureza y fluoruro (n = 17).

Manantial	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁼ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Dureza (ppm)	F ⁻ (ppm)
Osman (3)	7,9	460	85,8	34,8	5,47	108,7	56,43	5,7	48	4	164,4	1,40
Rivas (4)	7,2	470	71,1	36,5	4,29	130,9	51,49	6,9	52	4	157,2	1,40
Sánchez (5)	7,4	580	125,2	38,2	1,38	129,1	68,59	13,9	56	3	228,5	2,40
Los Altos (9)	7,9	470	73,8	36,5	11,09	92,1	47,88	5,8	72	4	143,5	3,00
La Común (10)	7,6	470	87,0	38,2	9,52	107,1	50,54	10,5	60	4	169,6	2,60
Del Marco (11)	7,7	520	118,8	41,7	1,30	130,5	51,7	4,0	56	4	145,8	2,20
Anzalas (12)	7,5	490	90,0	38,2	9,72	90,6	52,82	4,9	64	4	152,0	2,80
Giménez (15)	7,6	580	113,2	41,7	10,26	98,9	64,41	8,4	72	4	195,7	2,70
L. Ontivero (16)	7,3	560	96,4	48,7	14,41	98,5	67,83	3,2	70	4	182,9	2,60
P. Ontivero (17)	7,4	490	87,0	45,2	14,79	109,9	54,2	6,0	62	4	160,1	2,40
Luna (28)	7,3	635	90,0	93,8	13,01	162,0	79,61	3,1	98	3	211,9	2,80
Barrio Chima (30)	7,7	1040	73,2	218,9	11,67	191,8	121,9	3,8	150	5	320,6	3,00
Don Faustino (31)	7,6	460	78,2	33,0	1,10	124,3	48,83	3,9	64	3	138,2	1,00
Ishanca 1 (32)	7	505	61,4	26,1	2,64	125,9	32,49	7,6	68	4	112,6	2,60
Ishanca 2 (33)	7,4	490	90,8	27,8	2,83	134,7	50,92	10,2	60	4	169,1	1,40
Vertiente Vieja (34)	7,8	460	67,3	34,8	3,92	134,4	45,22	2,5	72	3	123,5	1,80
Vertiente Nueva (35)	7,3	430	57,6	31,3	3,28	103,6	34,2	2,8	58	4	96,9	1,40
Máximo	8,0	1040	125	219	14,8	192	122	13,9	150	5	320	3,0
Percentil 0,95	7,8	736	120	125	14,5	169	90,2	11,3	111	4,25	251	3
Media	7,5	490	87,0	38,2	7,1	124	51,7	5,66	64	4	160	2,2
Percentil 0,05	7,2	454	60,6	27,4	1,26	91,8	33,8	2,74	51,2	3	109	1,32
Mínimo	7,0	430	57,6	26,1	1,10	90,6	32,5	2,5	48	3	96,9	1,0
σ	0,25	140	19,1	45,8	4,89	26,0	20,3	3,18	23,5	0,53	51,5	0,66

del resto de las muestras analizadas. En la Figura 8a se presenta el Diagrama de Piper en el cual se tipificaron las aguas de los manantiales como sulfatadas sódico-cálcicas, exceptuando el manantial Comunidad del Barrio Chima que presenta agua clorurada sódico-cálcica. El Diagrama de Riverside (Figura 8b) determinó que 16 de los manantiales pertenecen a la clase C2S1, con agua de salinidad media y baja peligrosidad sódica y el manantial Chima a C3S1, agua de salinidad media a alta y baja peligrosidad sódica. Aguas arriba de los manantiales de Barrio Chima, se observan pozos de bombeo para riego, la plantación de olivos bajo riego y en sus inmediaciones un pozo de bombeo para agua de consumo humano (Figura 9), actividades que disminuyen el volumen de agua subterránea y tienen el potencial de incorporar sales a través de retornos de riego que incrementarían la concentración iónica del agua subterránea impactando en su calidad.

Las concentraciones de los iones mayoritarios analizados se encuentran por debajo de los límites establecidos para el agua potable según el *Código Alimentario Argentino (2012)*, a excepción de las concentraciones de Fluoruro en agua. El límite de contenido recomendado para la región de Fluoruro es: límite inferior: 0,7 ppm; límite superior: 1 ppm. Se observó que todas las muestras presentan concentraciones por encima del límite superior lo que conlleva a que el agua de los manantiales no sea apta para consumo humano. Las muestras analizadas presentan una media de 2,2 ppm y máximos de 3,0 ppm en el manantial Los Altos (9) y Comunidad del Barrio Chima (30), localizados en inmediaciones de dos pozos de bombeo para abastecimiento de agua para consumo humano para la localidad de Vichigasta (Figura 10). Debido a que algunos de estos manantiales son utilizados para consumo humano, se observaron en campo potenciales

afectaciones a la salud por fluorosis hídrica en parte de la población.

Comunidad de Barrio Chima

El caso de este manantial merece un análisis particular ya que desde lo hidroquímico se observa una marcada diferencia con respecto al resto de los manantiales. Si se consideran los trabajos antecedentes en el área que advierten la disminución de los caudales erogados en el área y el aumento de la conductividad eléctrica desde el año 2015 (*Miguel et al., 2018*), los cuatro (4) meses de medición semanal realizados en esta investigación, los datos de precipitación media del SMN (media de 189 mm) y los relevados por INTA E.E.A. Chilecito por encima de la media para los años en interés, se pone de manifiesto una potencial influencia de la explotación de agua subterránea y la recarga de sales producto de retornos de riego aguas arriba del sistema de drenes que capta el manantial. En la Figura 11, se presenta la evolución de caudales y su conductividad eléctrica desde julio de 2015 a abril de 2019, mientras que en la Figura 12 se presenta la comparación del tipo de agua en diagrama de Piper para abril de 2016 (muestra obtenida por INTA EEA Chilecito) y abril de 2019. Se advierte como el agua evolucionó de Bicarbonatada-Sulfatada Cálcico-Sódica a Clorurada Sódico-Cálcica, lo que conlleva a reforzar la hipótesis de los retornos de riego, en especial por el incremento de anión conservativo cloruro. De todas maneras, es necesario avanzar hacia estudios de mayor detalle (hidrodinámico e isotópico) en el área que permitan confirmar esta hipótesis y el modelo conceptual de lo que sucede en este sector de los manantiales de Vichigasta.

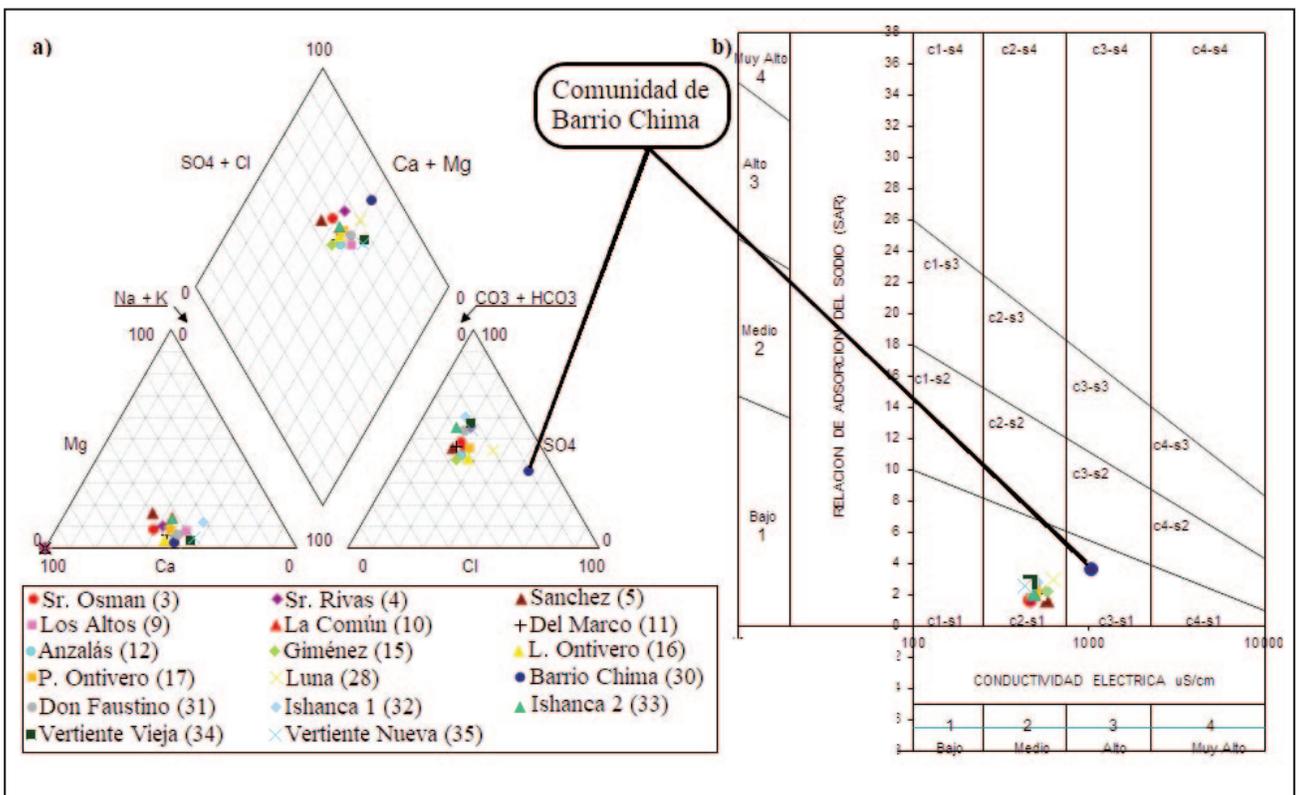


Figura 8. Diagramas hidroquímicos: a) Piper; b) Riverside.

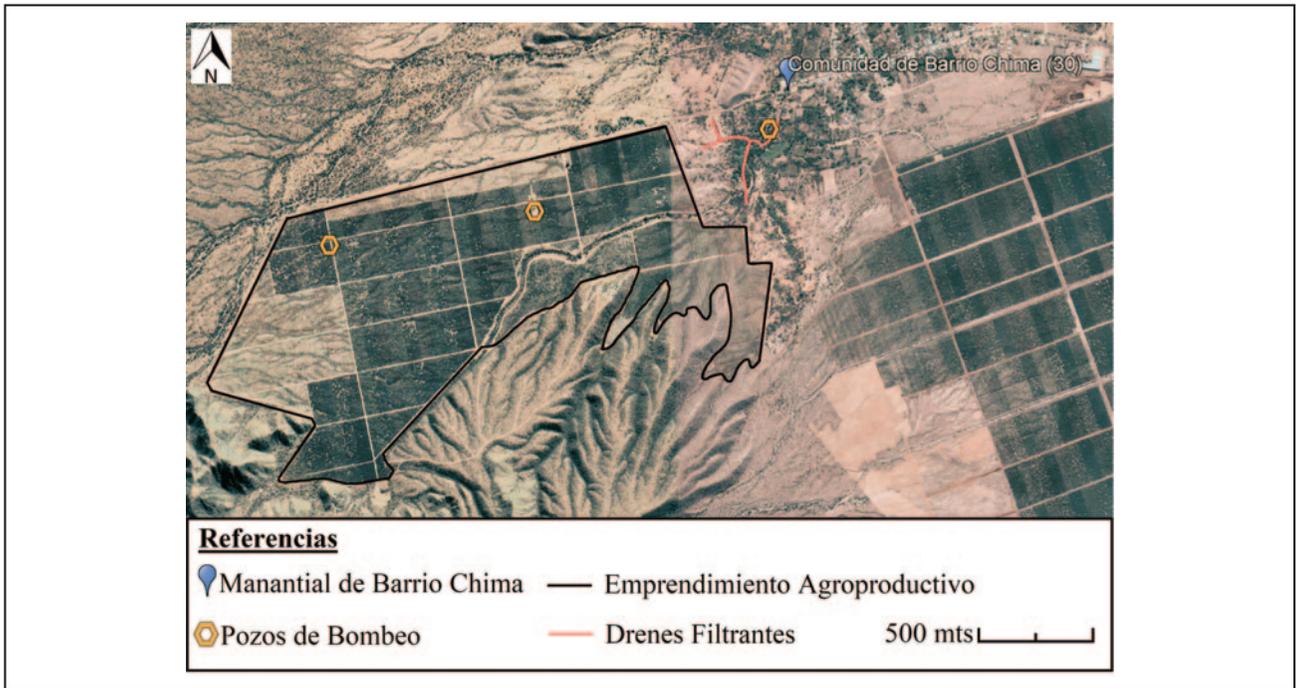


Figura 9. Actividades antrópicas aguas arriba y en inmediaciones del área de captación comunal del Barrio Chima.

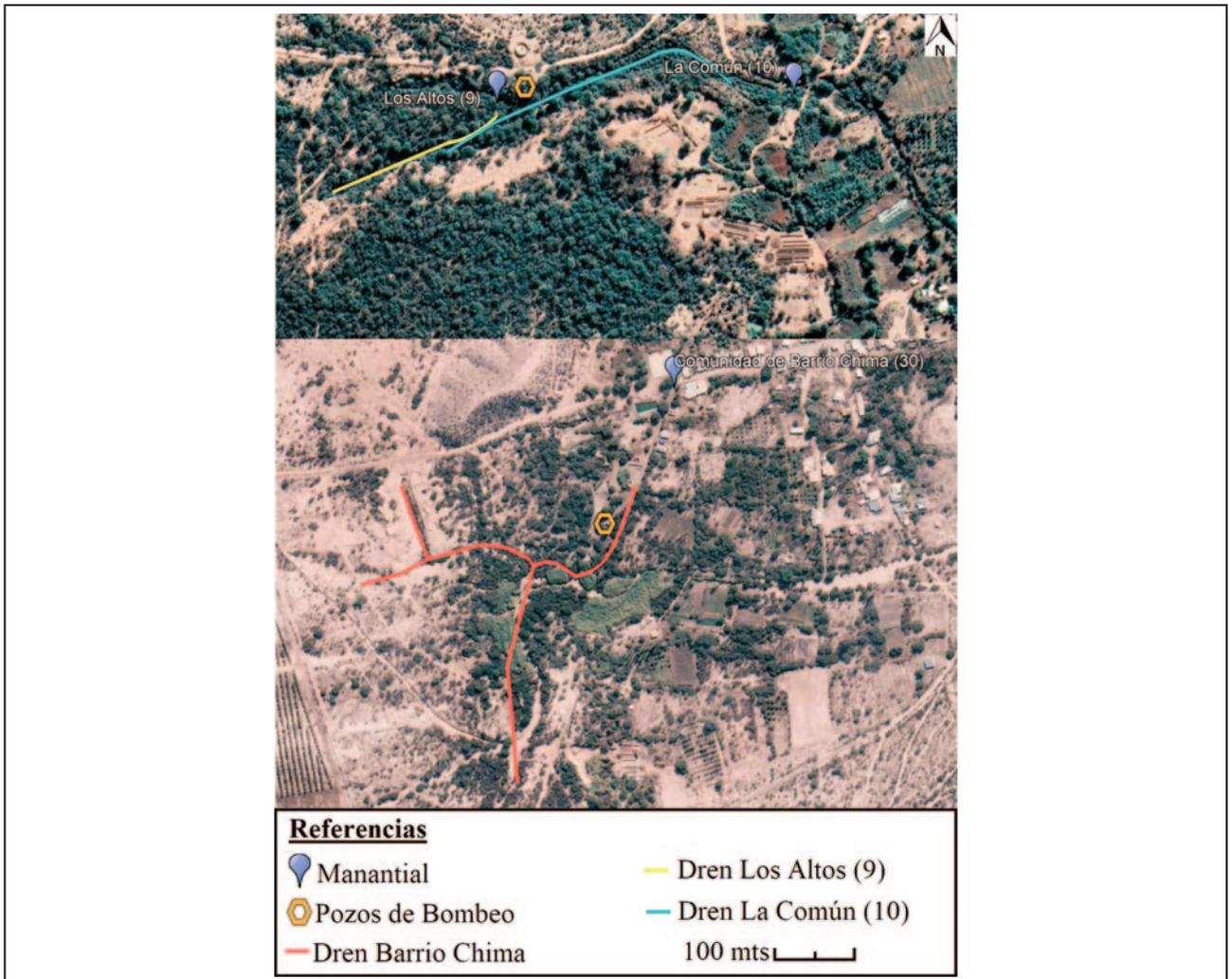


Figura 10. Ubicación de los sitios muestreados próximos a los pozos para abastecimiento de agua de consumo humano. a) Los Altos (N° 9) b) Comunidad de Barrio Chima (N° 30).

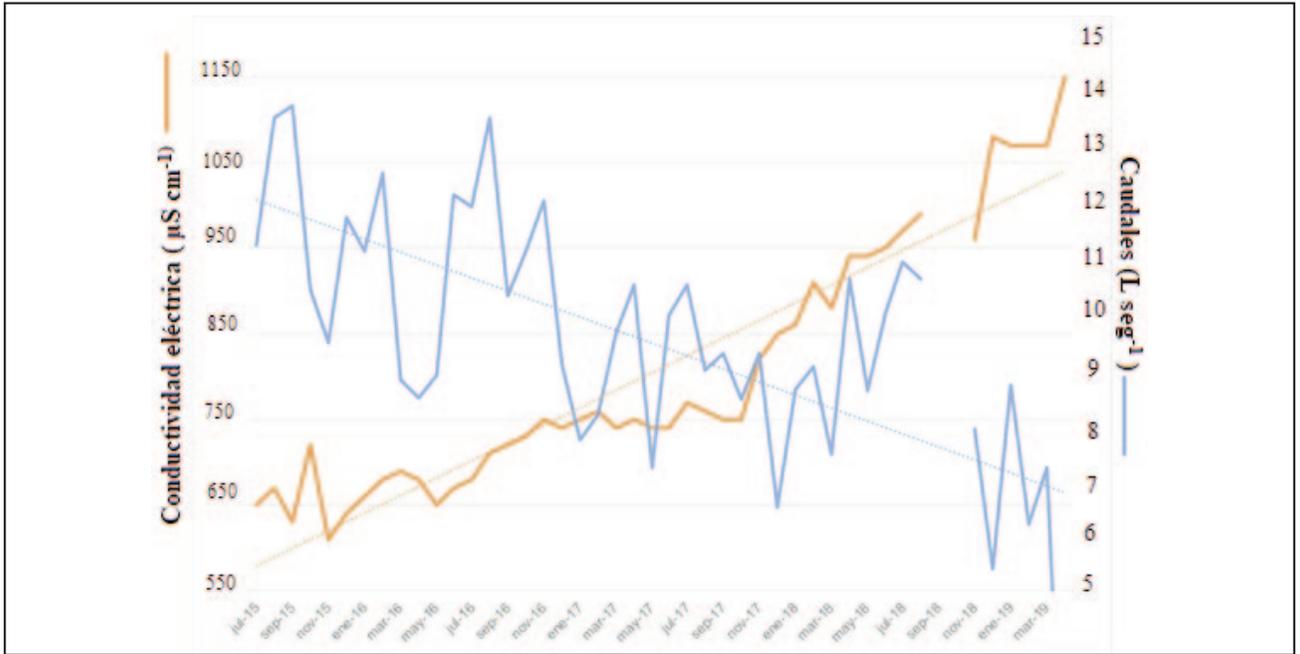


Figura 11. Caudal (L seg⁻¹) y conductividad eléctrica (μS cm⁻¹) 2015-2019.

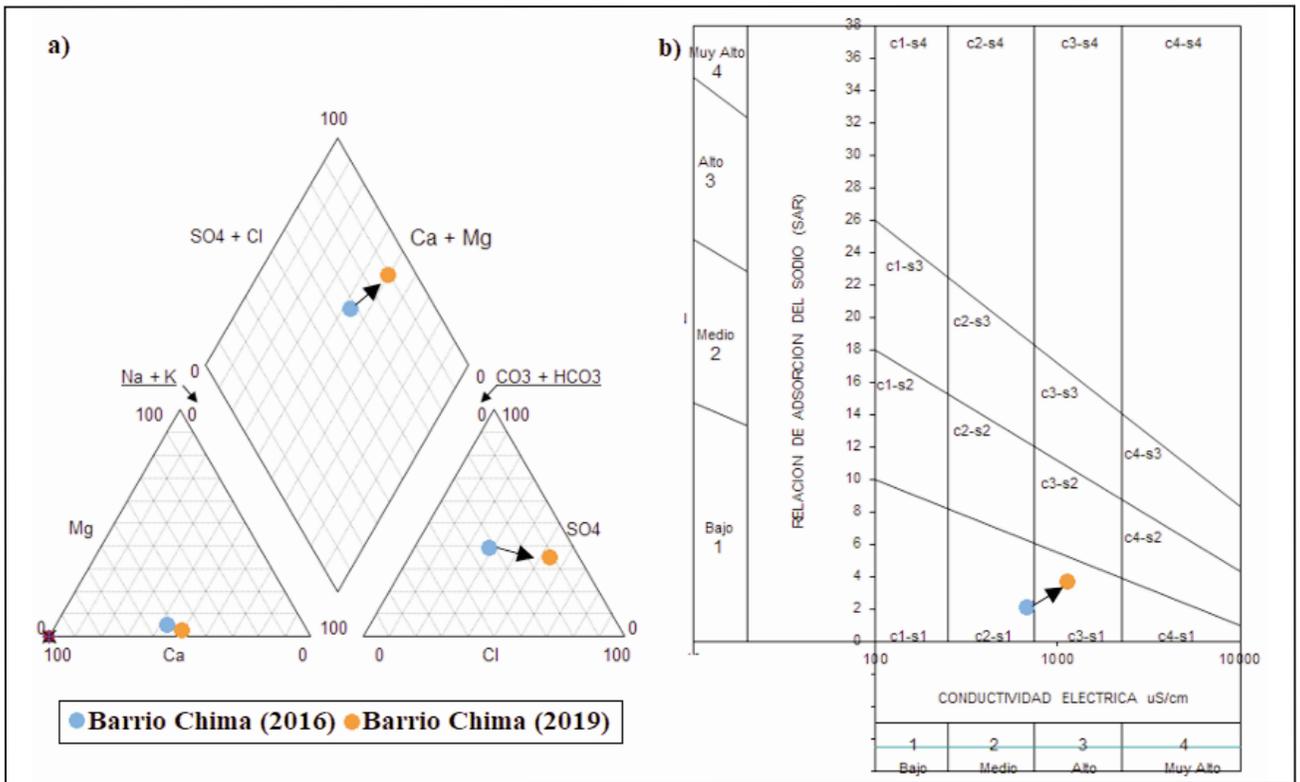


Figura 12. Evolución de agua del manantial del Barrio Chima en periodo Abril 2016- Abril 2019; a) Diagrama de Piper, b) Diagrama Riverside.

CONSIDERACIONES FINALES

La presente investigación desarrolló una aproximación inicial de la situación actual del recurso hídrico subterráneo y su evolución temporal en relación a estudios previos, estableciéndose una disminución de los caudales erogados por manantiales en un 47 % con respecto al dato antecedente y el abandono y agotamiento del 50% de los manantiales. La falta de disponibilidad

del recurso subterráneo limita ampliamente la producción en el Distrito de Vichigasta, siendo necesario destacar que dicha problemática no tendría sus orígenes en el volumen de agua que recarga el área. Esta situación se encuentra agravada hacia el Suroeste de la localidad (Barrio Chima) con la degradación de la calidad del agua. El desarrollo de un emprendimiento agroproductivo aguas arriba del manantial de Barrio Chima

permitiría inferir que esta degradación en la calidad podría estar asociada a retornos de riego y la extracción de agua mediante pozos de bombeo.

Para un análisis de mayor rigurosidad respecto a la situación advertida, es necesario profundizar el estudio hidrodinámico aguas arriba de los manantiales de falla, junto con el seguimiento y análisis de la evolución de los manantiales mediante la prosecución de estudios químicos en el tiempo y estudios isotópicos que permitan dilucidar con mayor rigurosidad científica los procesos de salinización observados y sus orígenes.

El Distrito de Vichigasta presenta una estructura hidrogeológica particular que ha sido escasamente estudiada y por tal motivo los manantiales corren el peligro de ser afectados por el establecimiento de pozos de bombeo aguas arriba y en sus inmediaciones, zona identificada como de reserva acuífera por la Ley Provincial 8790. No obstante, se concluye que cualquier acción que capte el recurso hídrico agua arriba del área de falla impactará directamente sobre la cantidad y calidad de agua subterránea erogada por los manantiales comprometiendo al sistema ambiental.

Resulta necesario que las autoridades locales encargadas de la gestión del recurso hídrico junto con las autoridades de agua y ambiente de la Provincia de La Rioja en colaboración con productores, otras instituciones de gobierno y de ciencia y

tecnología, aborden esta problemática profundizando en estudios de detalle para conocer las dimensiones del sistema, su hidrodinámica y el volumen de reserva. De esta manera se establecerá en su real dimensión, la potencialidad del recurso, que permitirá elaborar un conjunto de pautas de manejo tendentes al desarrollo de una gestión integral del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sr. Vicente Ormeño, Presidente de la Unión Vecinal de Agua Potable de Vichigasta por su valiosa colaboración en campo y el reconocimiento de manantiales citados en bibliografía antecedente. A la Dra. Sonia Silvente, Directora del Laboratorio de Alta Complejidad de la Universidad Nacional de Chilecito por el desarrollo de análisis de laboratorio. A los Proyectos Institucionales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Proyecto Estructural 041 de "Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas del Sistema Agroalimentario Argentino" y al Proyecto Disciplinar 506 "Humedales de la Argentina: distribución, usos y recomendaciones coparticipativas para una producción sustentable". A la Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y a INTA Estación Experimental Agropecuaria Chilecito por las gestiones que posibilitaron la Comisión de Estudios que permitió el desarrollo de este documento y la tesis de grado en Lic. en Diagnóstico y Gestión Ambiental.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Edition. Washington, USA. American Public Health Association.
- AUGE, M. P., WETTEN, C., BAUDINO, G., BONORINO, A. G., GIANNI, R., GONZÁLEZ, N Y TINEO, A. (2006). Hidrogeología de Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 7-23.
- AZCUY, C. L., ANDREIS, R. R., CUERDA, A., HÜNICKEN, M. A., PENSA, M. V., VALENCIO, D. A., Y LEGUIZAMÓN, R. R. (1987). Cuenca Paganzo. *En Archangelsky, S. (ed.). El Sistema Carbonífero en la República Argentina. (42-132) Córdoba, Argentina. Academia Nacional de Ciencias.*
- CANDIANI, J.C., ASTINI R., DÁVILA, F., COLLO G., EZPELETA M., ALASINO, P., DAHLQUIST, J., Y CARRIZO R. (2011). Hojas Geológicas 2969-18 Famatina y 2969-24 Sañogasta. *Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires, Argentina: Instituto de Geología y Recursos Minerales.*
- CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO (2012). Capítulo XII: Bebida hídricas, agua y agua gasificada. *Ley 18.284. Argentina.*
- CONHIDRO S.R.L. (2017). Informe Técnico Pozo N°2 Campo 3. Vichigasta. Departamento Chilecito Provincia de La Rioja. *Septiembre 2017. 10 pp.*
- COSTA, M. C. Y MINETTI, J. L. (2001). El agua: una limitante de la agricultura en La Rioja. *Jornadas de Avances en la producción vegetal del NOA (1998-2001). San Miguel de Tucumán, Argentina. 146-152*
- CUBILÓ, M. E., LÓPEZ, T., CANO, R., Y RECCHIONI, L. (2015). La agricultura campesina y empresarial en el Valle Antinaco—Los Colorados de la Provincia de La Rioja. *Abordajes (La Rioja). Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 3(5): 19-37.
- GRUPO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA- GHS. (2002). EASYQuim 4.0. Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Catalunya. *Disponibile en: <https://h2ogeo.upc.edu/es/software-hidrologia-subterranea/11-software-hidrologia-subterranea/42-easy-quim> último acceso 27 de Mayo de 2021.*

- GARCÍA PERÓN, E. (1979).
Consideraciones hidroquímicas y evolución salina de la cuenca Antinaco Los Colorados, Provincia de La Rioja.
San Juan, Argentina: Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Aguas Subterráneas - INA CRAS, P-223. p 18.
- HERNÁNDEZ-QUESADA, P., CABRERA, M.C., Y CUSTODIO, E. (2011).
Características y evolución de los nacientes en las cuencas de los barrancos de Azuaje y Moya, norte de Gran Canaria.
En: Cabrera, M.C., Custodio, J. Jiménez y E. (Eds). El Conocimiento de los Recursos Hídricos en Canarias: Cuatro Décadas después del Proyecto SPA-15. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, Las Palmas de Gran Canaria, 73-79.
- MIGUEL, R.E., TÁLAMO, E., CRISTOS, D.S., GONZALEZ RIBOT, J.V., Y CHAYLE, L. (2016).
Análisis y evolución del proceso de salinización del sistema acuífero Antinaco Los Colorados en las Colonias de Vichigasta y Catinzaco, La Rioja, Argentina.
Actas del IX Congreso Argentino de Hidrogeología 2016. Calidad de Agua Subterránea, 304-311.
- MIGUEL, R.E., GONZÁLEZ, J.V., VUKSINIC, E., Y AGÜERO ALCARAS, L.M. (2018).
Evolución de las vertientes para uso de riego comunal en Vichigasta, La Rioja.
I Jornadas Internacionales de Ambiente y IV Jornadas Nacionales de Ambiente 2018: Libro de resúmenes extendidos. Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 473-476.
- MOYANO, R. (2011).
"Sin agua, no hay vida".
Diario Chilecito. Edición digital de 4 de Noviembre de 2011. Disponible en: <http://www.diariochilecito.com.ar/articulo/14159.html> último acceso 27 de Mayo de 2021.
- POBLETE, M.A. Y GUIMARAES, R.E. (2006).
Evaluación hidrogeológica de los acuíferos explotados en la cuenca Antinaco-Los Colorados. San Juan, Argentina:
Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Aguas Subterráneas - INA CRAS. p 28.
- ROCCA, J.A., ORTÍZ, A., ZAMBRANO, J., TABALLIONE, C., TORRES, E., ROBLES, J.O., VICTORA, J.A., PELEGRINO, J., SALVIOLI, G., BOSCH, E., MARTINIS, N., CORIA, E., LONH, P., GARCÍA PERÓN., FERRES, C., ÁLVAREZ, A., FRONTERA, H., ABERASTAIN, S., TORO, M.A., Y NALLY, J. (1975).
Investigación del agua subterránea en el Valle Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja. Publicación N° P-067.
San Juan, Argentina,
Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Aguas Subterráneas - INA CRAS. p 350.
- ROSA, H. (2000).
Vegetación de la Rioja. Catálogo de Recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina.
Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap20.htm> último acceso 27 de Mayo de 2021.
- SOSIC, M. (1971).
Descripción hidrogeológica del Valle de Antinaco-Los Colorados, Provincia de La Rioja. Buenos Aires, Argentina:
Ministerio de Industria, Comercio y Minería, Subsecretaría de Minería, Dirección Nacional de Geología y Minería.
- SPRINGER, A.E., Y STEVENS, L.E. (2009).
Spheres of discharge of springs.
Hydrogeology Journal, 17: 83-93.
- VICTORIA, J. (1962).
Capítulo 4: Provincia geológica de los bolsones de los llanos occidentales.
En Victoria, J. (Ed), Evaluación de los recursos naturales de la Argentina, Recursos Hidráulicos Subterráneos (pp. 55-73). Buenos Aires, Argentina: Editorial CFI Consejo Federal de Inversiones.



Riesgo geomorfológico de médanos migrantes: minimización mediante la extracción de áridos en Arenas Verdes, municipio de Lobería (Buenos Aires)

Reomorphological risk of migrant dunes: minimization through the extraction of aggregates in Arenas Verdes, Lobería (Buenos Aires)

Bertola, G. R.^{1, 2} ✉ - Farenga, M.¹ - Taverna, B.^{1, 3} - Antenucci, D.² - del Río, J. L.¹

Recibido: 8 de abril de 2021 • Aceptado: 22 de septiembre de 2021

Resumen

La localidad de Arenas Verdes es actualmente el único asentamiento turístico costero desarrollado en el partido de Lobería (Buenos Aires, Argentina). Se ubica sobre la Barrera Medanosa Austral, una de las cuatro que posee la provincia de Buenos Aires. Desde hace unas décadas, médanos barjanoides avanzan en dirección a la urbanización obliterando lotes y calles.

El objetivo del trabajo fue aportar al municipio un instrumento de gestión que le posibilitará desarrollar procedimientos de recuperación de los terrenos soterrados por los médanos migrantes, mediante una política minera compatible con una gestión activa y ambientalmente sostenible, y con una mínima afectación de los ecosistemas costeros y de playa. Para lograr esto, se realizaron estudios cartográficos y con drone que determinaron la cantidad de predios afectados, así como la velocidad de avance de los frentes de médano. También se calculó la tasa de transporte eólico y se cubió las arenas extraíbles, estimado la tasa máxima de extracción en función de ese transporte. Finalmente, se propusieron estrategias de manejo que eviten el avance de los médanos sobre la urbanización, orientando la actividad de la industria minera y a su vez, minimizar los efectos adversos antrópicos sobre el ecosistema medanoso.

Se concluye que en esta zona hay médanos activos progradantes que compromete las construcciones urbanas establecidas

en la localidad. Para evitar este impacto, se propuso que sean exclusivamente las caras de sotavento las únicas que se exploten, siempre bajo estrictos criterios de sostenibilidad. De ese modo la vida útil del yacimiento será prolongada en función de la captación del material que se encuentra en tránsito, siempre que la actividad minera extraiga la misma cantidad de arena que entra al sistema.

Por la larga tradición de esta actividad en el Partido de Lobería, asegurar la disponibilidad de arena es muy

1. Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (Universidad Nacional de Mar del Plata-CIC) - Funes 3350, (7600) Mar del Plata, Argentina

✉ gbertola@mdp.edu.ar

2. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET-UNMdP)

3. Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires (CIC-PBA).

importante para abastecer el desarrollo urbano y de infraestructura local y regional. Una adecuada gestión se traduce en una utilización racional y sustentable de los mismos, minimizando el riesgo de la pérdida de ambientes por la actividad antrópica.

Palabras Clave: *Explotación - Áridos - Geomorfología - Médanos - Buenos Aires.*

Abstract

The town of Arenas Verdes is currently the only coastal tourist settlement developed in the Lobería district (Buenos Aires, Argentina). It is located on the Barrera Medanosa Austral, one of the four in the province of Buenos Aires. For a few decades, barjanoid dunes have been advancing towards the urbanization, obliterating lots and streets.

The objective of the work was to provide the municipality with a management tool that will enable it to develop procedures for the recovery of the land buried by migrant dunes, through a mining policy compatible with active and environmentally sustainable management, and with minimal impact on coastal ecosystems and beach. To achieve this, cartographic and drone studies were carried out that determined the number of affected properties, as well as the speed of advance of the dune fronts. The wind transport rate was also calculated and the extractable sands were cubed, estimating the maximum extraction rate based on this transport. Finally, management strategies were proposed to prevent the advance of the dunes over urbanization, orienting the activity of the mining industry and, in turn, minimizing adverse anthropic effects on dune ecosystem.

It is concluded that in this area there are active prograding dunes that compromise the urban constructions established in the locality. To avoid this impact, it was proposed that only the leeward faces be exploited, always under strict sustainability criteria. In this way, the useful life of the deposit will be prolonged depending on the capture of the material that is in transit, as long as the mining activity extracts the same amount of sand that enters the system.

Due to the long tradition of this activity in the Lobería district, ensuring the availability of sand is very important to supply urban development and local and regional infrastructure. Proper management translates into a rational and sustainable use of them, minimizing the risk of loss of environments due to anthropic activity.

Keywords: *Exploitation - Aggregates - Geomorphology - Dunes - Buenos Aires.*

INTRODUCCIÓN

Los médanos de la costa atlántica bonaerense son geoformas móviles cuando hay abundante suministro de sedimento y baja cobertura vegetal. En este sistema dinámico, el paisaje puede también entenderse como un sistema ecológico en constante cambio natural, que evoluciona en una escala de tiempo humana y con marcadas diferencias microambientales que le confieren distintas condiciones ecosistémicas a cada porción de la duna según el nivel de cobertura vegetal que posee, duna viva, duna semifija y duna fija (Stallins y Parker, 2003; Monserrat, 2010). Desde mediados del siglo XX este sistema ha sido intervenido por el hombre con el desarrollo de asentamientos humanos, minería, turismo y otras actividades conexas (del Río et al., 2018). Por otro lado, los áridos son las principales materias primas para la construcción urbana, desarrollo de infraestructuras e industrias, lo que le confiere un carácter de material estratégico para el desarrollo de una región (Ayala Carcedo et al., 1999). Esos áridos, que pueden tener diferentes tamaños granulométricos (desde gravas a arena mediana) han sido obtenidos de diferentes orígenes como fluviales, costeros, fósiles u offshore, cada uno de esos materiales con costos de extracción y tecnología muy diversas (Wilburn y Goonan, 1998; Al-Ansary et al., 2012; Koirala y Joshi, 2017).

En el litoral marino del partido de Lobería, y específicamente la localidad de Arenas Verdes, los principales factores que impactan en la costa son la urbanización, la forestación, la traza de los caminos costaneros, la circulación de vehículos por médanos y playas, y la extracción de arenas de los médanos

costeros (Aguilar, 2009). La alta movilidad de la faja medanosa en la trama urbana de Arenas Verdes (villa balnearia del partido de Lobería, Figura 1), ha generado un escenario de riesgo geomorfológico sobre el sector urbano de la localidad. El frente de los médanos ha tenido un avance sostenido sobre el ejido urbano provocando la pérdida de un número apreciable de lotes con el consecuente perjuicio económico tanto a los poseedores privados como al erario público y molestias a sus habitantes.

Despejar estas parcelas y mantenerlas libres de arena, obligaría tanto al municipio como a los particulares a una intervención constante y mayores erogaciones. Una adecuada planificación territorial que contemple una gestión minera de intensidad controlada, podría reducir significativamente los costos de recuperación y mantenimiento del sector urbano.

El objetivo del trabajo fue aportar al municipio un instrumento de gestión que le posibilitará desarrollar procedimientos de recuperación de los terrenos soterrados por los médanos migrantes, mediante una política minera compatible con una gestión activa y ambientalmente sostenible, y con una mínima afectación de los ecosistemas costeros y de playa. Para lograr esto, se realizaron estudios topoaltimétricos que determinaron la cantidad de predios afectados, la velocidad de avance de los frentes de médano, se calculó la tasa de transporte eólico y se cubicaron las arenas extraíbles. Finalmente, se propusieron estrategias de manejo que eviten el avance de los médanos sobre la urbanización, orientando la actividad de la industria minera y a su vez, minimizar los efectos adversos antrópicos sobre el ecosistema medanoso.



Figura 1. Mapa de ubicación del área de trabajo.

ANTECEDENTES

Las barreras medanosas son ecosistemas complejos y frágiles que articulan los espacios marino-costeros con los continentales. Al mismo tiempo, estos médanos son el soporte de otras actividades económicas como usos residenciales y turísticos. En muchos países las extracciones de áridos naturales de la playa y del médano frontal se encuentran prohibidas, algo que también ocurre en nuestro país, sin embargo para arena de médanos litorales no hay restricciones. Está comprobado que tras una intensa extracción en la playa, el proceso erosivo costero aún persiste varios años después del cese de la misma (Marcomini y López, 2006) indicando una superación de la resiliencia natural y la máxima vulnerabilidad del sistema de médanos costeros (Borges et al., 2002). Sucesivos trabajos han demostrado que la minería no supervisada en estos sitios, conducen irrevocablemente a la degradación ambiental, pérdida de la belleza escénica, radiación de sus minerales componentes, contaminación por polvo, generación de ruido y estropean las carreteras y otras estructuras (López y Marcomini, 2002; Pitchaiah, 2017).

En la provincia de Buenos Aires cuya franja costera está caracterizada por la presencia de cuatro grandes cordones medanosos (Figura 2), la minería de arenas de médanos es una actividad lícita. Caballé y Bravo Almonacid (2006) expresan: "En sectores donde existe suficiente acumulación, es posible realizar explotación controlada de arena de playa sin alterar el equilibrio es decir, asegurando la reposición sedimentaria de modo tal que el recurso se renueve. La excesiva acumulación de arena también puede generar problemas urbanos", aunque para el ciudadano común, es una actividad fuertemente rechazada (Camino et al., 2011).

En los municipios costeros de la provincia de Buenos Aires una parte muy significativa de los áridos que se consumen proviene de la explotación de las arenas de médanos litorales de las Barreras Oriental (del Río et al., 2017), Austral y de Patagones (Figura 2). El municipio de Lobería es uno de esos

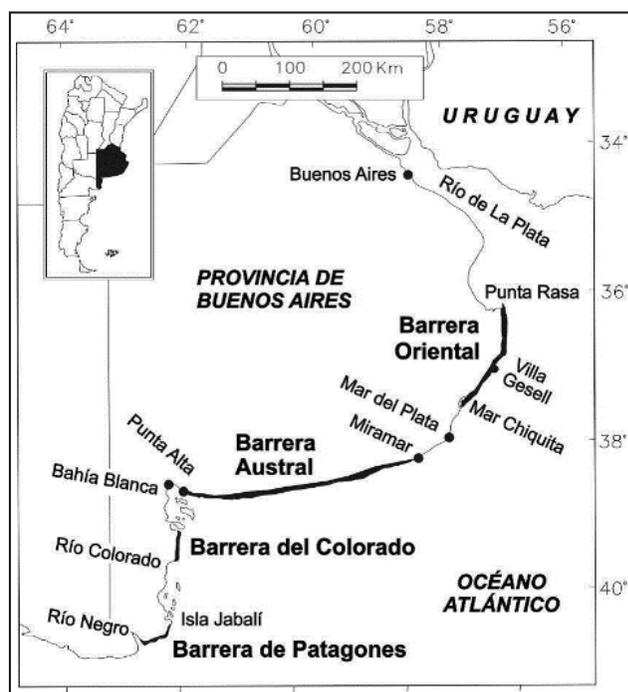


Figura 2. Buenos Aires y sus Barreras Medanosas (Bértola et al., 2020).

15 municipios, en las cuales se desarrollan distintas actividades antrópicas, como la urbanización, forestación, turismo de sol y playa, ganadería y actividades mineras extractivas (del Río et al., 2017; Bértola et al., 2018). Esta multiplicidad de usos territoriales, conlleva un desafío para la gestión en estos sistemas de marcada dinámica económica (Taverna et al., 2018).

Características climáticas y fitogeográficas del área de estudio

El clima general de la región es templado de transición, con influencia oceánica. Las temperaturas máximas oscilan entre los 20°C y los 24°C en promedio. Presenta un régimen de lluvias más intensas en primavera y verano, pero la media anual se encuentra en el rango de los 800 mm. Los vientos alcanzan sus mayores velocidades promedio durante los meses de primavera con 19 m/s, y las mayores fluctuaciones y ráfagas ocurren durante el otoño/invierno. Si bien los más frecuentes son los del Norte, los del Sud-Sudoeste son los que alcanzan mayores velocidades superando los 6 m/s (Aguilar, 2009), siendo los más significativos para el transporte de arenas finas.

Desde el punto de vista fitogeográfico, el área se encuentra incluida dentro de la Provincia Fitogeográfica Pampeana, Dominio Chaqueño de la Región Neotropical (Cabrera, 1976) o Pampa Austral, correspondiente a los pastizales del Río de la Plata (Soriano, 1991). Las comunidades presentes en todas las barreras medianosas presentan un fuerte hábito psammófilo. Sin embargo, los componentes vegetales que conforman las comunidades de la Barrera Austral, encuentran a sus comunidades intervenidas por los elementos provenientes de las provincias fitogeográficas del monte y patagónica en consonancia con el Monte-Espinal (Celsi y Monserrat, 2008). La fisonomía vegetal predominante de estos médanos son los pastizales y en Arenas Verdes se encuentra la gramínea *Spartina ciliata* como principal especie colonizadora. Por otra parte, la especie *Poa lanuginosa* y los pastos del género *Panicum* son los que caracterizan las comunidades establecidas en los médanos fijos y semifijos de la misma área (Celsi, 2009). Esta componente florística es la responsable primaria de la fijación natural de estos médanos costeros, sin embargo, estas especies se encuentran también acompañadas por otras herbáceas como *Solidago chilensis*, *Achyrocline satureioides*, *Senecio bergii* y *Adesmia incana* (Celsi y Athor, 2016). En la zona estrictamente urbana, la vegetación natural ha sido reemplazada por especies forestales exóticas.

Características geológicas y geomorfológicas

La Barrera Medianosa Austral posee una extensión lineal de 390 km, y una superficie del orden de 142.904,87 ha, en una traza continua desde la localidad de Miramar hasta la de Punta Alta (Bértola et al., 2020). La zona posee playas abiertas y están compuestas por una mezcla de sedimentos arenosos y gravosos. Los acantilados que existen en la zona, están conformados por sedimentitas continentales pleistocenas. Cortizo e Isla (2007) mencionan que esos médanos se emplazaron tempranamente sobre una planicie levemente ondulada labrada en sedimentos continentales pampeanos y postpampeanos, con una edad de 5.740 ± 110 años.

La zona costera de Lobería es un mosaico complejo de médanos móviles, semi-móviles y estabilizados (forestados y vegetados), que intercalan con sectores de acantilados y playas de reducida expresión. Entre los médanos vivos, fuertemente móviles, predominan los transversales y barjanoides orientados N-S de más de 30 m de altura, con crestas retrabajadas en dirección E-O que migran en dirección al Noreste (Teruggi et al., 2004). Por el propio accionar diferencial del viento en saltación, se genera un movimiento de arena más lento a sotavento y consecuente sedimentación, de este modo se aprecia que las pendientes de barlovento y la de sotavento son distintas, pudiendo alcanzar entre 30° y 35° las de sotavento y de 5° o 6° las de barlovento, originando un perfil de médano marcadamente asimétrico (Figura 3).

En relación a la tasa de transporte subaéreo hay una extensa bibliografía a nivel mundial (Hesp y Hyde, 1996; Hesp, 1999; Ellis y Sherman, 2013; Guimaraes et al., 2016) donde estiman la capacidad de reformación del médano. Bauer y colaboradores (2009) expusieron la importancia de la humedad de la arena en estas experiencias y Durán y Moore (2013) relacionaron el volumen de arena acumulado (o sea el tamaño del médano) y su estrecha relación con la zonificación vegetal.



Figura 3. Foto ejemplificando la asimetría de los médanos, con sus caras de sotavento y barlovento. Los ubicados en segundo plano poseen 25 metros de altura.

Vulnerabilidad en la localidad de Arenas Verdes

El partido de Lobería tiene una superficie de 468.682 ha, de las que 169 pertenecen a Arenas Verdes (cubriendo un frente costero de 1,2 km) y una población de 17.523 habitantes (Aguilar, 2009). La villa balnearia fue loteada en la década del '50 en 1.000 lotes, de los que sólo se han vendido a la fecha el 19% (Aguilar, 2009). El loteo actual divide al balneario en 60 manzanas con unas 950 parcelas de entre 500 m² a los 2.300 m², con un promedio de lotes de 1.000 m². Se estructura a partir de una avenida principal, con una geometría paisajística y con alto

grado de consolidación de la forestación, produciendo una galería arbórea a ambos lados de la calle. Hay pocas calles trazadas de tierra mejorada, y en general no responden al trazado proyectado. La consolidación del ejido es muy baja, con 7 parcelas edificadas dentro de todo el loteo (Aguilar, 2009).

En el sector más próximo a la playa es donde actualmente se desarrollan estos usos y actividades, y justamente la zona donde progresan los médanos vivos móviles y semimóviles (Figura 4).



Figura 4. Médanos afectando forestaciones junto a la urbanización.

Las arenas como recurso minero

La cantidad de emprendimientos areneros varía en cada una de las barreras medanosas y no se corresponde en general con el grado de urbanización de las mismas. De acuerdo con la información disponible de la Dirección Provincial de Minería, hay unas 20 areneras de médano registradas en la provincia de Buenos Aires aunque la mayor parte de ellas, no están activas en la actualidad (Del Río et al., 2018).

En particular el Partido de Lobería, aun cuando su población es significativamente menor que la de los municipios aledaños, es uno de los principales proveedores de áridos naturales de la provincia de Buenos Aires, abasteciendo con este recurso estratégico al desarrollo urbano de las ciudades que lo circundan. En el 2020 había tres areneras autorizadas: Las Tres Plantas (38°30'27,13''S-58°26'23,34''O), Don José (38°32'30,77''S-58°35'32,49''O) y Monviso Forestal (38°32'16,97''S-58°34'13,47''O). En todos los casos son explotaciones muy simples, con una participación modesta de equipos y tecnologías extractivas y a cielo abierto. Presentan un solo nivel de explotación hasta llegar a los terrenos pampeanos indiferenciados, que son el piso de las canteras. En general, cada arenera cuenta con una pala frontal, a las que eventualmente se incorpora una retroexcavadora, en función de la demanda.

La Arenera Las Tres Plantas activa desde 1999, explota médanos activos y médanos con escaso desarrollo de suelo y

vegetación. Al inicio de la actividad, la extracción se realizaba en médanos fijos, en tanto que ahora se realiza en la pendiente de avance de un médano barjanoide en movimiento, sobre terrenos pampeanos. Los frentes de explotación son en sentido noreste, este y sureste. La firma declaró un volumen de extracción de 190.000 tn (2014 y 2015) y 98.000 tn (2016 y 2020).

En la zona periurbana se encuentran las Canteras Don José y Monviso Forestal en el límite occidental de la cadena medanosa y adyacentes a la zona urbana de Arenas Verdes. La primera está activa desde el 2008 y explota médanos fijos ubicados a 1.600 metros de la playa. El avance de explotación es en sentido oeste-suroeste. Los médanos que se explotan están fijados por vegetación de gramíneas. La producción declarada fue de 70.000 tn (2014), 170.000 tn (2015) y 57.600 tn (2016 a 2020). Monviso Forestal está activa desde el 2015, se ubica a 1.500 metros de la playa y posee una producción de 73.400 tn/año. Explotan médanos parcialmente vegetados con gramíneas.

Las tres canteras tienen un plan de cese que se centra en una recuperación natural, en el sentido de Gallego Valcarlos y Valdillo Fernández (1992), sin intervención.

METODOLOGÍA

Las tareas de campo consistieron en la identificación y geoposicionamiento de los médanos móviles y áreas extractivas en la zona de la localidad de Arenas Verdes, realizándose el

mapeo mediante el uso de un drone Phantom 4 Pro, con una transmisión de imágenes remota OcuSync 2.0 HD y una cámara CMOS con un sensor de 20 megapíxeles de 1 pulgada. Los relevamientos con el Drone se basaron en un vuelo a 150 m de altitud, con 60% de superposición fotográfica ortogonal. En el campo se ubicaron 10 puntos de control materializados con banderas visibles y referenciados en latitud, longitud y cota, con un GPS diferencial de precisión subdecimétrica, con una antena fija A3 o Base R3 con receptor Código C/A de L1 con 12 canales y ciclo de fase portadora completa, y una mochila móvil con receptor GPS Pathfinder ProXT integrado, de 12 canales.

En el gabinete se realizó el pos-proceso de los datos para la creación de un ortomosaico y un modelo digital de elevaciones, para finalmente realizar el cálculo de superficies y volúmenes mediante softwares de procesamiento y post-procesamiento TerraSync Trimble Digital Fieldbook, Trimble Planning, Data transfer y Pathfinder Office 4.0. En este mismo estudio, se procedió a determinar la velocidad y sentido de migración de los médanos transversales sobre la trama urbana, documentándose la cantidad de lotes perdidos debido a ello.

Además, se obtuvieron muestras superficiales (3 cm de profundidad) de las arenas para caracterizar el recurso. En el laboratorio se procedió a su tamizado con Ro-tap (solo había fracción psamítica) y análisis de sus parámetros estadísticos según *Folk y Ward (1957)* en el software GRADISTAT 8.0 (*Blott y Pye, 2001*). Finalmente, las muestras fueron comparadas para evaluar sus condiciones para ser empleadas en hormigón por su compatibilidad con las normas IRAM 1627 (*IRAM, 1997*).

Bertola y colaboradores (2020) calcularon la tasa de transporte subaéreo mediante la aplicación de los algoritmos habituales en la literatura (*Bagnold, 1941; Zingg, 1952; Hsu, 1974*) con la intención de estimar la capacidad de reformación del médano (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de transporte de sedimentos

Bagnold (1941)	$Q = K * (\rho_a/g) * u^{*3} * \sqrt{(d/D)}$
Zingg (1952)	$Q = C * (d/D)^{3/4} * \rho_a/g * u^{*3}$
Hsu (1974)	$Q = H * (u^*/\sqrt{(d/D)})^3$

Q: tasa de transporte masivo en médanos (g/s/cm)
d: D50 de las arenas en mm
D: constante (0,25 mm)
K: constante (1,8)
ρa: densidad del aire (0,001226 g/cm³)
g: aceleración de la gravedad (980 cm/s²)
u*: velocidad crítica de las partículas
C: constante (0,83)
H: e^{(-0,42+4,91 * d) * 10-4}

$Q_v = Q / (\rho_s * (1-P))$
Qv: tasa de transporte volumétrico
ρs: densidad de la arena (2,65 g/cm³)
P: porosidad típica de la arena (0,4)

RESULTADOS

Del análisis de imágenes históricas de Google Earth® del 2003 y 2019, se pudo apreciar que los médanos migran en dirección al NE llegando en algunos casos a 90 metros en 16 años. Para la última década, el riesgo geomorfológico urbano se ha incrementado por el avance de los médanos: en el año 2003 había 32 parcelas afectadas, 36 parcelas para el 2019 y 38 para el año 2021. Comparar las imágenes ha permitido definir dos zonas más estabilizadas y separadas por un sector central, más activo y con mayor velocidad de avance del frente del médano, que progresa sobre la trama urbana y parte sobre terrenos rurales (Figura 5). Por ejemplo el médano en la arenera Las Tres Plantas se desplazó casi 100 m en los últimos 13 años.

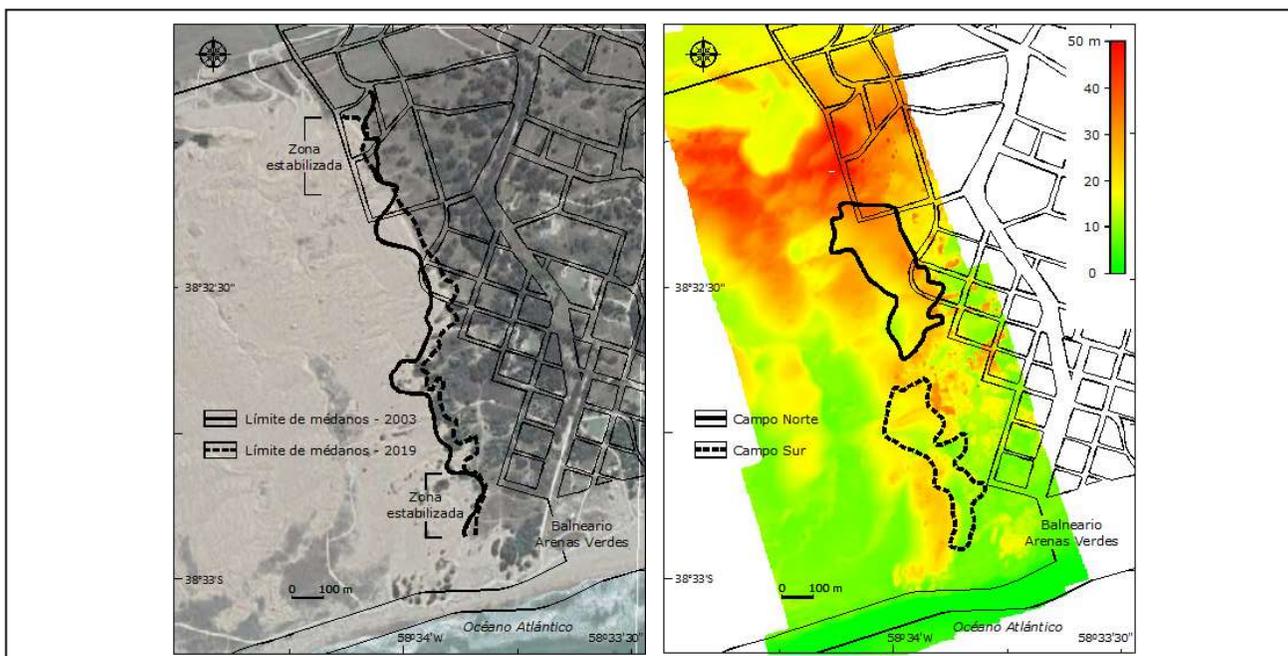


Figura 5. Derecha: Límite del frente de médano en el 2003 y en el 2019. Se aprecian tres zonas, dos estabilizadas (en los extremos) y una con mayor variación, en el centro. La imagen Google Earth® pertenece al 2019. Izquierda: Modelo digital del terreno de la zona estudiada, donde se aprecia el Campo Norte y el Campo Sur, durante el 2019. Las cotas están en metros.

A su vez, en esa zona central se han identificado por su estado de ocupación, un Campo Norte y otro Sur (Figura 5). El Campo Norte comprende unas 8 ha y afecta a unas 17 parcelas de la trama urbana. El Campo Sur es un médano de unas 6 ha sobre una única parcela rural. En este último, se advierte un frente de avance del médano que en poco tiempo alcanzará a la trama urbana del balneario, desde su sector SO.

Bértola y colaboradores (2020) consideraron que por sus dimensiones, sólo en el Campo Norte hay más de 1.920.000 tn de arena acumulada (si se calcula un frente de 850 m, un piso de explotación a cota 10 m.s.n.m. y un peso específico del material de 1,6 tn/m³). Comparando este valor con las casi 230.000 tn extraídas en el año 2016 por las tres empresas situadas en el Municipio de Lobería, sería equivalente a más de 8 años de explotación, con la clara ventaja y oportunidad, que la misma rehabilita parcelas y extrae material de la movilidad del médano que se interna en la zona urbana.

Luego de la extracción de esas arenas que han ocupado en gran medida la trama urbana, se podría continuar con un programa de explotación más sostenible. Estos autores determinaron una tasa de transporte promedio de 91 m³/m por año; en consecuencia si sólo se extrajese el material movilizado que corresponde al frente del médano (de 10 m de ancho, 850 m de largo y 3 m de altura) permitiría una extracción anual de más de 25.000 m³ que controlaría la cara de sotavento del médano migrante.

Características de las arenas de la localidad de Arenas Verdes

Las muestras revelan que las distribuciones granulométricas corresponden a arenas medianas a finas, y solo una posee fracción pefita (sábulo). El parámetro C (o Percentil 1) pertenece a las

arenas gruesas a muy gruesas. El desvío estándar permite apreciar que las muestras van de pobremente seleccionadas (M1 y M3) hasta buena selección (M4), y la asimetría fueron de negativas a simétricas (Tabla 2).

Al confeccionar el gráfico del IRAM 1627 (Figura 6), se evidencia que el 60% de los sedimentos de M1 son las que más se aproximan a la fracción fina requerida por la norma para su uso en hormigones. Las restantes arenas, sólo lo hacen en un 15% de su distribución total, por tener granos mucho más finos que el límite impuesto por la norma. Quizás en alguno de estos casos y si fuese su destino la fabricación de hormigones, sea conveniente la incorporación de arenas de trituración cuarcítica más gruesas para mejorar su calidad (*Bértola et al., 2018*).

DISCUSIÓN

En este sistema dinámico, el paisaje de los médanos interiores puede también entenderse como un sistema ecológico en constante cambio natural, y evolucionando en una escala de tiempo humana (*Stallins y Parker, 2003; Monserrat, 2010*). Esta dinámica es más tangible, cuando este sistema es intervenido por el hombre con el desarrollo de asentamientos humanos, extracciones de áridos, turismo y otras actividades conexas.

Producto del desarrollo de la infraestructura en localidades pequeñas, pueden desencadenarse conflictos con los elementos ambientales de la zona, como por ejemplo el avance de los médanos sobre la trama urbana, lo cual plantea un desafío de gran importancia a la hora de mantener la integridad de las propiedades y construcciones, sin comprometer en el proceso, la calidad ambiental ni la integridad ecosistémica de los componentes naturales, que resultan de un gran atractivo para el público que elige pasar sus vacaciones en estos lugares.

Tabla 2. Resultados de los análisis granulométricos.

Muestras	M1 - Arenera Monviso Forestal	M2 - Arenera Don José	M3 - Arenera Las Tres Plantas	M4 - Médano en la trama urbana
Ubicación	38°32'17"S58°34'15"O	38°32'30,77"S58°35'32,49"O	38°30'35,9"S58°26'17,0"O	38°32'43,2"S58°33'54,6"O
Parámetro C (mm)	1,347	1,079	0,986	0,590
Media (mm)	0,349	0,273	0,265	0,243
DSTD	1,029	0,796	1,033	0,492
Asimetría	-0,104	-0,181	0,004	-0,022
Psefitas (%)	0,04	0,00	0,00	0,00
Psamitas (%)	98,91	99,16	96,72	99,88
Pelitas (%)	1,05	0,84	3,28	0,12
Fracción Psefítica	100 % Sábulo	0,00	0,00	0,00
Arena Muy Gruesa (%)	4,96	1,26	0,79	0,03
Arena Gruesa (%)	27,64	13,39	18,04	1,41
Arena Mediana (%)	29,42	37,84	32,79	44,57
Arena Fina (%)	32,32	43,27	34,63	52,02
Arena Muy Fina (%)	4,57	3,41	10,47	1,85
Percentil 1	Arena Muy Gruesa	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa
Media	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Fina
Desvío estándar	Pobrementeseleccionada	Moderadamenteseleccionada	Pobrementeseleccionada	Buenaselección
Asimetría	Negativa	Negativa	Casi Simétrica	Casi Simétrica

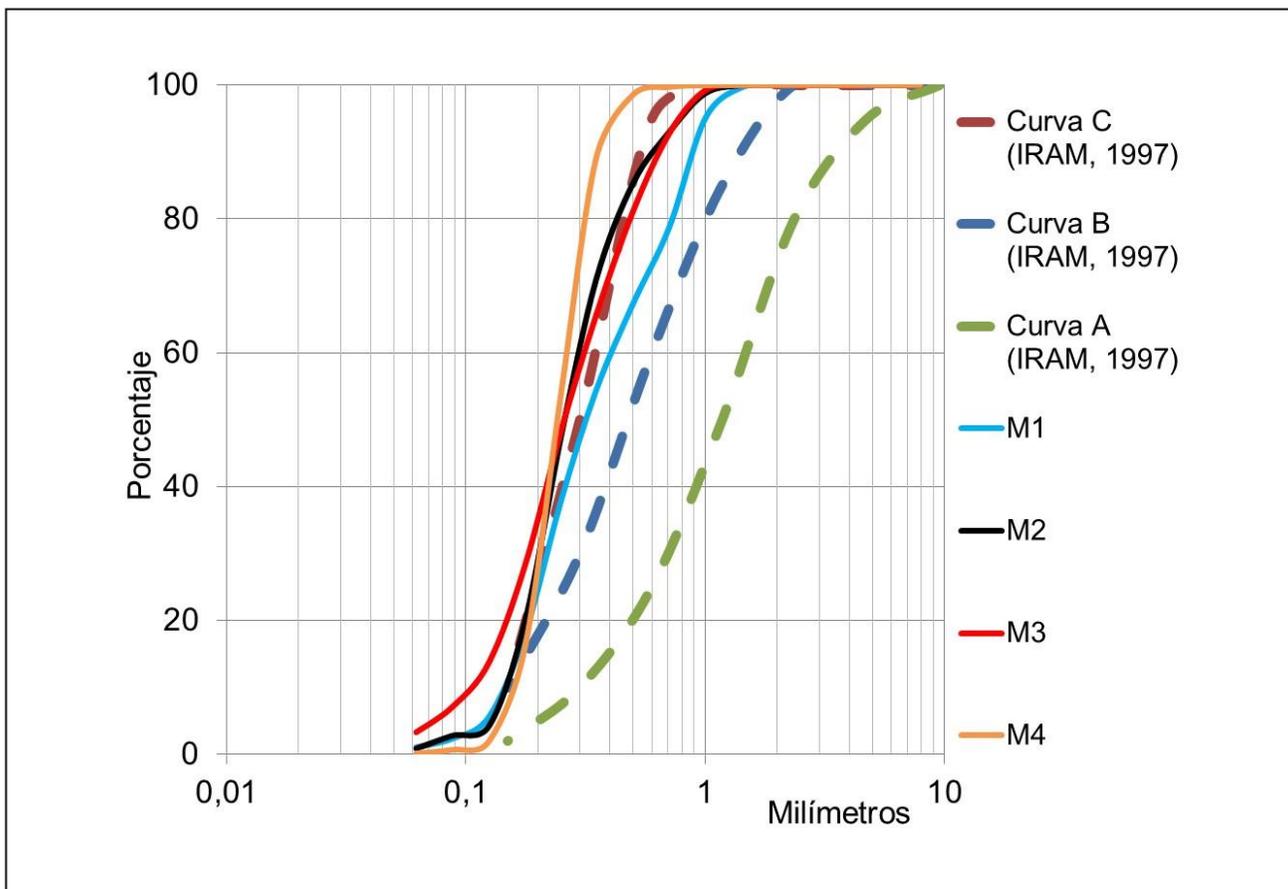


Figura 6. Curvas de frecuencias de las muestras, junto a los límites (según Norma IRAM 1627) para los agregados finos (curva A, B y C) para hormigones.

El asentamiento turístico de Arenas Verdes afronta como problema ambiental de génesis geomorfológica el avance de los médanos, lo cual genera un perjuicio patrimonial para los propietarios de los terrenos y para el gobierno municipal. Despejar estas parcelas obliga al municipio y a los particulares a una intervención constante con altos costos que podrían reducirse mediante una actividad minera de intensidad controlada que debería estar enfocada en los criterios de renovabilidad del recurso y sostenibilidad de la actividad.

Estas acciones, como se verá a continuación, implican la necesidad de establecer parámetros que definan condiciones que minimicen los efectos negativos de la actividad extractiva, incorporando sectores de bajo desarrollo ecológico y diseños mineros adecuados aplicables a las explotaciones medanosas. Siguiendo como criterio general lo expresado por *Jungerius y van der Meulen (1988)*, podemos reconocer 3 escenarios (Figura 7).

De mayor incidencia de procesos geomorfológicos, mínimo desarrollo edafológico y complejidad ecológica baja, donde las comunidades biológicas están poco desarrolladas dejando sedimento para el transporte y permitiendo el desarrollo de médanos migrantes.

Un escenario intermedio, con procesos geomorfológicos y biológicos moderados y la incipiente formación de horizontes distintivos en el perfil de suelos.

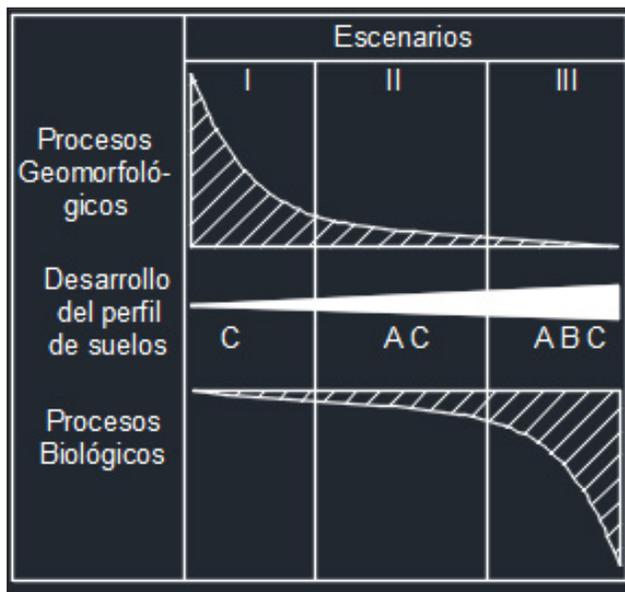


Figura 7. Representación esquemática de ecosistema de médanos (*Jungerius y van der Meulen, 1988*).

Una escenario de máxima complejidad ecológica y edáfica, con mínima actividad geomorfológica relativa causado por la alta estabilización del médano (*Taverna et al., 2018*).

Desde un punto de vista ecológico, se contempla evitar afectar a comunidades mucho más desarrollada que en otras zonas del médano, que lo que acontece en el sector de avance de un médano vivo donde imperan los procesos geomorfológicos por sobre los ecológicos. La propuesta no es quitar el médano, sino sólo establecer un control sobre una duna migrante, por lo que las condiciones a nivel de barrera, no se verían afectadas.

De acuerdo con lo expuesto consideramos que la extracción limitada de las arenas móviles del frente de avance de los médanos migrantes sobre terrenos pampeanos que alojen el acuífero freático, refleja la mejor condición ambiental para la localización de una arenera. Esta condición se expresa en particular, donde encontramos los frentes de sotavento de los médanos transversales o barjanoides migrantes sobre terrenos continentales que corresponden a los Campos Norte y Sur (Figura 5).

El beneficio neto podría ser una adecuada fuente de recursos genuinos para la promoción e impulso de distintos programas ambientales municipales, teniendo en cuenta que la infraestructura y la inversión de inicio serían modestas para efectuar la explotación del sector del médano migrante.

CONCLUSIONES

El estudio de esta área costera, demostró la existencia de médanos activos progradantes con una velocidad de migración de hasta 5 m/año durante la última década. Este avance, conlleva grandes volúmenes de arena que compromete seriamente las propiedades establecidas en la localidad de Arenas Verdes. Son arenas que por su calidad granulométrica, pueden ser usados como áridos finos.

El conocimiento de los ecosistemas y las geoformas, permite comprender qué áreas del sector de médanos pueden ser pasibles de explotación bajo criterios de sostenibilidad.

La vida útil del yacimiento sería prolongada en función de la captación del material que se encuentra en tránsito, ya que si la actividad minera extrae la misma cantidad de arena que entra al sistema, no tendría efectos adversos significativos. Toda vez que a diferencia de algunas areneras en Lobería, la extracción se circunscribiría a un frente móvil de baja complejidad ecológica.

Creemos que una adecuada planificación territorial que contemple una gestión minera de intensidad controlada y un diseño de explotación sobre el frente de sotavento del médano, puede reducir la vulnerabilidad de Arenas Verdes y generar recursos para el municipio, que mantendría su rol de proveedor regional de áridos, sin producir necesariamente, un alto impacto en el ecosistema medanoso.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue elaborado en el marco del Proyectos de Innovación y Transferencia en Áreas Prioritarias de la Provincia de Buenos Aires (PIT-AP-BA) durante el 2018, y financiando por la Comisión de Investigación Científica de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Los autores agradecen al IGCyC (UNMDP-CIC) por la logística y la posibilidad de realizar este proyecto en sus instalaciones. Un agradecimiento especial a los Dres. Martínez y Osterrieth.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AGUILAR, M. (2009).
Programa Multisectorial de Preinversión III - Préstamo BID 1896/OC-AR.
Plan de desarrollo local para el municipio del Partido de Lobería. Estudio 1.EE.292. Informe Final Inédito. 185 pp.
- AL-ANSARY, M., POPPELREITER, M., AL-JABRY, A., Y IYENGAR, S. (2012).
Geological and physiochemical characterisation of construction sands in Qatar.
International Journal of Sustainable Built Environment 1:64-84
- ANCTIL, F. Y OUELLET, Y. (1990).
Preliminary evaluation of impacts of sand extraction near Iles-de-la-Madeleine Archipelago, Quebec, Canada.
Journal of Coastal Research 6, 37-51.
- AYALA CARCEDO, F., VALDILLO FERNÁNDEZ, L., FRUTOS GÓMEZ, M., MANGLANO ALONSO, S., MATAIX GONZÁLEZ, C. Y TOLEDO SANTOS, J. (1999).
Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.
Instituto Tecnológico Geominero de España. 125 pp.
- BAGNOLD, R. (1941).
The Physics of Blown sand and desert dunes.
London: Methuen. 25 pp.
- BAUER, B., DAVIDSON-ARNOTT, R., HESP, P., NAMIKAS, S., OLLERHEAD, J. Y WALKER, I. (2009).
Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch and mean transport.
Geomorphology 105:106-116
- BÉRTOLA G., FARENGA, M., FERNÁNDEZ, J., TAVERNA, B., ANTENUCCI, D. Y DEL RÍO, J. (2020).
Aprovechamiento sustentable de áridos dunarios en el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires.
Actas del XII Congreso Argentino de Geología Económica. De Barrio (ed). CABA. Asociación Argentina de Geólogos Economistas (AAGE). 12 pp.
- BÉRTOLA, G., LEGGIERO, J., MARTÍNEZ, G. Y DEL RÍO, L. (2018).
La provisión de arenas en la costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires (Argentina): áridos naturales y de trituración.
V Congreso Nacional de Áridos, Actas:86-97, Santiago de Compostela.

- BLOTT, S. Y PYE, K. (2001).
GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments.
Earth surface processes and Landforms, 26(11):1237-1248.
- BORGES, P., ANDRADE, C. Y FREITAS, M. (2002).
Dune, Bluff and Beach Erosion due to Exhaustive Sand Mining. The Case of Santa Barbara Beach, São Miguel (Azores, Portugal).
Journal of Coastal Research 36:89-95.
- CABALLÉ, M. Y BRAVO ALMONACID, M. (2006).
Minería Costera. Isla y Lasta (eds).
Manual de Manejo Costero para la Provincia de Buenos Aires. EUDEM. 281 pp.
- CABRERA, A. (1976).
Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería: regiones fitogeográficas Argentinas:
Acme. 221 pp.
- CAMINO, M., LÓPEZ DE ARMENTIA, A., BO, M. J. Y DEL RÍO, J. (2011).
Análisis de las variaciones en la función amenidad de ambientes costeros por efecto de la minería de áridos y la urbanización. Caso de estudio: Mar del Sud, provincia de Buenos Aires.
Jornadas Patagónicas de Geografía: Organización Espacial y Social: Desafíos de la Geografía Actual. Resúmenes, Comodoro Rivadavia. 2 pp.
- CELSI, C. (2009).
Estructura vegetal y composición florística en el sistema de dunas costeras aledaño al balneario Arenas Verdes (Lobería, Buenos Aires).
Actas de las VII Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar. 6 pp.
- CELSI, C. Y ATHOR, J. (2016).
La vegetación de las dunas costeras pampeanas. La Costa Atlántica de Buenos Aires. Naturaleza y Patrimonio Cultural.
Fundación de Historia Natural Félix de Azara, 116-138.
- CELSI, C. Y MONSERRAT, A. (2008).
La vegetación duncícola en el frente costero de la Pampa Austral (Partido de Coronel Dorrego, Buenos Aires).
Multequina 17:73-92.
- CORTIZO, L. E ISLA, F. (2007).
Evolución y dinámica de la barrera medanosa entre los arroyos Zabala y Claromecó, partidos de San Cayetano y Tres Arroyos, Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 62(1):3-12.
- DEL RÍO, J., ANTENUCCI, D., MARTÍNEZ, G., BÉRTOLA, G., OSTERRIETH, M., BOCANEGRA, E., MANTECÓN, C., CICHINO, A., TAVERNA, B., PIANANIDA, F., FERNÁNDEZ HONAINÉ, M., BÓ, M., CAMINO, M. Y LUPO, S. (2018).
Análisis de los impactos ambientales y desarrollo de criterios de sustentabilidad ambiental para las explotaciones de áridos naturales del sistema de dunas aplicables al desarrollo urbano e infraestructura de las ciudades de la costa atlántica bonaerense.
Informe Final CIC. 144 pp.
- DEL RÍO, J., PIANANIDA, F., ANTENUCCI, D., MOLINA, H., CICHINO, A., DENISIENIA, N., MARTÍNEZ, G., TAVERNA, B., FARENGA, M. Y LUPO, S. (2017).
Huella geomorfológica de actividades mineras en las dunas de la barrera oriental de la costa atlántica bonaerense: relación con otras actividades.
3er Congreso Argentino de Áridos 2017: 203-207.
- DURÁN, O. Y MOORE, L. (2013).
Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes.
Proceedings of the National Academy of Sciences 110(43):17217-17222.
- ELLIS, J. Y SHERMAN, D. (2013).
Fundamentals of aeolian sediment transport: Wind blown sand, Treatise on Geomorphology.
Academic Press, San Diego, CA. Aeolian Geo (11):85-108
- FOLK, R. Y WARD, W., 1957.
A Study in the Significance of Grain-Size Parameters.
Journal of Sedimentary Petrology 27:3-26.
- FOX, R. (1993).
The offshore aggregate industry in the UK.
Underwater Technology 19(2). 17 pp.
- GALLEGO VALCARCE, E. Y VADILLO FERNÁNDEZ, L. (1992).
Reclaiming areas degraded by mining operations. In Cendrero, Luttig y Wolf (Eds.).
Planning the use of the Earth's Surface. Berlin:Springer. 247 pp.

- GUIMARAES, P., PEREIRA, P., CALLIARI, L. Y ELLIS, J. (2016).
Behavior and identification of ephemeral sand dunes at the backshore zone using video images.
Anales Academia Brasileira Ciências 88 (3):1357-1369
- HESP, P. (1999).
The beach backshore and beyond, in *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*,
ed. A. D. Short (Brisbane, Australia: John Wiley and Son). 32 pp.
- HESP, P. Y HILTON, M. (1996).
Nearshore-surfzone system limits and the impact of sand extraction.
Journal of Coastal Research 12(3):726-747.
- HESP, P. Y HYDE, R. (1996).
Flow dynamics and geomorphology of a trough blowout.
Sedimentology 43:505-525.
- HILTON, M. (1989).
Management of the New Zealand coastal sand mining industry: Some implications of a geomorphic study
of the Pakiri sand body.
New Zealand Geographer 45:14-25.
- HILTON, M. (1990).
Applying the principle of sustainability to coastal sand mining: The case of Pakiri-Mangawhai Beach, New Zealand.
Environmental Management 18:17-24.
- HSU, S. (1974).
Computing eolian sand transport from routine weather data.
Proceedings of the XIV Conference on Coastal Engineering:1619-1626.
- IRAM (1997). NORMA N°1627.
Agregados, granulometría de los agregados para hormigones.
Instituto Argentino de Normalización. 23 pp.
- JUNGERIUS, P. Y VAN DER MEULEN, F. (1988).
Erosion processes in a dune landscape along the Dutch coast.
Catena 15(3-4):217-228.
- KOIRALA M. Y JOSHI E. (2017).
Construction sand, Quality and supply management in infrastructure project,
International Journal of Advances in Engineering & Scientific Research 4(4):1-15.
- LÓPEZ, R. Y MARCOMINI, S., 2002.
Pautas para el manejo costero en costas de dunas y acantilados, Provincia de Buenos Aires.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 18: 59-68.
- MARCOMINI, S. Y LÓPEZ, R., 2006.
Geomorfología costera y explotación de arena de playa en la Provincia de Buenos Aires
y sus consecuencias ambientales.
Revista Brasileira de Geomorfología 7(2):61-71.
- MONSERRAT, A. (2010).
Evaluación del estado de conservación de dunas costeras: dos escalas de análisis de la costa pampeana.
Tesis Doctoral. UBA, Buenos Aires. 155 pp.
- PILKEY, O., YOUNG R., KELLEY J. Y GRIFFITH A. (2007).
Mining of coastal sand: a critical environmental and economic problem for Morocco.
White Paper; Western Carolina University: Cullowhee, NC, USA. 45 pp.
- PITCHALAH, P. (2017).
Impacts of Sand Mining on Environment.
International Journal of Geoinformatics and Geological Science 4(1). 5 pp.
- SORIANO, A. (1991).
Río de la Plata grassland.
En: Coupland, R. T. (Ed.) *Natural grasslands. Introduction and Western Hemisphere* :367-407. Amsterdam: Elsevier.
- STALLINS, J. Y PARKER, R. (2003).
The influence of complex systems interactions on barrier island dune vegetation pattern and process.
Anales Asociación Americana Geografía 93:13-29
- TAVERNA, B., DEL RÍO, J. Y ANTENUCCI, D. (2018).
Patrón de micro distribución de *Ctenomys Talarum* en su rol como bioindicador en un pasivo de explotación
de arenas en dunas costeras.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 41: 33-44

- TERUGGI, L., MARTINEZ, G., BILLI, P. Y PRECISO, E. (2004).
Geomorphologic units and sediment transport in a very low relief basin: Rio Quequén Grande, Argentina.
IAHS Publication Vol. 299. Catalonia, España. 25 pp.
- WILBURN, D. Y GOONAN, T. (1998).
Aggregates from Natural and Recycled Sources. Economic Assessments for Construction Applications -
A Materials Flow Analysis.
U.S. Geological Survey Circular 1176. 37 pp.
- ZINGG, A. (1952).
A study of the characteristics of sand movements by wind. M.S.
Thesis. Dept. of Agricultural Engineering, Kansas State College. Kansas (USA). 255 pp.



Caracterización geomecánica de los taludes de la autovía RP N° 20, municipio de El Volcán, provincia de San Luis

Geomechanical characterization of the slopes of provincial route 20, municipality of El Volcan, province of San Luis

Denaro, Juan F. ✉ - Sales, Daniel A. ¹

Recibido: 26 de octubre de 2020 • Aceptado: 05 de octubre de 2021

Resumen

En este trabajo se analizan las condiciones geomecánicas de los taludes de precorte desarrollados en las márgenes de la autovía de la ruta Prov. N° 20, desde las inmediaciones del embalse Cruz de Piedra (Juana Koslay) hasta la localidad de El Volcán, en el extremo sur de la sierra de San Luis.

El macizo rocoso se encuentra afectado principalmente por un sistema de fallas extensionales con dirección predominante NO-SE y alto ángulo de inclinación al NE, que dieron origen a la depresión tectónica de Las Chacras-Cruz de Piedra en la zona de estudio.

La disposición de la traza vial respecto a la estructura principal, generan problemas de inestabilidad en los taludes a partir de roturas planar y en cuña, provocando deslizamientos traslacionales y caída de bloques a la calzada vial.

En los taludes más inestables, se realizó el análisis de estabilidad a partir de las condiciones geomecánicas del macizo y geométricas del corte.

Los resultados obtenidos indican que los taludes con mayor amenaza de inestabilidad, presentan índice RMR con calidad "muy mala" (clase V) a "media" (clase III), índice SMR con calidad "mala" (clase IV) a "normal" (clase III), e índice GSI "BII/B-M".

En el análisis de estabilidad presentan FS "bajo" (0.3 a 0.8).

Palabras claves: geomecánico - macizo rocoso - taludes - análisis de estabilidad.

Abstract

In this paper, the geomechanical conditions of the precut slopes developed on the margins of the provincial route 20, from the environs of the Cruz de Piedra reservoir (Juana

1. Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, San Luis.

✉ jfdenaro@gmail.com, sales@unsl.edu.ar

Koslay) to the town of El Volcán, on the extreme south of the Sierra de San Luis are analyzed.

The rock mass is affected by a system of extensional faults with a predominant NW-SE direction and a high angle of inclination to the NE, which gave origin to the Las Chacras - Cruz de Piedra tectonic depression in the study area.

The disposition of the road in relation to the main structure generates instability problems in the slopes from wedge and planar breaks, with the development of translational landslides and blocks falls.

The results obtained indicate that the slopes with the greatest threat of instability have an RMR index with "very bad" quality (class V) to "medium" (class III), SMR index with "bad" quality (class IV) and "normal" (class III), and GSI index "BI/B-M".

In the stability analysis they present "low" FS (0.3 - 0.8).

Keywords: *geomechanical - rock mass - slopes - stability analysis - risk.*

INTRODUCCIÓN

El área de estudio involucra al tramo de la autovía de la ruta provincial N° 20 (RPN°20), desde las inmediaciones del barrio Cerros Colorados (Juana Koslay) (coordenadas 33°15'05" S - 66°13'22" O) hasta la localidad turística de El Volcán, en el municipio homónimo (coordenadas 33°15'10" S - 66°11'00" O), con una extensión aproximada de 5,5 km, en el extremo sur de la sierra de San Luis (Figura 1).

La ampliación de la antigua traza vial en el año 2006 para convertirla en autovía, produjo un cambio en la geometría de los taludes existentes, el desarrollo de otros y la modificación en las tensiones naturales del terreno, dando como resultados fenómenos de remoción en masa (caída de rocas y deslizamientos). Este trabajo busca reflejar las condiciones geológicas y geotécnicas de los taludes de precorte, que no se tuvieron en cuenta en la

etapa constructiva de la autovía, a fin de conocer la respuesta del macizo ante la acción antrópica. Para conocer estas condiciones de los cortes, se seleccionaron los taludes más representativos con problemas de inestabilidad, a fin de evaluar los parámetros cuantitativos de las discontinuidades junto a su matriz rocosa, y determinar las condiciones geotécnicas del mismo, a través del análisis de estabilidad para los diferentes tipos de roturas del macizo.

La geología del tramo de la zona de estudio está conformada por un basamento ígneo-metamórfico (Figura 2). Las rocas graníticas pertenecen al plutón El Volcán de edad Devónica (Morosini, 2011), con una foliación predominante NNE-SSO y buzamiento hacia el ESE, integrada por facies sienograníticas y monzodioríticas, las cuales están intruidas por diversos diques aplo-pegmatíticos. Las rocas metamórficas afloran en el extremo

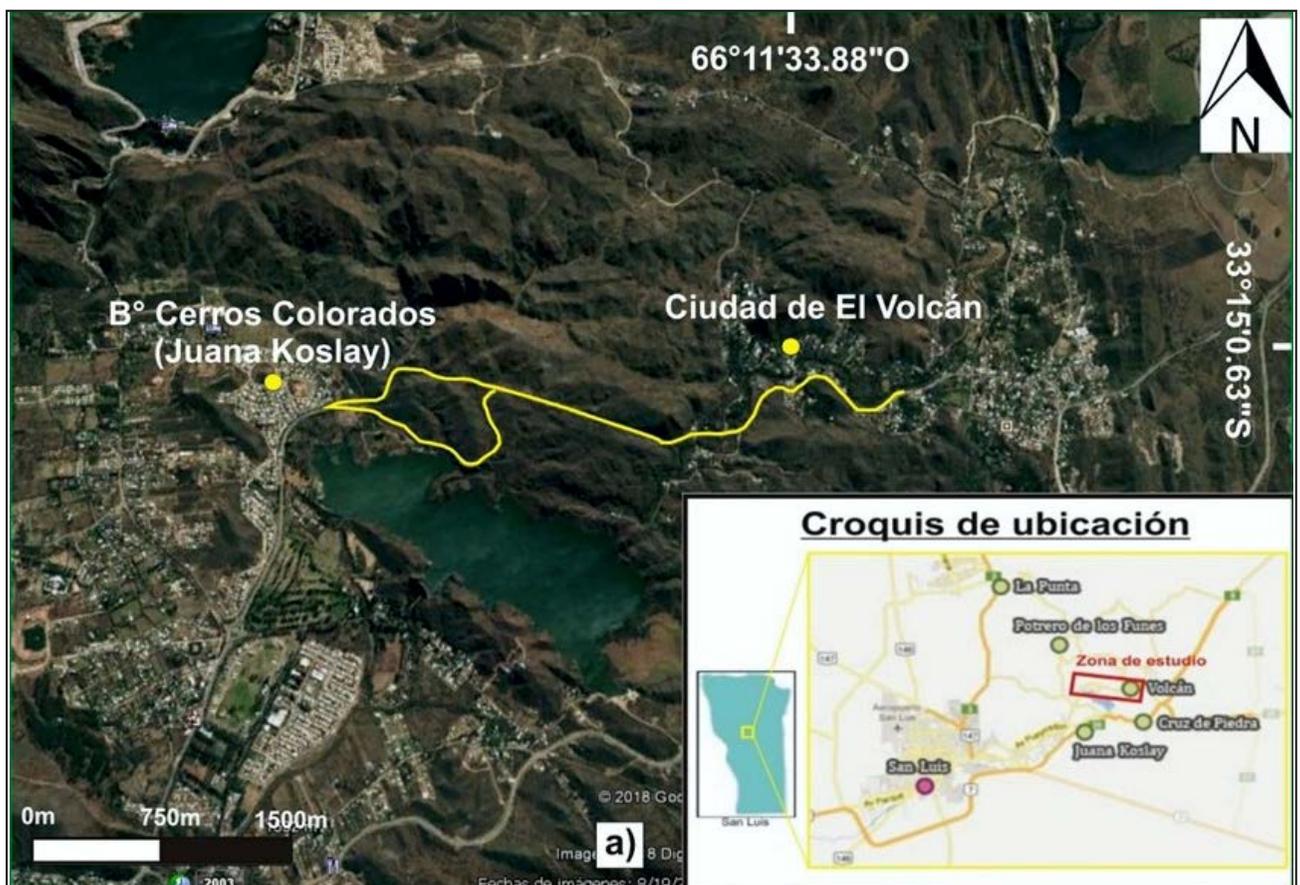


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (imagen modificada de Google Earth).

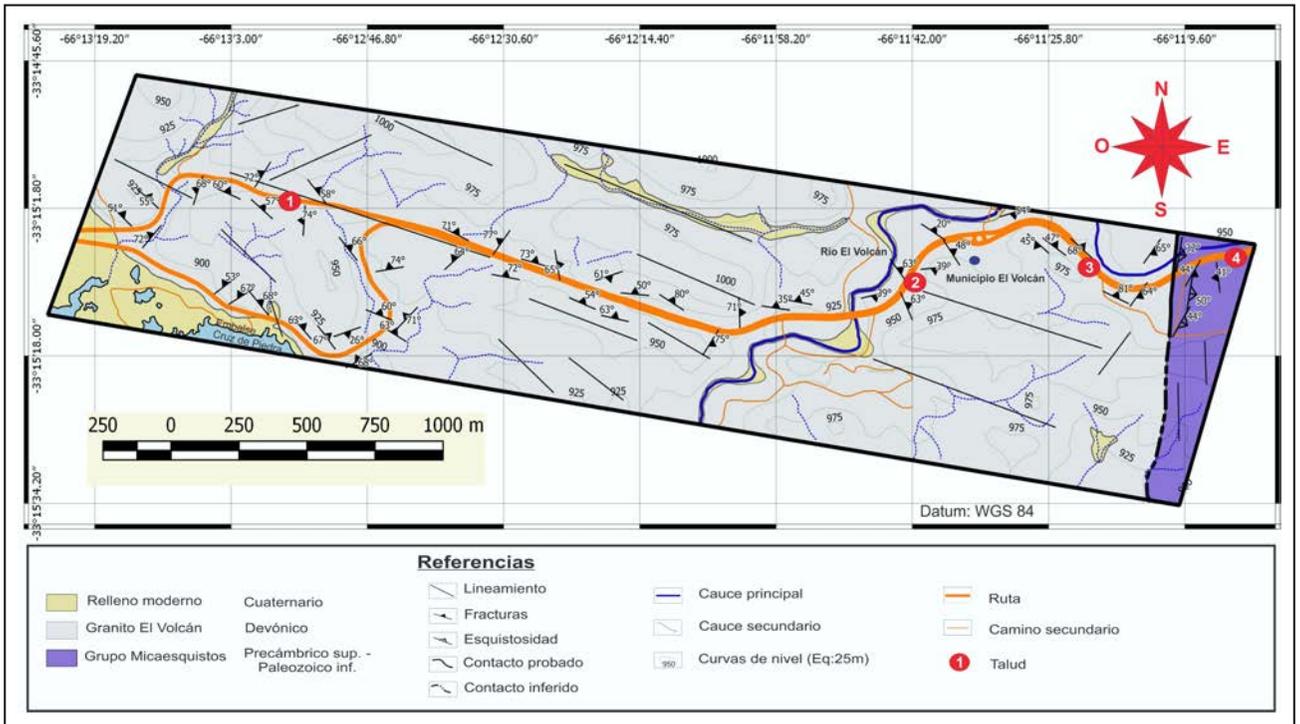


Figura 2. Mapa geológico y estructural del área de estudio.

oriental del área de trabajo, representadas por esquistos del Grupo Micaesquistos (*von Gosen y Prozzi, 1998*) que alternan con bancos de cuarcitas de edad Precámbrico - Paleozoico inferior.

Los rasgos morfoestructurales de esta zona, se relacionan con la formación de hemigraben que dieron lugar a las depresiones tectónicas de Potrero de los Funes y Las Chacras-Cruz de Piedra (*Costa, 1992; Costa y Cortés, 1993*), mediante estructuras extensionales con dirección NO-SE e inclinación al NE, que interactúan con otras estructuras de la deformación frágil del basamento ígneo-metamórfico. La Figura 3, muestra la imposición de estas estructuras en una población de 416 planos de discontinuidades analizados en los diez (10) taludes de precorte seleccionados, de un total de veintiocho (28) existentes en la zona de estudio. Se consideró en la selección de los taludes para el

desarrollo de esta contribución, su condición de mayor inestabilidad en los cortes y la orientación de los mismos.

Diferentes contribuciones relacionadas con estudios geomecánicos se llevaron a cabo en el ámbito de las depresiones tectónicas mencionadas (*Sales et al., 2001; Farioli y Sales, 2018; Denaro y Sales, 2018a; Gómez y Sales, 2018a*).

MARCO METODOLÓGICO

Para el análisis geomecánico de los taludes, se midieron los planos de la deformación frágil del macizo rocoso, en base al método sugerido para la descripción cuantitativa de discontinuidades desarrollado por la *International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981)*, que fueron analizados estadísticamente a través del programa Excel. Los sitios de análisis se fueron determinando en un segmento de 5 m cada 50 m de separación promedio. Se consideraron aquellos tramos donde habían cambios de litología, zonas de cizalla frágil o de la dirección de la traza vial.

La resistencia de la matriz rocosa fue estimada a través del martillo de Schmidt, que consiste en obtener el número de rebote de las diferentes discontinuidades en afloramiento y vincularlo con ayuda de ábaco a la resistencia a la compresión simple. Para tal motivo, se estimó la densidad promedio de las rocas en 25 kN/m³.

La calidad de la roca se calculó a partir del Índice RQD (Rock Quality Designation Index) de *Deere (1963)*, que es estimado en afloramiento a partir de la expresión empírica de *Palmstrom (1975)*, donde se considera el total de discontinuidades por metro cúbico (*J_v*) según la ecuación 1.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (\text{ecuación 1})$$

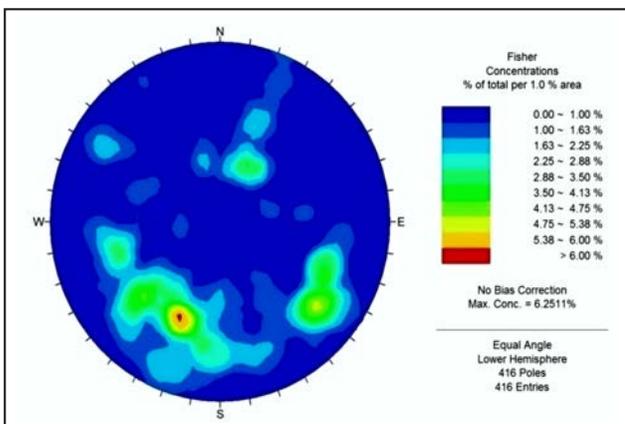


Figura 3. Diagrama de frecuencia de polos de la totalidad de las discontinuidades (N= 416) analizadas en la traza vial en diez (10) taludes seleccionados

Para la clasificación geomecánica de taludes, se utilizaron para el cálculo de la calidad del macizo rocoso los índices: RMR (Rock Mass Rating) de *Bieniawski (1979)* y SMR (Slope Mass Rating) de *Romana (1997)*. También se determinó el índice GSI (Geological Strength Index) de *Hoek y Brown (1997)*, con la finalidad de conocer las características generales de los afloramientos.

El índice RMR, se determina mediante la suma de los siguientes parámetros: resistencia a la roca inalterada (R1), índice RQD (R2), espaciamiento de las discontinuidades (R3), estado de las discontinuidades (R4), condición del agua (R5). A su vez, el valor obtenido se corrige con la orientación (R6), dispuesta entre la cara libre del talud y la discontinuidad que presenta problemas de inestabilidad.

En la determinación del índice SMR se empleó la ecuación 2.

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde, el RMR utilizado en la ecuación 2 por *Romana (1997)*, corresponde al índice sin corrección por orientación. Los valores de F1, F2 y F3 representan factores de ajuste en función de la relación entre las orientaciones de las discontinuidades y la cara libre del talud. El factor F4 resulta del método de excavación desarrollado.

Respecto al índice GSI, éste se define en terreno a partir de la relación entre las estructuras del macizo y las condiciones de éstas en su frente. La estructura se clasifica en: bloques regulares (BR), bloques irregulares (BI), bloques y capas (BC) y fracturación intensa (FI). Las condiciones del frente se clasifica en: muy buena (MB), buena (B), media (M), pobre (P) y muy pobre (MP).

Para el análisis de estabilidad de los taludes seleccionados, se tuvo en cuenta la geometría (H: altura máxima y α : ángulo máximo de inclinación), la densidad promedio de las rocas y las condiciones geomecánicas del macizo. Se definieron además, los parámetros resistentes del macizo, considerando los valores de cohesión (c) y ángulo de rozamiento interno (j) estimado según el índice RMR sin corrección por orientación.

Los procesos de remoción en masa mencionado en este trabajo, corresponde a la clasificación de *Varnes (1984)*.

En la determinación del factor de seguridad (FS) para rotura planar y rotura en cuña, se utilizó el software *Rocscience (2013)*, en condiciones de un macizo con humedad y sin cargas externas.

En el cálculo del FS para rotura por vuelco, se llevó a cabo a partir del análisis de la proyección estereográfica de polos y planos según el programa *Dips (Rocscience Ind, 2013)*.

ANÁLISIS GEOMECÁNICO

Se analizaron los parámetros cuantitativos mediante el método sugerido por *ISRM (1981)*, para 416 discontinuidades analizadas, distribuidas en diez (10) taludes de precorte seleccionados.

Los taludes presentan en su mayoría cara libre con ángulo de inclinación moderado a alto (60° y 90°), alturas relativamente bajas (2 a 14m) y longitudes variables (40 a 137m).

La Figura 4, muestra el predominio de estos parámetros cuantitativos en las diferentes familias de discontinuidades analizadas, donde se destacan espaciamiento entre 20-60cm (51,39%), continuidades menores al metro (62,83%), aberturas entre

1-5 milímetros (53,63%), con superficies con rugosidad media (42,37%).

El macizo granítico del área de estudio no presenta filtraciones en la mayoría de las discontinuidades (95,23%), generalmente sin relleno en el 74,49% de los planos descriptos. Los pocos casos observados de filtración y relleno, corresponden a los afloramientos metamórficos.

La respuesta del macizo al rebote del martillo de Schmidt, el 64,86% de la población analizada (N=416) corresponden a rocas muy duras. El grado de meteorización en los taludes graníticos es baja y alta en los afloramientos metamórficos.

Respecto a los valores del índice RQD estimado para afloramientos (*Palmstrom, 1975*) y según la clasificación de *Deere (1963)*, en el 43,81% de los taludes graníticos tienen calidad de roca "regular" (RQD: 50-75 %) y en los taludes metamórficos, la calidad de la roca varía de "muy mala a mala" (RQD < 50%).

A partir de las características geomecánicas de los afloramientos y de la relación existente entre la orientación del talud y las discontinuidades que generan mayor inestabilidad, se estimó la calidad del macizo rocoso utilizando las clasificaciones geomecánicas anteriormente citadas.

Para la clasificación geomecánica de los taludes de precorte, solo se describieron las condiciones de cuatro (4) taludes seleccionados y que representan las condiciones de menor grado de estabilidad del total analizado. Los taludes N° 1, 2 y 3 se desarrollan en rocas graníticas, mientras que el talud N° 4 en rocas metamórficas (Figura 2). Las principales características geomecánicas de los taludes se describen en la Tabla 1.

El talud N°1 se localiza en rocas graníticas en el sector conocido como Cuesta del Gato. En este tramo, la autovía deja de tener doble sentido y solo se transita por la antigua traza de la ruta, desde la localidad de El Volcán hacia la localidad de Juana Koslay (Figuras 1 y 2).

Este sector representa el sitio de mayor amenaza por procesos de remoción en masa, a lo largo de 150 m de longitud aproximada, carente de banquina a ambos lados de la traza vial.

Los planos del sistema de fallas extensionales sobre la margen sur del camino, buzan a favor de la pendiente (Figura 5). El macizo presenta problemas de inestabilidad por roturas del tipo planar y cuña, generando procesos de remoción a través de deslizamientos traslacionales. Esto ocurre principalmente en épocas de lluvias torrenciales de corta duración. Sobre la margen norte del camino, los planos de fallas normales presentan rotura por vuelco en el talud opuesto, que en raras ocasiones presenta caída de material por volcamiento de bloques.

En la determinación de la calidad del macizo rocoso para taludes, se estima una calidad "muy mala" (índice RMR con corrección por orientación) y "mala" (índice SMR) (Tabla 2). El afloramiento según el índice GSI, se clasifica "bloques irregulares con una condición del frente buena" (BI/B) (Tabla 2).

El talud N°2 se desarrolla en rocas graníticas en la margen norte de la autovía, en cercanía de la localidad de El Volcán (Figura 2). El macizo presenta una intensa fracturación afectado por cizalla frágil, generando roturas del tipo planar y en cuña (Figura 6).

En la determinación de la calidad del macizo rocoso para taludes, presenta calidad "muy mala" (índice RMR con corrección) y "mala" (índice SMR) (Tabla 3). El afloramiento según el índice GSI, se clasifica "bloques irregulares con una condición del frente buena" (BI/B) (Tabla 3).

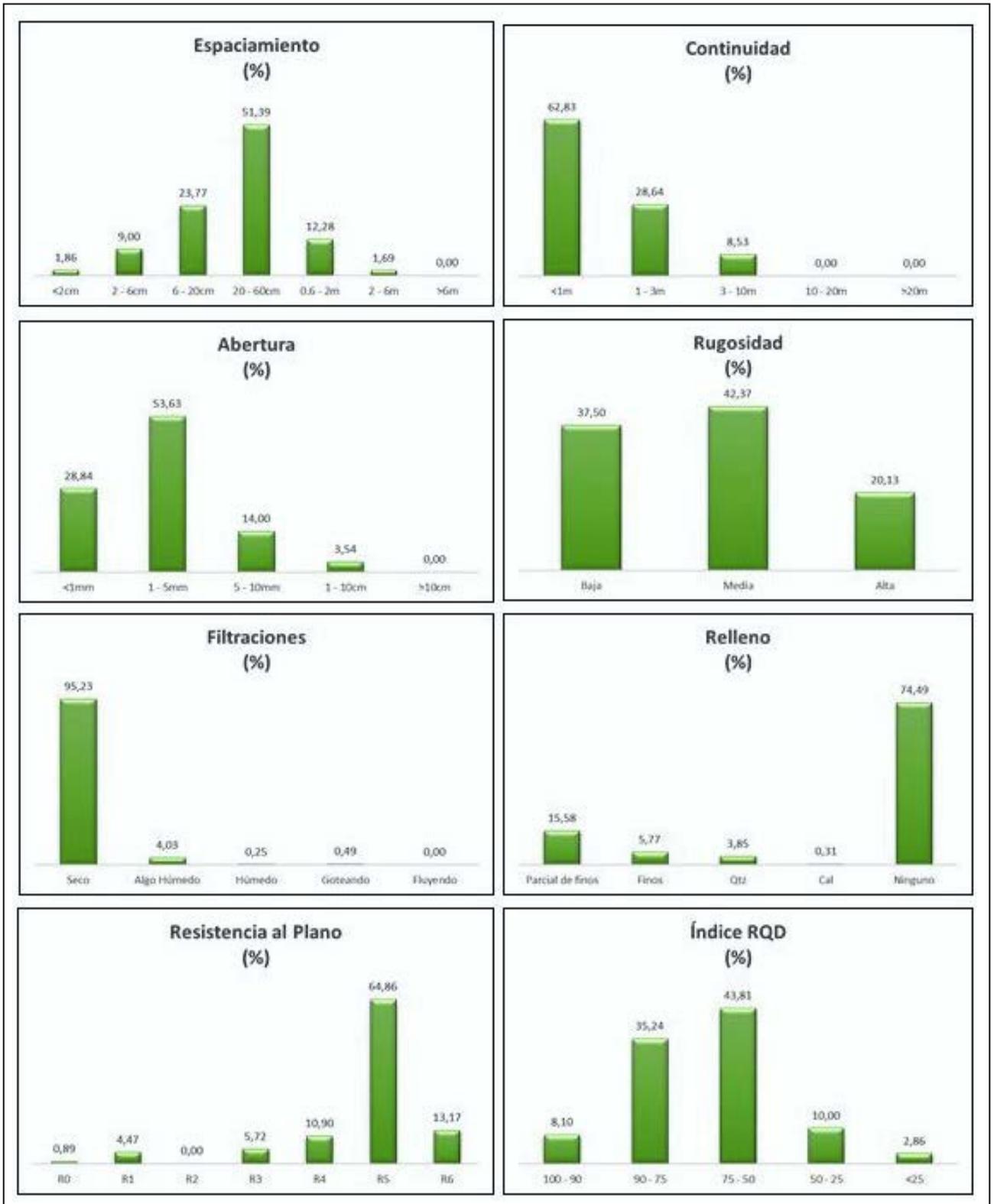


Figura 4. Representación estadísticas de los parámetros cuantitativos de las discontinuidades analizadas (N= 416) en 10 taludes representativos

Tabla 1. Síntesis de los parámetros cuantitativos de las discontinuidades de cuatro taludes seleccionados.

SECTOR: Autovía RPN°20	Tramo: B° Cerros Colorados (J.Koslay) – El Volcán Coordenadas de inicio: 33°15'05" Lat S. y 66°13'22" Long. O Coordenadas de final: 33°15'10" Lat S. y 66°11'00" Long. O			
Matriz rocosa	Granítica (Taludes N° 1, 2 y 3) y esquistos (Talud N° 4)			
CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS				
TALUD N°	1	2	3	4
Orientación (Dbz/bz)	33°/59°	68°/65°	31°/56°	110°/45°
	214°/36°	174°/37°	204°/43°	203°/84°
	273°/71°	285°/62°	329°/72°	263°/42°
	304°/71°		127°/64°	295°/65°
Espaciamiento	20-60cm			2-6cm
Persistencia	< 1m			
Rugosidad	Baja	Baja	Media	Baja
Abertura	1-5mm	5-10mm	1-5mm	1-5mm
Humedad	no			
Relleno / Sellamiento	no			
Resistencia al plano (Mpa)	132	110	95	48
Índice RQD (%)	75 - 90	50 - 75	50 - 75	25 - 50
Grado de alteración	baja			alta
Disgregación mecánica	baja			alta
Tamaño de bloques	< 1 m ³			

El talud N°3 se encuentra en la terminación oriental de los afloramientos graníticos. Se expone en la margen norte de la autovía en la zona urbana de la localidad de El Volcán (Figura 2). El macizo está afectado parcialmente por cizalla frágil. En la relación entre la orientación del talud y las estructuras, se generaron roturas del tipo planar, en cuña y vuelco (Figura 7).

La calidad estimada del macizo rocoso para taludes, es “media” (índice RMR con corrección) y “mala” (índice SMR) (Tabla 4). El afloramiento según el índice GSI, se clasifica “bloques irregulares con una condición del frente mala” (BI/M) (Tabla 4).

Por último, el talud N°4 se desarrolla sobre la margen sur de la autovía sentido al noreste, en el ámbito urbano de la localidad de El Volcán, sobre rocas metamórficas (esquistos) acompañadas de inyecciones pegmatíticas (Figura 2).

El sector se encuentra afectado parcialmente por cizalla frágil, con un aumento del grado de fracturación. Predominan en el macizo rocoso roturas en cuña (Figura 8).

La calidad del macizo rocoso para taludes es “media” (índice RMR con corrección) y “normal” (índice SMR) (Tabla 5). El afloramiento según el índice GSI, se clasifica como “bloques irregulares con una condición del frente mala” (BI/M) (Tabla 5).

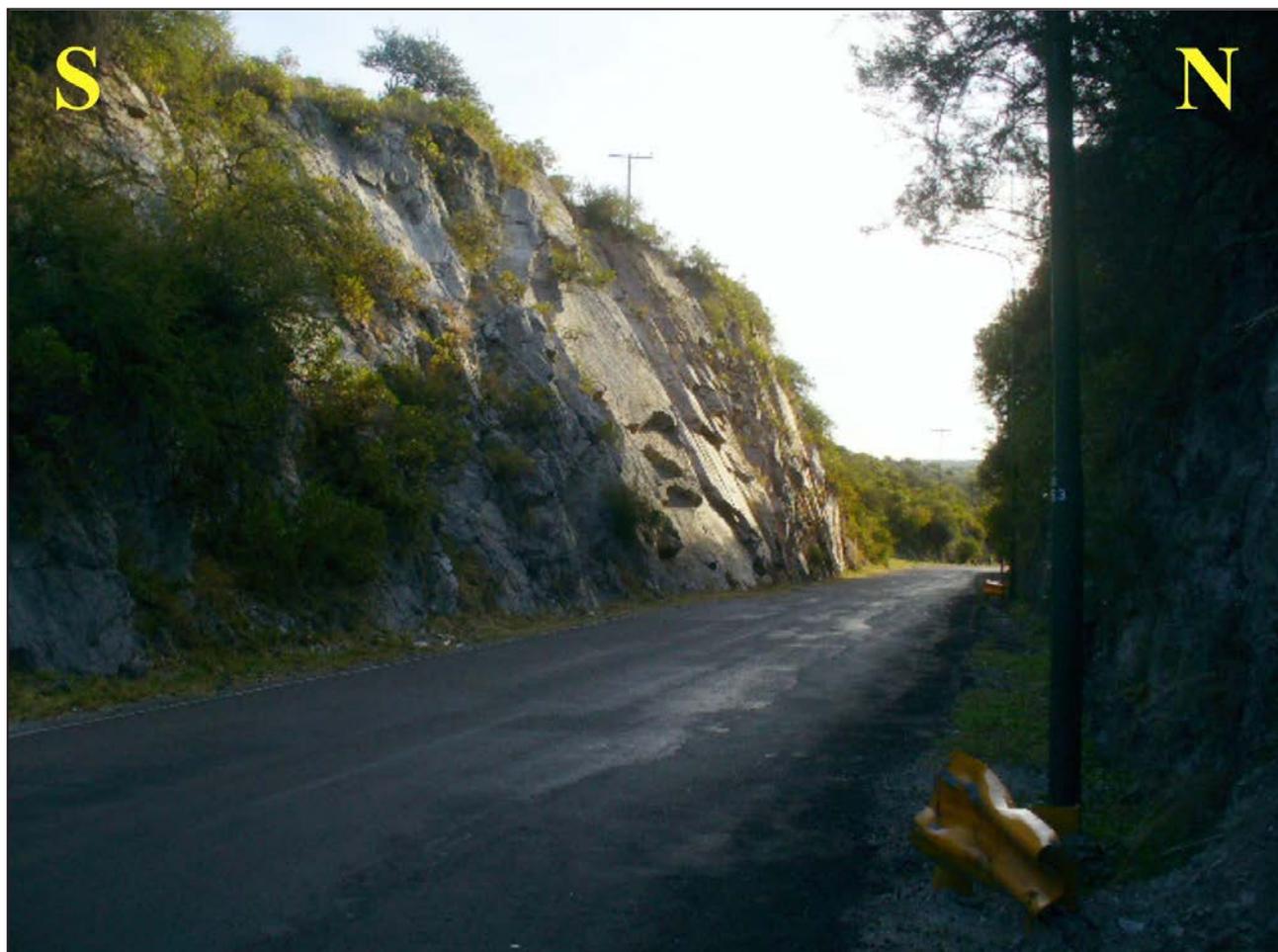


Figura 5. Vista al oeste del talud N° 1, con un corte subvertical y roturas del tipo planar.

Tabla 2. Resultados de la calidad del macizo rocoso en el talud N° 1, según las diferentes clasificaciones geomecánicas utilizadas

Talud N° 1							
Longitud	Altura				Dirección		Inclinación
126 m	8 a 10 m				290°		65° - 70° NE
ÍNDICE	RMR				SMR		GSI
	Básico		Corregido				
Parámetros y valores	R1	12	R1	12	F1	0.7	
	R2	17	R2	17	F2	1	
	R3	10	R3	10	F3	-60	
	R4	15	R4	15	F4	8	
	R5	15	R5	15			
				R6	-50		
Total	6*		19		35		45 - 65
Clasificación	Buena		Muy Mala		Mala		BI/B
Clase	II		V		IV		



Figura 6. Vista panorámica al sudoeste de un sector del talud N° 2, afectado por cizalla frágil, que disgrega mecánicamente al granito

Tabla 3. Resultados de la calidad geomecánica del macizo rocoso en el talud N° 2.

Talud N° 2							
Longitud	Altura				Dirección		Inclinación
82 m	6 a 8 m				31°		75° - 80° NO
ÍNDICE	RMR				SMR		GSI
	Básico		Corregido				
Parámetros y valores	R1	12	R1	12	F1	0.7	
	R2	13	R2	13	F2	1	
	R3	10	R3	10	F3	-60	
	R4	15	R4	15	F4	0	
	R5	15	R5	15			
				R6	-50		
Total	65		15		23		50 - 60
Clasificación	Buena		Muy Mala		Mala		BI/B
Clase	II		V		IV		



Figura 7. Vista panorámica al sudoeste de un sector del talud N° 3, donde el granito es afectado en un sector por cizalla frágil (entre líneas de color amarillo)

Tabla 4. Resultados de las clasificaciones geomecánicas utilizadas en la determinación de la calidad del macizo rocoso en el talud N° 3.

Talud N° 3							
Longitud	Altura				Dirección		Inclinación
110 m	6 a 10 m				140°		65° - 70° NE
ÍNDICE	RMR				SMR		GSI
Parámetros y valores	Básico		Corregido		F1	0.7	
	R1	7	R1	7			
	R2	13	R2	13	F2	1	
	R3	10	R3	10	F3	-60	
	R4	19	R4	19	F4	8	
	R5	15	R5	15			
			R6	-40			
Total	64		24		34.6		40 - 50
Clasificación	Buena		Muy Mala		Mala		BI/B
Clase	II		V		IV		

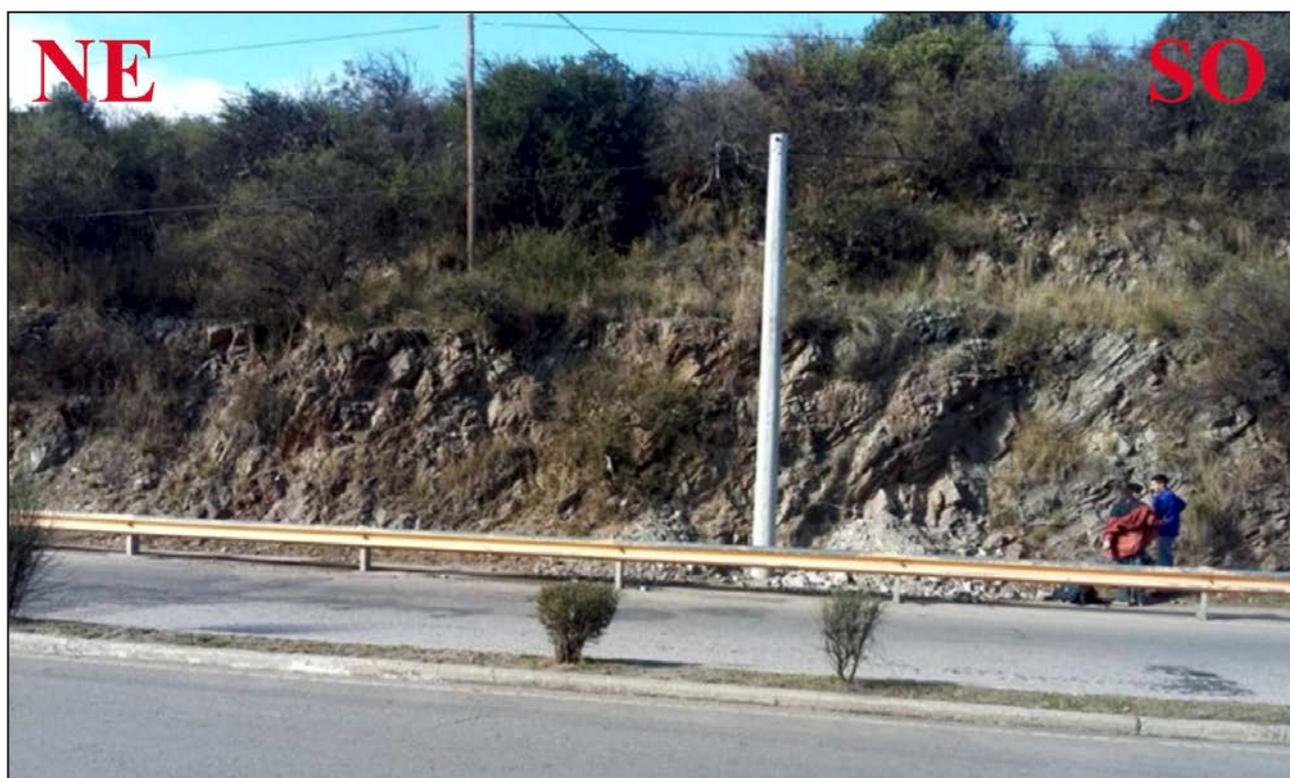


Figura 8. Vista panorámica al sudeste de un sector del talud N° 4.

Tabla 5. Resultados de la calidad del macizo rocoso en el talud N° 4, a partir de las clasificaciones geomecánicas RMR, SMR y GSI.

Talud N° 4							
Longitud	Altura				Dirección		Inclinación
77 m	4 a 6 m				75 a 85°		80° - 85° NE
ÍNDICE	RMR				SMR		GSI
Parámetros y valores	Básico		Corregido		F1	0.15	
	R1	4	R1	4			
	R2	6	R2	6	F2	1	
	R3	5	R3	5	F3	-25	
	R4	18	R4	18	F4	0	
	R5	15	R5	15			
		R6	-5				
Total	48		43		44		40 - 45
Clasificación	Media		Media		Normal		BI/B
Clase	III		III		III		

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El análisis de estabilidad se llevó a cabo en los cuatro taludes seleccionados, se utilizaron los parámetros resistentes del macizo (cohesión “c” y ángulo de rozamiento interno “Φ”) obtenidos a partir de la clase de calidad del macizo, según lo propuesto por *Bieniawski (1979)* y que se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros resistentes obtenidos a partir del índice RMR según Bieniawski (1979).

Talud N°	Índice RMR (sin corregir)	c (t/m ²)	Φ (°)
1	Buena (II)	0.1	37
2	Media (III)	0.05	26
3	Buena (II)	0.05	34
4	Buena (II)	0.05 - 0.3	35 - 37

En los taludes se identificaron diferentes sets de discontinuidades que afectan al macizo por rotura planar, en cuña y vuelco, en función de la disposición existente entre la orientación del talud y de las discontinuidades presentes (Figura 9), desarrollando la inestabilidad del corte del macizo por deslizamientos planares y en cuña.

Se utilizó para el análisis de estabilidad el programa *Rocscience (2013)* para roturas planas y en cuñas. Los resultados obtenidos del FS son analizados en particular aquellos con condiciones de inestabilidad (FS<1).

En el talud N° 1, la inestabilidad está generada principalmente por planos que desarrollan rotura planar (FS = 0.5), los que imponen una amenaza latente de deslizamientos traslacionales del tipo planar (Figura 10a). En menor proporción, se reconocieron set de discontinuidades que forman rotura en cuña (FS= 0.82) (Figura 10b).

En el talud N° 2, los planos de discontinuidad desarrollan inestabilidad del talud por rotura planar (FS= 0.30) (Figura 10c). En este sector, es común describir el desprendimiento de bloques del granito por caída de rocas, inicialmente del tipo planar.

El sector del talud N° 3, la inestabilidad la generan set de fracturas por rotura en cuña con un FS=0.55 (Figura 10d) y rotura planar a través de un FS= 0.47 (Figura 10e). Aunque el movimiento está condicionado a traslacional, por el grado de disgregación mecánica del macizo, se destaca los desprendimientos de bloques pequeños acumulados sobre la base del talud.

Por último, la estabilidad del talud N° 4, está condicionado por pocos sets de fracturas en cuña, a partir de la interacción de fracturas frágiles con la estructura penetrativa de la roca metamórfica con una orientación de sus planos transversalmente a la cara libre del talud (FS= 0.48) (Figura 10f).

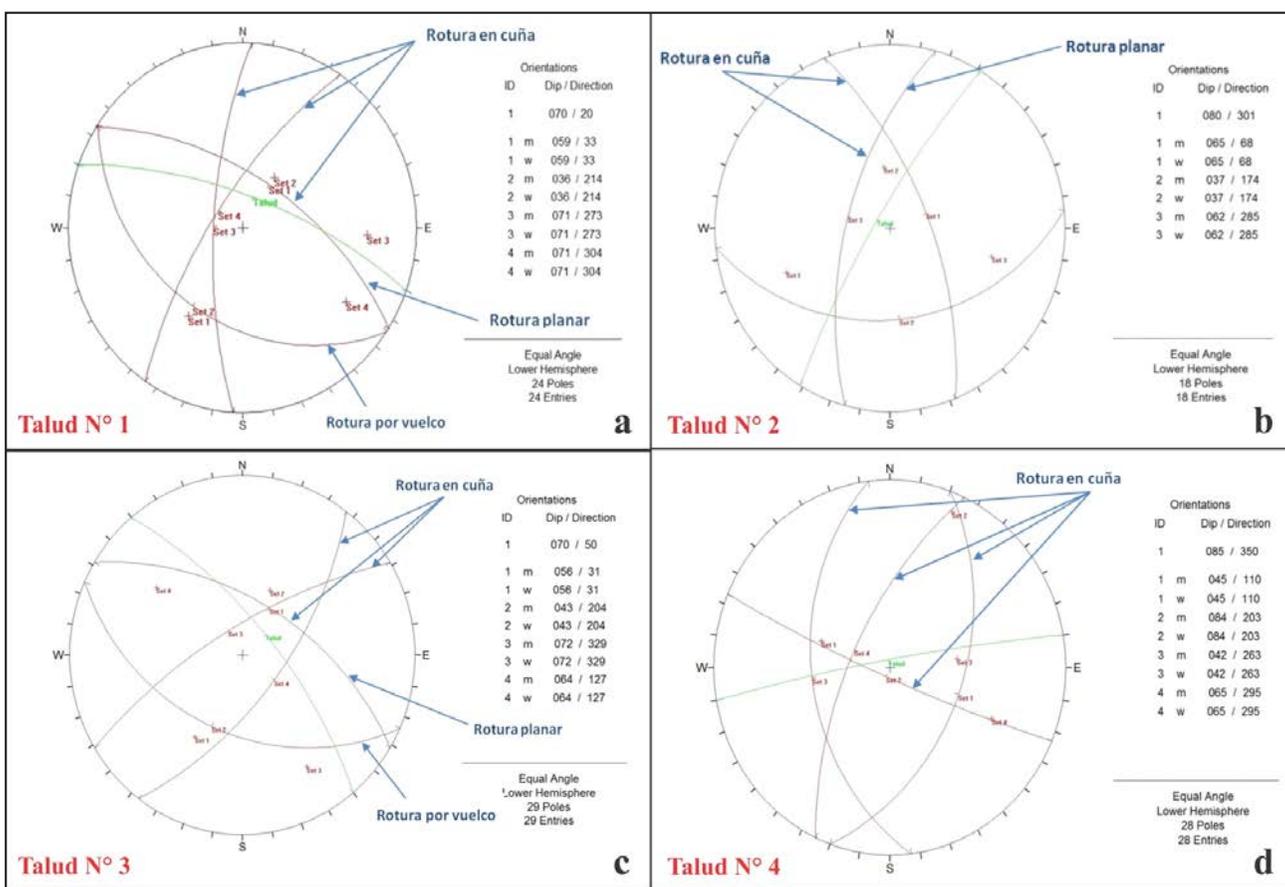


Figura 9. Proyección estereográfica que representa la orientación de los sets de discontinuidades presentes en los cuatro taludes analizados, desarrollándose roturas del tipo planar, en cuña y vuelco.

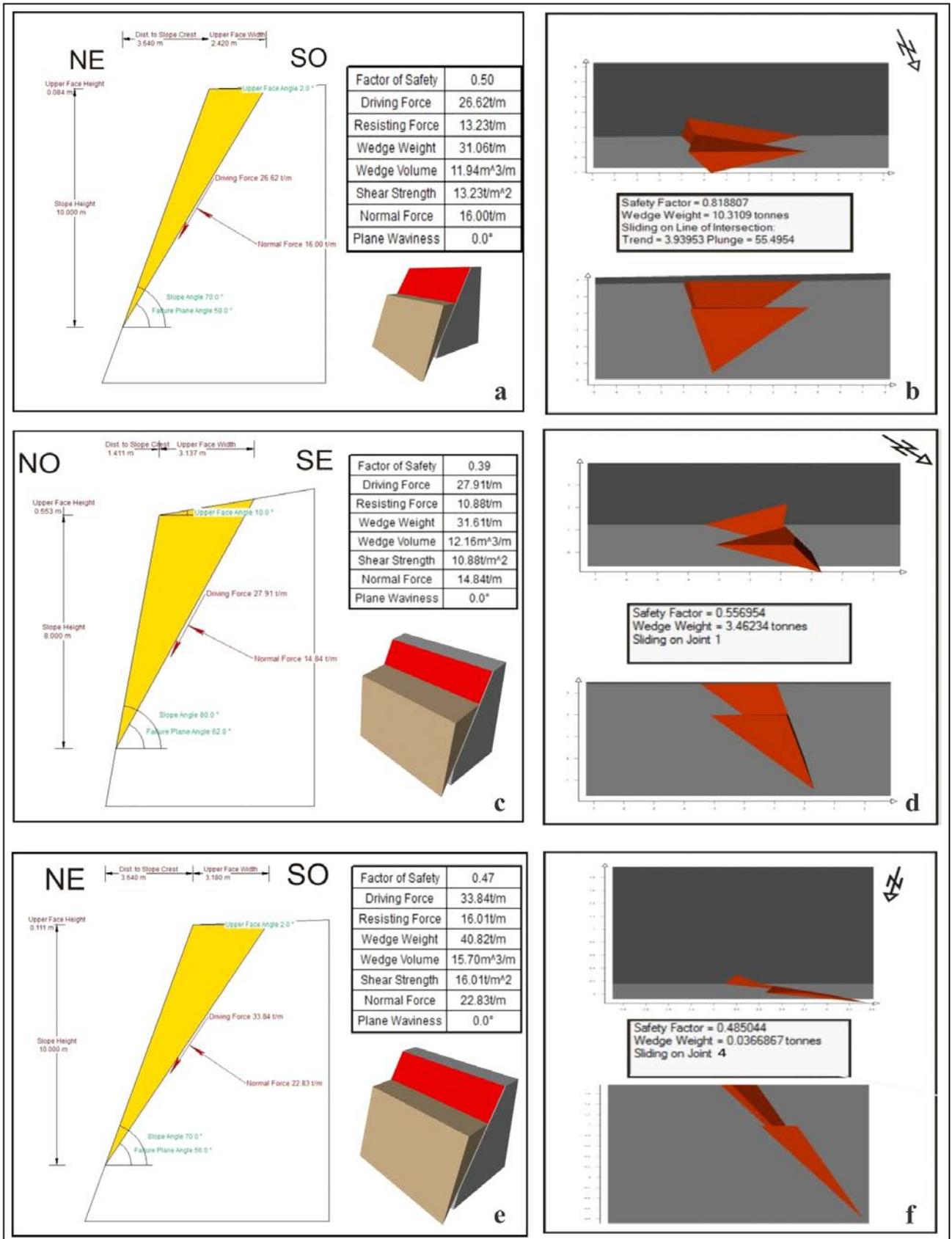


Figura 10. Modelos obtenidos para rotura planar y rotura en cuña en los taludes analizados (N=4), con FS<1 y que desarrollan inestabilidad por deslizamiento traslacional o caída de rocas.

CONCLUSIONES

Los taludes del área de estudio se desarrollan en un macizo principalmente granítico y en forma subordinada metamórfico, afectados por un sistema de fallas extensionales con dirección NO-SE e inclinación al NE. De acuerdo a la orientación de los taludes, se desarrollan roturas del tipo planar, en cuña y vuelco.

Los deslizamientos traslacionales son los procesos de remoción en masa más comunes en la zona, siendo los deslizamientos planares los de mayor amenaza sobre los deslizamientos en cuña.

Los taludes presentan en su mayoría cara libre con ángulo de inclinación moderado a alto (60° y 90°), alturas relativamente bajas (2 a 14m) y longitudes variables (40 a 137m).

En los parámetros cuantitativos de las discontinuidades, predominan espaciamiento entre 20-60cm, discontinuidades menores al metro, aberturas entre 1-5 milímetros y superficies con rugosidad media.

La resistencia de la roca fue considerada en los afloramientos graníticos “dura a muy dura”, con grado de meteorización baja, mientras que en los esquistos la resistencia fue menor, con elevado grado de meteorización por las características mineralógicas de la roca de caja.

Se estimó un índice RQD de calidad “regular” en los taludes graníticos y “muy mala a mala” en los taludes metamórficos.

La clasificación geomecánica de los taludes analizados, presentan calidad que varía de “muy mala a media” (índice RMR corregido) y “mala a normal” (índice SMR).

Según el índice GSI, los afloramientos se caracterizan por frentes definidos por “bloques irregulares con una condición del frente buena a mala” (BI/B-M)

Los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad para los diferentes tipos de roturas del macizo en los taludes analizados, presentan FS bajos ($FS = 0.3$ a 0.5) para rotura planar (Taludes N° 1, N° 2 y N°3).

En las discontinuidades que generan rotura en cuña, los FS varían de 0.48 a 0.82 en el macizo ígneo-metamórfico.

Los taludes seleccionados presentan constante inestabilidad por caída de rocas, los que deberían realizarse cambios en la geometría de estos, para disminuir el riesgo de caída de rocas.

El sector con mayor amenaza de deslizamientos planares en el tramo de estudio de la ruta, se encuentran en la zona de Cuesta del Gato.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Lic. Facundo Gómez, por su colaboración brindada en las diversas tareas desarrolladas en terreno.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BIENIAWSKI, Z.T. (1979).

The Geomechanics classification in rock engineering applications.
2º Int. Congress on Rock Mechanics, vol. II. Suiza.

COSTA, C. (1992).

Neotectónica del sur de la sierra de San Luis.
Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Luis. Inédita.

COSTA, C.H. Y CORTÉS, J. (1993).

Tectónica extensional en el extremo sur de la sierra de San Luis.
12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3:113-118.

DEERE, D.U. (1963).

Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes.
Felsmechanik and Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology), Vol 1 (I): 16-22.

DENARO, J. Y SALES, D. (2018A).

Análisis geotécnico de los taludes de la autovía R.P.N°20, entre el B° Cerros Colorados y El Volcán, Provincia de San Luis.
Actas 1º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (Tema 1), en CD, ISBN N° 978-987-21766-5-5.

FARIOLI, C. Y SALES, D. (2018A).

Análisis de estabilidad y riesgo asociado de los taludes de precorte del circuito Potrero de los Funes, Provincia de San Luis.
Actas 1º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (Tema11), en CD, ISBN N° 978-987-21766-5-5.

GÓMEZ, F.M. Y D. SALES (2018A).

Caracterización y Clasificación Geomecánica de los taludes de la autovía Los Puquios, Provincia de San Luis.
Actas 1º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente (Tema 8), en CD, ISBN N° 978-987-21766-5-5.

HOEK, E. Y BROWN, E.T. (1997).

Practical estimates of rock mass strength.
Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, Vol. 34, N° 8: 1165-1186.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM (1981).

Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring.
ISRM Suggested methods. Ed. E.T.Brown. Pergamon Press.

- MOROSINI, A.F. (2011).
El Granito la Escalerilla, Provincia de San Luis.
Tesis Doctoral. Universidad Nacional de San Luis. Inédita.
- PALMSTROM, A. (1975).
Characterization of degree of jointing and rock mass quality.
Int. Report Ing. A.B. Berdel, A.S. Oslo, 62 pp.
- ROCSCIENCE IND. (2013).
<https://www.rocscience.com/>.
- ROMANA, M. (1997).
El papel de las clasificaciones geomecánicas en la estabilidad de taludes.
IV Simposio Nacional sobre Taludes y laderas Inestables. Granada.
- SALES, D., C. GARDINI Y D. ORIGLIA, 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.
- VARNES, D.J. (1984).
Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice.
Commission on landslides of the IAEG, UNESCO. Natural Hazards No. 3, 61 pp.
- VON GOSEN, W. Y PROZZI, C. (1998).
Structural Evolution of the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina): implications for the proto-andean Margin of Gondwana.
In: Pankhurst, R. y Rapela, C. (Eds): The Proto-Andean Margin of Gondwana. Geological Society of London, Special Publication, 142: 235-258, London.



Análisis hidrológico del sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande (provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur - Argentina) para proponer medidas de mitigación a la ocurrencia de tormentas de polvo

Hydrological analysis of the endorheic lagoon system in the city of Rio Grande (Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur province - Argentina) to propose mitigation strategies for the occurrence of dust storms

Perdomo, Santiago ^{1,2} ✉ - Ruiz, María Soledad ¹ - Noir, Gerardo ³ - Kruse, Eduardo Emilio ²

Recibido: 26 de enero de 2021 • Aceptado: 30 de octubre de 2021

Resumen

En las últimas décadas la ciudad de Río Grande se ha visto afectada por la movilización de sedimentos provenientes del lecho de lagunas ubicadas hacia el oeste y norte de la zona urbana. La presencia de polvo en suspensión produce afecciones oculares y respiratorias a la población, y limita el tránsito terrestre y aéreo de la ciudad, además de la degradación de los recursos naturales. El objetivo de este trabajo es formular un modelo conceptual del sistema lagunar a partir de las características climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas para entender las condiciones en las que se produce la voladura de

sedimentos y proponer medidas de mitigación. Para cumplir con este objetivo se realizó una revisión de antecedentes de estudios geológicos y geomorfológicos, una recopilación y análisis de información hidrometeorológica con énfasis en la distribución temporal y frecuencia de precipitaciones y viento (magnitud y dirección). Las tareas de campo incluyeron el reconocimiento de las principales unidades sedimentarias, el relevamiento y muestreo de una red de monitoreo integrada por los cuerpos de agua superficial y pozos existentes. Complementariamente se realizó una nivelación topográfica y

1. Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires (UNNOBA). Monteagudo 2772, Pergamino, 2700, Argentina. Tel: +54 2477 409500

✉ perdomo.geofisica@gmail.com

2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Centro de investigación y transferencia del noroeste de la provincia de Buenos Aires (CITNOBA)

3. Ministerio de Producción y Ambiente - Secretaría de Ambiente. Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur. San Martín 1401, Ushuaia.

una prospección geoelectrica para contribuir al análisis geomorfológico e hidrogeológico de la zona de estudio. Los principales resultados de este trabajo permitieron definir el comportamiento efluente de los cuerpos de agua superficial respecto al acuífero freático y concluir que el sistema es regulado fundamentalmente por la componente agua subterránea con contribución de los parámetros climáticos. En este sentido, se proponen medidas de mitigación relacionadas con el manejo de los recursos hídricos superficial y subterráneo, el control de la actividad ganadera y el uso del suelo para contrarrestar en forma paulatina la presencia de sedimentos en suspensión.

Palabras clave: Relación agua superficial-subterránea, deflación, prospección geoelectrica, tormentas de polvo, Tierra del Fuego.

Abstract

In the last decades, the city of Río Grande has been affected by the mobilization of sediments from dry lagoons near the urban area. The presence of airborne dust produces eye and respiratory diseases in the population, and limits land and air traffic in the city, in addition to the degradation of natural resources. The aim of this work is to formulate a conceptual model of the lagoon system to understand the conditions in which sediment mobilization occurs and to propose mitigation actions. Climatic, hydrological and hydrogeological characteristics are then analyzed. To achieve this goal, a background review of geological and geomorphological studies was carried out, a compilation and analysis of hydrometeorological information with emphasis on the temporal distribution and frequency of rainfall and wind (magnitude and direction). Field work included the recognition of the main sedimentary units, and sampling of surface water bodies and existing wells. In addition, a topographic leveling and a geoelectric prospecting were carried out to contribute to the geomorphological and hydrogeological analysis of the study area. The main results of this work defined the effluent behavior of surface water bodies in relation to the phreatic aquifer. The system is mainly regulated by groundwater with the contribution of climatic parameters. Finally, mitigation measures are proposed related to the management of surface and underground water resources, the control of livestock activity and the use of the soil to gradually reduce the presence of suspended sediments.

Keywords: Relationship surface water - groundwater, deflation, geoelectric prospecting, climate, Tierra del Fuego.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En las últimas décadas se han registrado episodios de tormentas de polvo que afectan seriamente a la ciudad de Río Grande (Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur). Su ocurrencia se debe principalmente a la desecación de un sistema de lagunas próximo al ejido urbano y a determinadas condiciones climáticas que generan el transporte de los sedimentos hacia la ciudad. Las tormentas de polvo inciden directamente sobre las actividades de la población, produciendo un deterioro de la calidad ambiental y del hábitat urbano. Dan lugar a inconvenientes en el transporte aéreo y terrestre por la escasa visibilidad y el bloqueo de las vías de comunicación. Además, pueden provocar fuertes afecciones oculares y respiratorias en la población. El espesor de sedimentos acumulado es del orden de centímetros hasta más de 1 m y su permanencia provoca una paulatina degradación de suelos.

El área de estudio se localiza a aproximadamente 1 km al oeste de la ciudad de Río Grande, provincia de Tierra del Fuego. El sistema de lagunas de los Cisnes, del Peñón, Don Bosco, Redonda, Larga, Seca y Azul forman parte de una región endorreica de aproximadamente 90 km², que se emplaza al norte de la cuenca del Río Grande y distan entre 1 y 2 km de la costa del mar (Figura 1).

En la Figura 2 se visualizan los efectos de un evento de este tipo en la laguna de los Cisnes, registrado en enero del 2019, cuando la acumulación de sedimentos bloqueó los accesos a la ciudad.

A nivel internacional, los exponentes de mayor magnitud de este fenómeno meteorológico ocurren en el norte de África, donde las arenas del Sahara llegan incluso hasta las costas de

América y del Caribe (Prospero et al., 2003; Riemer et al., 2006; Ridley et al., 2014), y en los desiertos de Mongolia, China y Kazajistán (Zhang, 2006; Xi et al. 2015). En estos casos extremos se trata de fenómenos estacionales producidos por los fuertes vientos y los procesos de desertificación asociados a la actividad humana y al cambio climático. Igualmente, en las zonas desérticas de Australia (Speer, 2013; Cattle, 2016) y en el norte de Chile han ocurrido tormentas severas principalmente en las épocas de verano (UNEP, 2016). En la Patagonia Argentina son frecuentes las tormentas de polvo, pero posiblemente la baja densidad poblacional de esta región hace que sus causas y efectos sean poco estudiados.

En particular en Río Grande, el incremento de la actividad económica, el crecimiento poblacional y la consecuente expansión urbana se manifiesta en la transformación y cambio del uso del suelo, produciéndose la expansión de la zona urbanizada hacia el sudoeste y norte de la ciudad, en proximidad al sector de lagunas (Kruse et al., 2012).

La infraestructura asociada a este desarrollo (construcción de nuevas vías de comunicación, compactación, rellenado de zonas bajas, alteos, terraplenes, canalizaciones, pavimentación, obras hidráulicas y sistemas de desagüe) produjo una modificación de las condiciones naturales, de la dinámica hídrica superficial y subterránea, y una alteración de la topografía, el suelo y la vegetación.

En este trabajo, se analizan las condiciones climáticas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas con el objetivo de formular un modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas que permita realizar recomendaciones tendientes a predecir y mitigar la situación ambiental asociada a las tormentas de polvo que allí se generan.

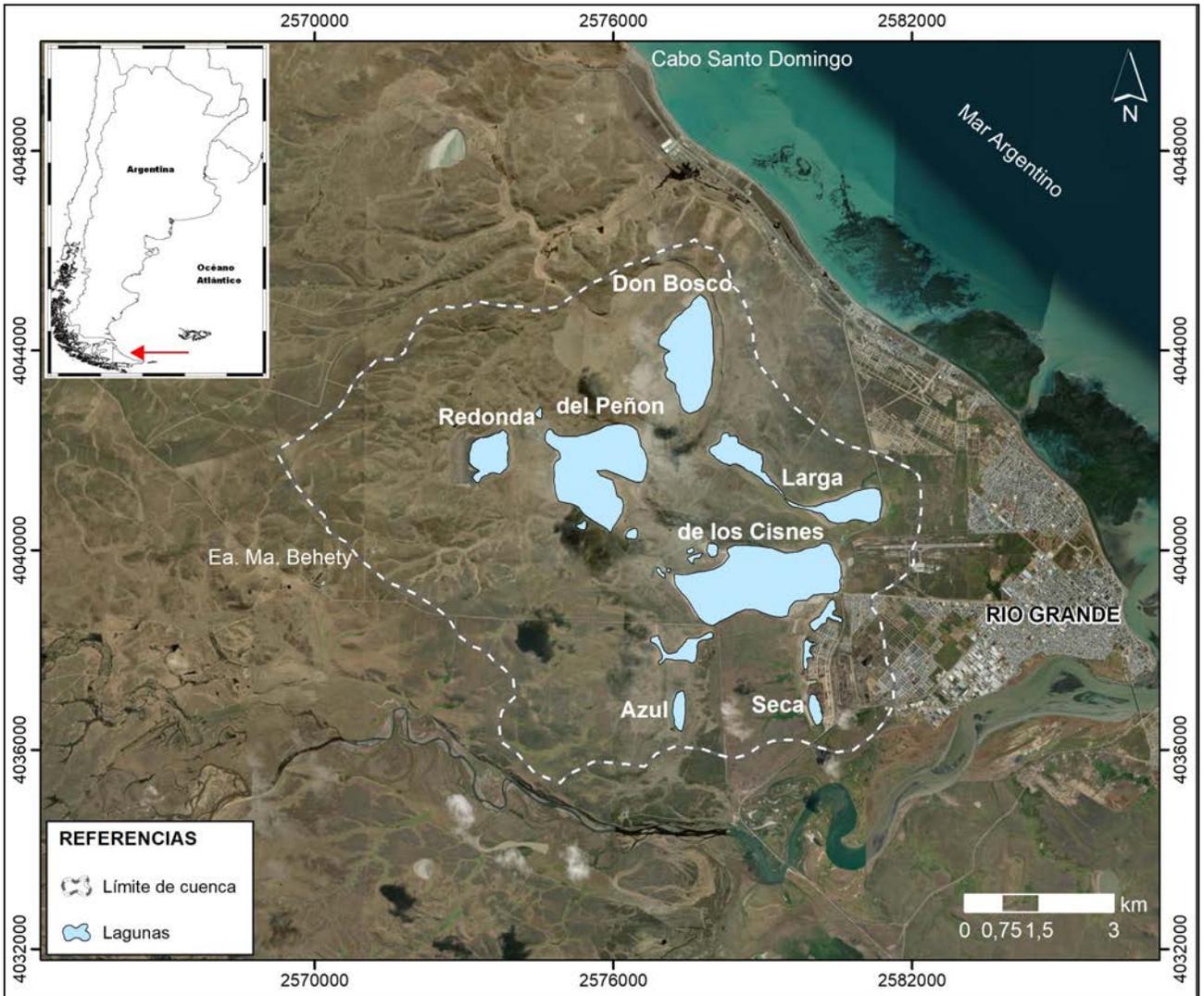


Figura 1. Ubicación del área de estudio al oeste de la ciudad de Río Grande, provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur.



Figura 2. Acumulación de sedimentos en los alrededores de la ciudad de Río Grande.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Clima

Se trata de una región semiárida, con una precipitación media anual ligeramente superior a 300 mm y una temperatura media anual de 5.5 °C, con temperaturas máximas en enero (cerca de los 10 °C) y mínimas en julio (-0,4 °C). La precipitación nival no resulta significativa, produciéndose en promedio 11 días al año.

Los vientos de mayor frecuencia e intensidad provienen preferencialmente del oeste y oeste sudoeste, siendo los de más intensidad los que se registran durante el verano, con ráfagas que superan los 140 km/h, mientras que hacia el invierno la intensidad disminuye (Iturraspe y Urciuolo, 2002).

Geología

El sector meridional de la Isla Grande de Tierra del Fuego está ubicado en el ambiente tectónico de la Cordillera de los Andes. Los Andes Fueguinos presentan una orientación oeste-este, resultante del movimiento transformante entre las placas Sudamericana, Antártica y de Scotia.

La costa atlántica nororiental se sitúa en un ambiente más estable, extrandino, desarrollado sobre una plataforma de rocas mesozoicas no deformadas de la Formación Springhill (Jurásico tardío-Cretácico temprano; Thomas 1949). Los sedimentos más antiguos expuestos son rocas continentales o marinas del Neógeno (Codignotto and Malumián 1981), sobre las que se disponen depósitos glaciares del Plio-Pleistoceno.

El sistema de lagunas estudiado se encuentra emplazado en un ambiente sedimentario compuesto por limoarcilitas, areniscas y conglomerados fosilíferos de coloración castaño claro a pardo verdoso, de origen deltaico marino y edad Mioceno medio (Neógeno) (Codignotto y Malumian 1981). Hacia el oeste de la cuenca, en proximidad a la Estancia María Behety, estos sedimentos se agrupan bajo la denominación de Formación Carmen Silva del Grupo Cabo Domingo, según Olivero et al. 2006.

Esta formación consta de dos miembros, uno inferior de arcillitas y limolitas arenosas y otro superior de conglomerados y tobos con abundantes invertebrados fósiles (Malumián y Olivero 2006). En general esta formación se presenta en afloramientos discontinuos, aunque constituyen la litología de mayor extensión en la isla, con espesores potentes de hasta 70 m en Cabo Domingo, que infrayacen a los depósitos marinos cuaternarios (Codignotto y Malumián, 1981; Malumián, 1999).

La región cercana a la costa se caracteriza por la presencia de secuencias sedimentarias correspondientes a dos eventos transgresivos de edad pleistocena, atribuidos al MIS 5e y MIS 1, limitadas al norte, sur y oeste por serranías de rocas neógenas; y al este, por la plataforma de abrasión de igual litología (Bujalesky, 1998 y Bujalesky et al., 2001).

El primero de ellos corresponde a los depósitos litorales que integran la Formación La Sara (MIS 5e), de edad Pleistoceno tardío, los cuales se ubican en cotas del orden de 13 y 17 msnm entre los depósitos de cobertura de edad holocena y las rocas neógenas descritas precedentemente. Están integrados por gravas finas clasto sostén, arenas y fangos, de color castaño, friables, finamente estratificadas con suave pendiente hacia el este (Codignotto, 1969; Codignotto y Malumian 1981). Ocasionalmente presentan depósitos de fango finamente laminados con estructuras onduláticas, que podrían corresponder a lagunas costeras, infrayaciendo a los depósitos de playas. En la porción superior presentan abundantes moldes de cuñas de hielo que

estarían asociados con la última glaciación, observados por Coronato, et al. (2004) y Pérez-Alberti, et al. (2008).

Suprayacente se disponen depósitos transgresivos, denominados Formación San Sebastián (MIS 1), que se ubican entre la línea de costa actual y el paleoacantilado, labrado sobre los depósitos anteriormente descritos. Estas secuencias están integradas por gravas clasto sostén y arenas con estratificación inclinada de bajo ángulo hacia el este, representando paleoplayas, de colores grises y castaños, y fangos, asociados a llanuras de mareas y lagunas. Se ubican a cotas máximas de 5-6 msnm, con un incipiente desarrollo pedogenético. Los afloramientos son escasos y se localizan en las canteras actualmente en desarrollo, fundamentalmente frente a la playa.

La zona urbana, ubicada en la cuenca del río Grande, se desarrolló fundamentalmente sobre la planicie litoral pleistocena y sobre la margen norte del Río Grande. Con el crecimiento demográfico fue ocupando la margen sur y la planicie litoral holocena, situada un escalón más abajo.

Hacia el este se extiende una extensa plataforma de abrasión de aproximadamente 3 km de ancho, labrada sobre areniscas neógenas.

A partir del análisis de información antecedente se reconoce que existe una amplia descripción de las características de los sedimentos de la zona litoral; sin embargo, en el área estudio no se han realizado hasta el momento estudios sedimentológicos y estratigráficos de detalle que incluyan a los depósitos de cobertura señalados regionalmente por Olivero et al. (2006).

Geomorfología

Las lagunas se encuentran ubicadas en un ambiente de planicie continental deflacionada que fuera ocupado por transgresiones marinas del MIS 5e y MIS 1 (Bujalesky, 1998; Bujalesky et al 2001; Iturraspe y Urciuolo 2002).

La llanura costera más antigua, correspondiente al último interglacial, se presenta entre cotas del orden de 10 y 13 msnm; y se encuentra integrada por gravas que se apoyan gradualmente sobre rocas neógenas. La llanura litoral holocena se emplaza entre la línea de costa y el paleoacantilado que la separa de los depósitos transgresivos pleistocenos. Su mayor desarrollo se presenta al sur del río Grande conformado por una serie de cordones de playa compuestos por gravas. En general carecen de rasgos geomorfológicos claros como consecuencia de un nivel de suelo orgánico que cubre independientemente ambas geoformas (Kruse et al., 2012).

La planicie continental se extiende desde el límite de las llanuras costera y litoral hacia el interior de la región y se caracteriza por el desarrollo de cursos de agua permanentes y temporarios. Sobre esta planicie se desarrollan las cuencas de deflación o bajos, que contienen una red de drenaje con diseño centripeto, las cuales alojan a las lagunas carácter mayormente intermitente. El curso de agua más importante de la región lo constituye el río Grande, distante aproximadamente 5 km al sur del sistema lagunar.

En las depresiones se observan sectores de playa inferior que se disponen en las costas noroeste, sur y suroeste de las lagunas. En general están integradas por sedimentos limo-arcillosos, ocasionalmente se encuentran desprovistas de suelo y sometidas a erosión por pisoteo de ganado y procesos de deflación. Sobre las costas norte, noreste y este se observan sectores de playa superior conformados por depósitos de arenas, gravas y sedimentos limo-arcillosos.

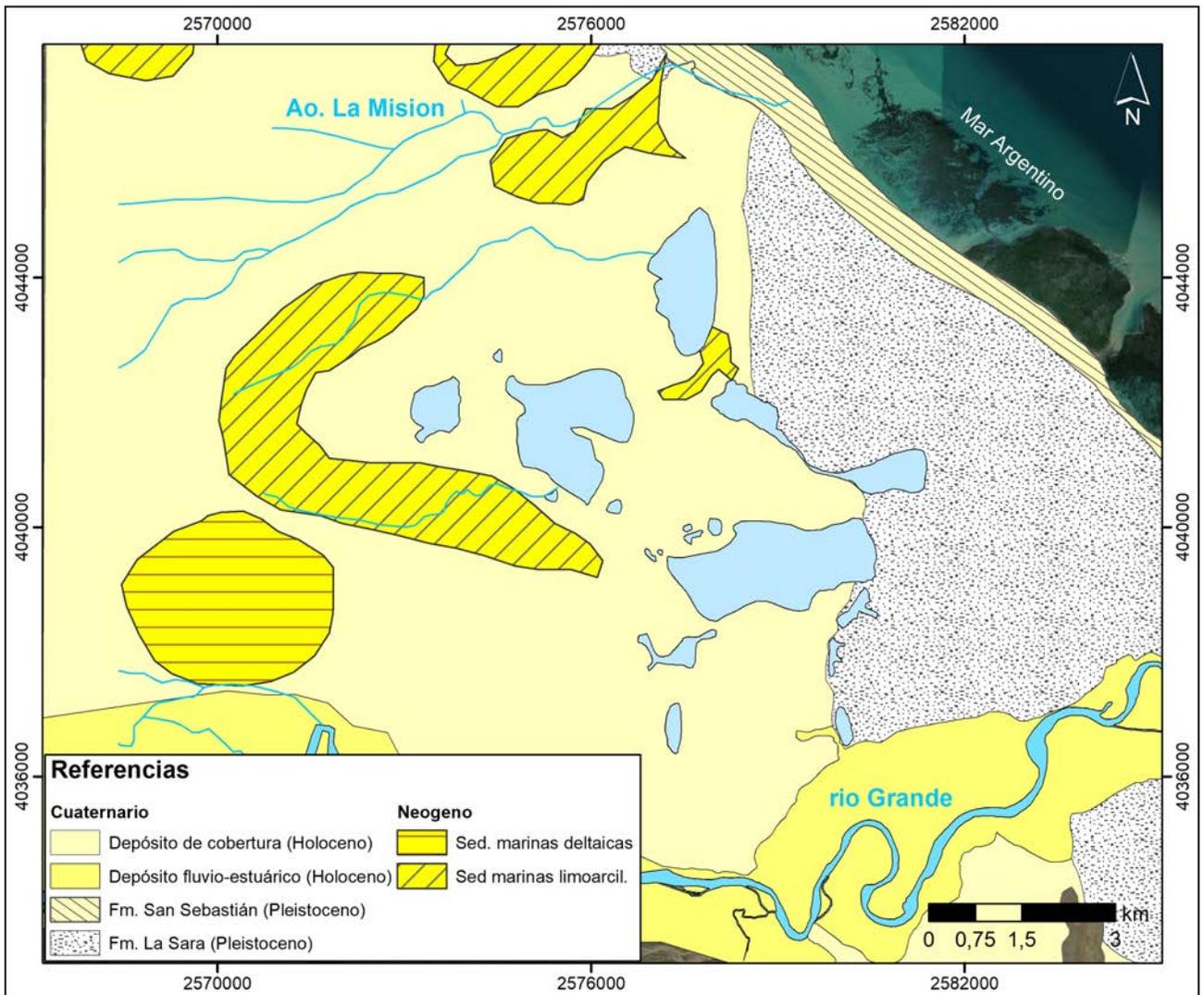


Figura 3. Geología del área de estudio. (Modificada de Olivero et al. 2006)

En correspondencia con lo observado por Coronato et al. (2017) para la laguna El Carmen, ubicada 40 km al noroeste, se sugiere un origen eólico en una zona de confluencia de paleo-líneas de drenaje que formaban la cuenca hídrica previa a la existencia de las lagunas.

Localmente se encuentran rodeadas al oeste y norte por cumbres y laderas con alturas que varían entre 60 y 95 msnm (Figura 4) que se encuentran cubiertas por depósitos de pendiente.

La superficie de las lagunas que queda parcialmente descubierta en la época de verano se seca y genera la voladura de sedimentos finos, que constituyen una pluma eólica donde se reconocieron dunas y "lunettes", y un manto eólico que cubre las geoformas preexistentes. La pluma eólica se extiende hacia el noreste, este y sureste de los bajos en coincidencia con la dirección de los vientos de mayor frecuencia e intensidad.

En general, los sedimentos se disponen a pocos kilómetros del cuerpo de agua; sin embargo, en los últimos años se observa que la dispersión se extiende más allá de límites de la cuenca, hasta alcanzar la ciudad de rio Grande.

En el entorno de las lagunas se reconoce la acción de procesos periglaciales expuestos a través de moldes de cuñas de hielo y de montículos que se producen en condiciones de suelo saturado con agua que posteriormente se congela, aumentando el volumen y generando abombamientos.

Hidrología

El área de estudio forma parte de un sistema de lagunas someras, que integran una cuenca endorreica sin escurrimiento hacia el mar.

Los afluentes permanentes son escasos y el aporte superficial se limita a cursos de carácter intermitente; mientras que, en las terrazas se reconocen numerosas manifestaciones de agua subterránea y vertientes que tributan hacia los bajos.

Iturraspe y Urciolo (2000) indica que la economía de humedad de estos sistemas es regulada por el complejo suelo-vegetación. En general presentan elevados valores de salinidad, fósforo (3,8 mg/l) y manganeso (2 mg/l), baja transparencia y alta concentración de partículas en suspensión (Mariazzi et al., 1987).

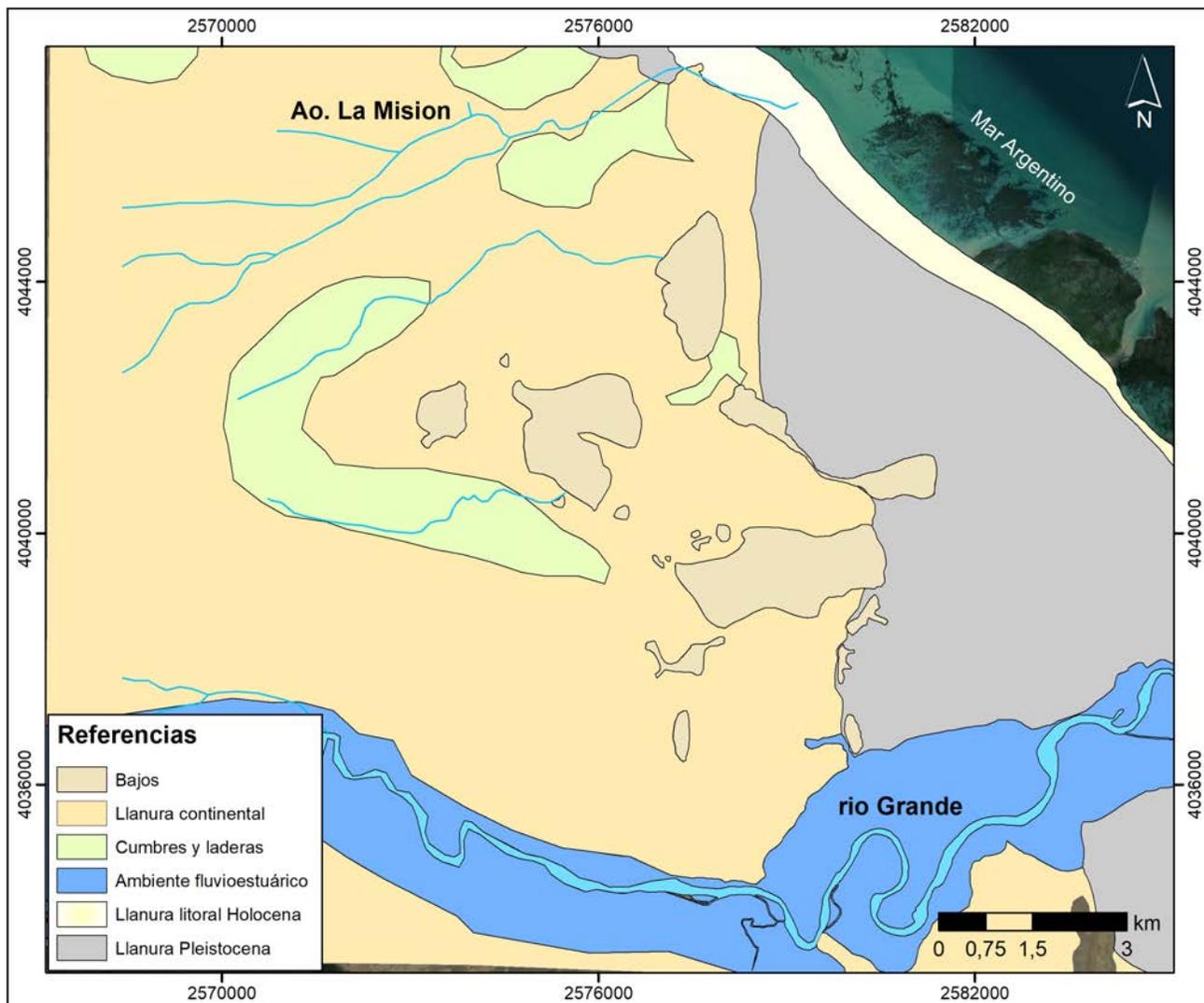


Figura 4. Geomorfología del área de estudio

Las cubetas que contienen a las lagunas son irregulares, debido a la escasa profundidad y extensa superficie se encuentran intensamente sometidas a evaporación.

La laguna de los Cisnes, de mayor significancia por su cercanía al área urbana, presenta una superficie aproximada de 3,5 km², con una mayor elongación en sentido oeste-este (aproximadamente 3,2 km).

La laguna del Peñón, ubicada al norte de la anterior presenta forma irregular, ocupa un área de 2,5 km² y se caracteriza por la existencia de una porción más elevada en el sector central que alcanza una altura aproximada de 3 m.

La laguna Redonda se ubica inmediatamente al oeste y adquiere una morfología concéntrica que ocupa una superficie reducida de 0,40 km².

La laguna Don Bosco se emplaza en el extremo norte de la cuenca endorreica. El área de influencia abarca un total de aproximadamente 7 km², sin embargo, el cuerpo de agua ocupa una superficie significativamente inferior (1,6 km²) que se restringe a la porción este del bajo. Presenta morfología elongada con mayor extensión en sentido norte-sur que alcanza los 4 km.

La laguna Larga se extiende a través de 7 km de largo en sentido noroeste-sureste, y un ancho aproximado de 2 km en los extremos que tiende a reducirse hacia el centro, donde

presenta pocos metros. Una disminución de la cantidad de agua acumulada en la época estival genera la desconexión de la laguna conformando dos cuerpos de menores dimensiones hacia los extremos oeste y sureste.

La laguna Seca se emplaza inmediatamente al oeste de la nueva urbanización denominada barrio Amadeo Vapor. Presenta una morfología elongada que ocupa 0,70 km², con mayor prolongación en dirección norte-sur donde se extiende por aproximadamente 5 km.

La laguna Azul es la más reducida del sistema lagunar con aproximadamente 0,25 km². Se emplaza en el extremo sur de la cuenca donde adquiere morfología elongada con sentido norte-sur.

METODOLOGÍA

Las actividades se llevaron a cabo siguiendo un orden secuencial que se basó en el análisis preliminar de información antecedente y un reconocimiento inicial del área de estudio a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales. El relevamiento de campo incluyó la identificación y monitoreo de 55 puntos, de los cuales 43 son manifestaciones de agua subterránea en superficie (mallines, vegas, manantiales), 7 pozos de abastecimiento y 5 cuerpos de agua superficial (Figura 5).

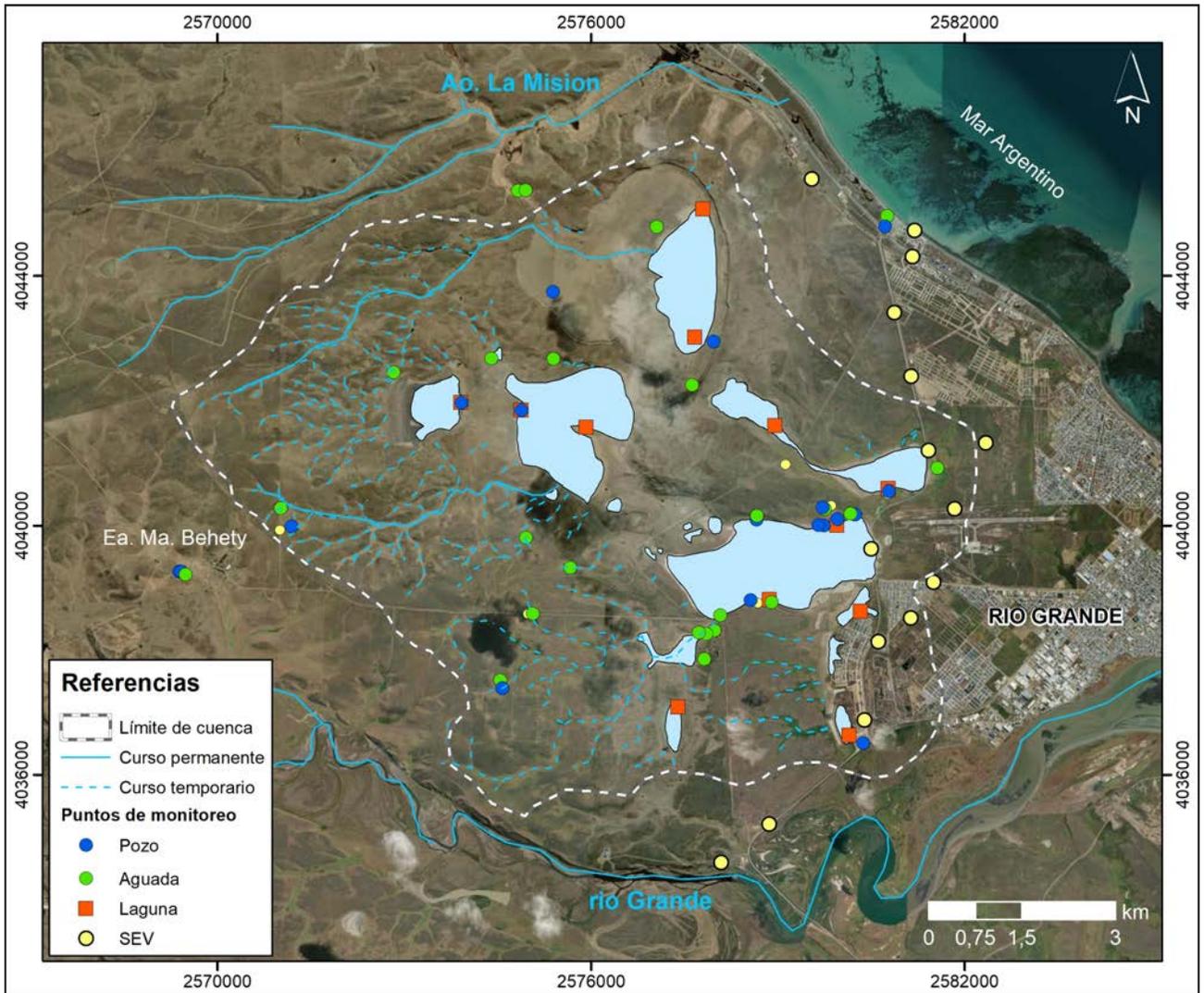


Figura 5. Ubicación de puntos de muestreo de agua superficial, subterránea y SEV.

En cada sitio se consignaron aspectos relacionados al tipo de fuente, características constructivas, profundidad de agua, condiciones topográficas, sedimentológicas y afloramientos rocosos. Los registros de profundidad de agua en los pozos de monitoreo fueron referidos a la boca de pozo, que fue acotada en los trabajos de nivelación topográfica.

Durante el monitoreo se llevó a cabo la determinación de parámetros físicoquímicos in situ (pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos). El instrumental empleado fue conductímetro y peachímetro marca Hanna, el cual fue calibrado con la finalidad de obtener registros confiables y representativos de la matriz analizada.

Complementariamente, se realizó un modelo digital de superficie (MDS) a partir de puntos georreferenciados mediante un equipo GPS SP60 en modo diferencial e imágenes de radar de apertura sintética banda C de los satélites Sentinel de la Agencia Espacial Europea, las cuales fueron procesadas con el software SNAP versión 7.0. Todos los puntos relevados fueron referidos al sistema POSGAR 07.

Para la prospección geoelectrica se midieron veintitrés (23) sondeos eléctricos verticales (SEV) con un arreglo Schlumberger de 200 m de longitud. El procesamiento de los datos se realizó con el programa SEVs (Perdomo et al 2015) que consiste

en la obtención de un modelo inicial con el algoritmo de *Zohdy (1989)* y una reducción del número de capas del modelo utilizando los parámetros de *Dar Zarrouk (Orellana, 1982)*. Para el cálculo de la resistividad aparente se utiliza el operador lineal de *Johansen (1975)*, que se considera suficiente para evaluar grandes contrastes en las resistividades.

Los modelos propuestos para cada SEV suponen que el subsuelo está formado por una sucesión de capas planas y paralelas, de espesor y resistividad constante. Cada modelo es atribuido al punto central del arreglo y los resultados se presentan a lo largo de un perfil para facilitar la interpretación.

Las condiciones climáticas se abordaron mediante la revisión de información antecedente y el análisis de las variables precipitación (1979-2019), temperatura y viento (2012-2019); a partir de registros meteorológicos de la Base Aérea Río Grande y de la EARG, distante 1,5 km del área de estudio.

A fin de comprender el comportamiento hidrodinámico a escala local se calcularon los valores de altura hidráulica en pozos y cuerpos de agua, a partir de los cuales se trazaron las curvas equipotenciales y filetes de flujo. En función de la morfología potenciométrica se establecieron las zonas de recarga y descarga local, la relación agua superficial-subterránea y el régimen influente-efluente de las lagunas.

RESULTADOS

Clima

Los registros de precipitaciones anuales para el período 1979-2018 muestran una gran variabilidad anual, con un valor mínimo de 112 mm (1994) hasta 550 mm (1987). A pesar de que se calcula un valor medio anual de precipitación de 325 mm, la curva de tendencia ajustada, muestra una variación estacional de las lluvias con periodos por encima y debajo de la media estimada (Figura 6A).

En la Figura 5B se expone el promedio mensual de la precipitación para el periodo 1979-2015 de la Base Aérea Río Grande y los valores mensuales medidos durante los años 2016 al 2019 de la EARG (Figura 5C). En general se observa una etapa húmeda en la época estival y una seca entre junio y octubre, sin embargo, esta condición no resultaría extrapolable al análisis particular de cada año debido a que los valores medios mensuales calculados para el periodo 1979-2015 presentan desvíos estándar significativos. A modo de ejemplo, se visualiza que los registros de precipitación acumulada de cada mes durante los últimos 4 años (2016 a 2019), presentan una marcada variabilidad que dificulta el establecimiento de un patrón de comportamiento estacional.

En relación a los vientos, la mayor frecuencia e intensidad provienen del oeste y oeste sudoeste durante la época de verano y decrece en los meses de agosto y septiembre. La velocidad media es de 25 km/h (Iturraspe et al 2002) con máximos entre octubre y febrero que disminuyen hacia el invierno.

Las condiciones climáticas imperantes en la región, representadas por una intensa frecuencia de los vientos y escasas precipitaciones generan condiciones de extrema evapotranspiración que afectan directamente al sistema de lagunas.

En la época estival la evaporación es intensa debido a la alta frecuencia de los vientos, a diferencia del invierno donde decrece significativamente. Iturraspe y Urciuolo (2002) estimaron para el periodo 1981-1984 valores máximos de evaporación mensual en superficie de agua libre ligeramente superiores a 140 mm y mínimos cercanos a 20 mm.

Prospección geoelectrica

A continuación, se describe el modelo de resistividad (expresada en unidades de Ωm) propuesto para el SEV S001 que

se midió próximo a una perforación existente. El error de ajuste de la respuesta de este modelo es de 2.42 %.

El modelo presenta dos electrocapas hasta los 7 metros bajo nivel de terreno (mbnt) con resistividades bajas (3,2 y 10 m). Por debajo y hasta 20 mbnt aproximadamente se presenta una capa con mayor resistividad (17 Ωm) que se corresponde con la presencia de una arena fina arcillosa. El modelo geoelectrico finaliza con una capa de baja resistividad que caracteriza la presencia de arcillas arenosas, posiblemente con agua de elevada conductividad (Figura 7).

Los resultados de la prospección geoelectrica permiten establecer una correspondencia entre los sedimentos descriptos en las perforaciones y los modelos geoelectricos. Se reconoce que los primeros 5 a 7 m del subsuelo presentan resistividad baja (inferior a 10 Ωm), caracterizando sedimentos de textura fina. Por debajo, se observa un leve aumento de la resistividad en el rango 10 a 20 Ωm , que se corresponde con una fracción más arenosa. En general esta secuencia se desarrolla hasta 20 m de profundidad, y por debajo las electrocapas presentan resistividades inferiores a 10 Ωm . Este descenso de la resistividad con la profundidad puede interpretarse como un aumento de la conductividad del agua subterránea (debido a una mayor salinidad) y también a la presencia de mayor contenido de arcillas. A partir de la correlación establecida se propone una interpretación de los rangos de resistividad y comportamiento hidrogeológico (Tabla 1).

Tabla 1. Correlación entre resistividad y comportamiento hidrogeológico.

Resistividad	Rango (Ωm)	Comportamiento hidrogeológico
Baja	0.1-10	Acuitardo Acuífero agua salobre
Media-Alta	10-50	Acuífero agua dulce
Alta	> 50	Zona no saturada

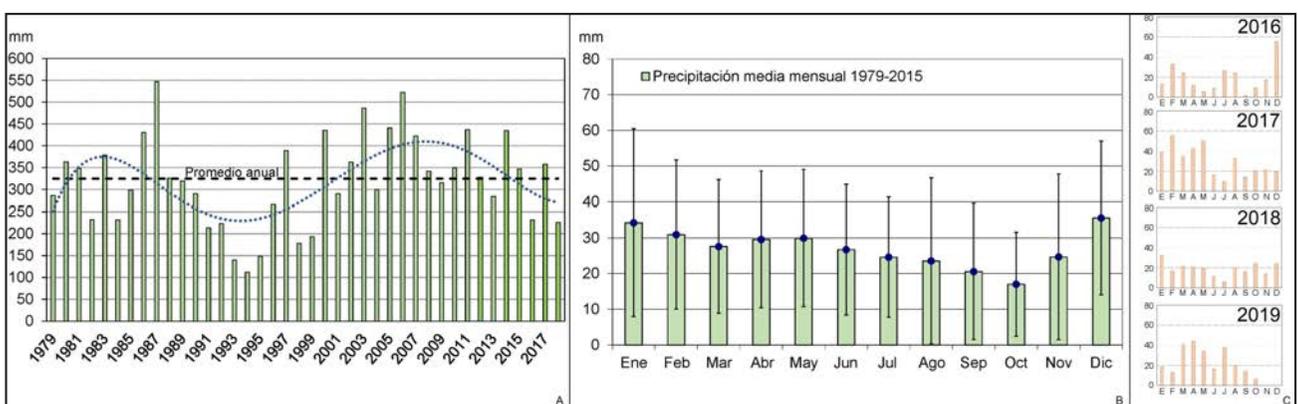


Figura 6. A) Precipitaciones anuales para el período 1979-2018. B) Promedio mensual de la precipitación. C) Precipitación mensual acumulada 2016-2019.

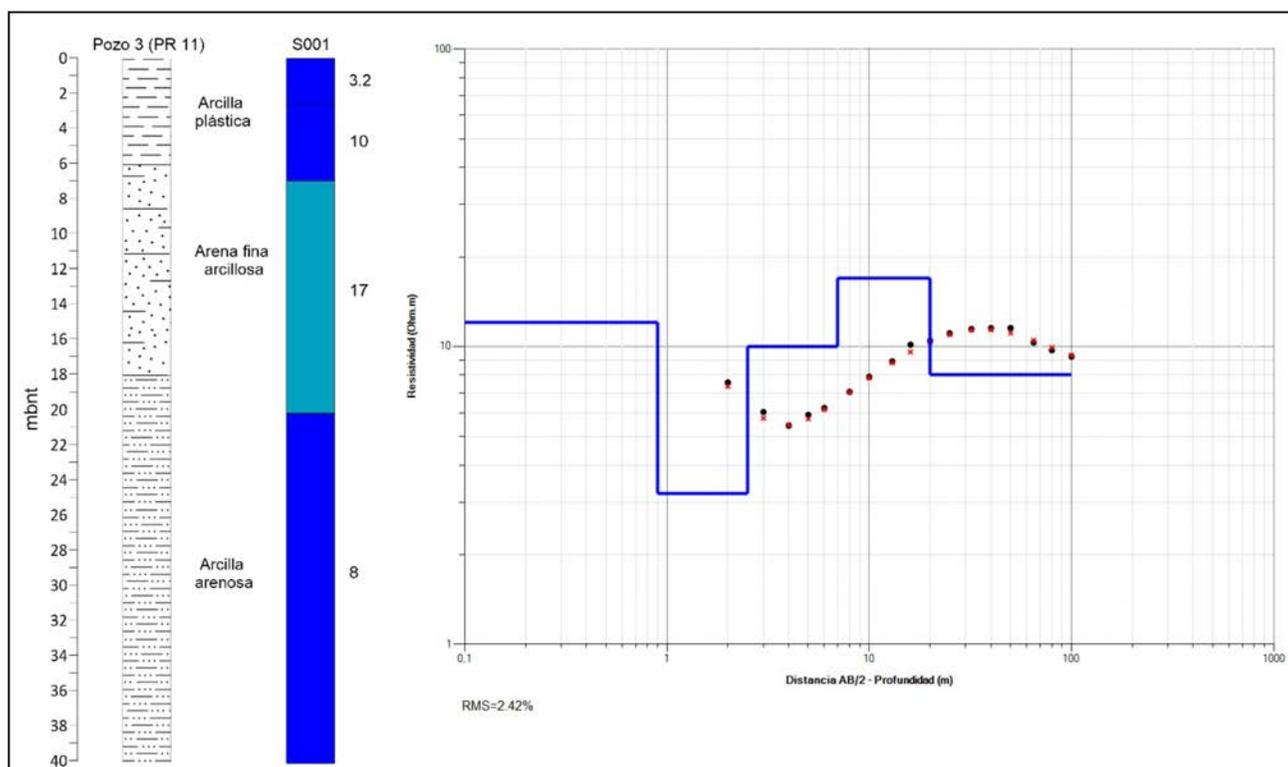


Figura 7. Descripción litológica pozo 3 y el modelo de resistividad del SEV S001. Se muestra la curva de resistividad aparente observada y calculada.

Hidrogeología

Las interpretaciones en relación a las características hidrogeológicas de los sedimentos se basan fundamentalmente en los resultados surgidos de la prospección geoelectrica, con base en la información recopilada de los pozos. Se asume la presencia de un sistema hidrogeológico integrado por una unidad acuífera somera (freática) y una unidad acuífera profunda (semiconfinada).

La unidad acuífera somera está conformada por sedimentos de textura fina tipo arcillas intercaladas con niveles de grava fina y arenas de color castaño grisáceo, que otorgan una manifiesta anisotropía y diferentes grados de permeabilidad. En proximidad a las lagunas se presentan depósitos de baja conductividad hidráulica, integrados por sedimentos de granulometría fina que alcanzan un espesor máximo de 6 m y suprayacen sobre arenas. Se asume que los niveles superiores son de edad cuaternaria; sin embargo, la escasez de información limita poder definir con exactitud la extensión de la cubierta sedimentaria moderna. En la laguna El Carmen, *Coronato et al. (2017)* informa un espesor entre 1 y 3 m para los sedimentos pleistocenos identificados en el entorno inmediato.

A diferencia de las zonas bajas en los sectores más elevados localizados al oeste de la cuenca, donde el nivel de agua subterránea se localiza a mayor profundidad, el acuífero freático se aloja en materiales de textura más gruesa, como limos y arenas de edad neógena.

La unidad hidrogeológica más profunda se encuentra integrada por una sucesión de areniscas, limolitas y arcillitas, frecuentemente fosilíferas y de origen marino que constituyen una sucesión de niveles acuíferos con intercalaciones acuitardas.

La presencia de un nivel con valores de resistividad eléctrica inferiores a 10 Ω m permite diferenciarla, desde un punto de vista geoelectrico, de la unidad más somera.

Hidrodinámica

La zona no saturada, alojada en materiales muy heterogéneos como arcillas y gravas, presenta un espesor variable desde escasos centímetros en la zona de vega, hasta 12 mbnt en las serranías identificadas al oeste de la cuenca.

La morfología del flujo subterráneo, presenta un diseño concéntrico convergente con sentido de escurrimiento local hacia los bajos endorreicos (Figura 8), donde se emplazan las lagunas que funcionan como áreas de descarga local. En la zona central, entre las lagunas del Peñón, Don Bosco, Larga y de los Cisnes se reconoce un sector topográficamente elevado que se asume como posible área de recarga local, condición que se valida a partir de mayores valores de altura hidráulica en pozos emplazados sobre la margen de la laguna de los Cisnes.

Las lagunas Don Bosco y Larga se circunscriben a la curva potenciométrica de 10 msnm, mientras que las lagunas del Peñón y de los Cisnes se localizan a una menor altura hidráulica, del orden de 6 msnm, por lo que ocasionalmente y en eventos de precipitación extrema se encontrarían parcialmente vinculadas.

Las diferencias de potencial hidráulico permitieron definir el comportamiento efluente o ganador de los cuerpos de agua superficial respecto al acuífero freático. Los mayores registros de altura potenciométrica se presentan al oeste de la cuenca, con valores de 60 msnm, mientras que los menores resultan de 6 msnm y coinciden con las zonas más bajas topográficamente.

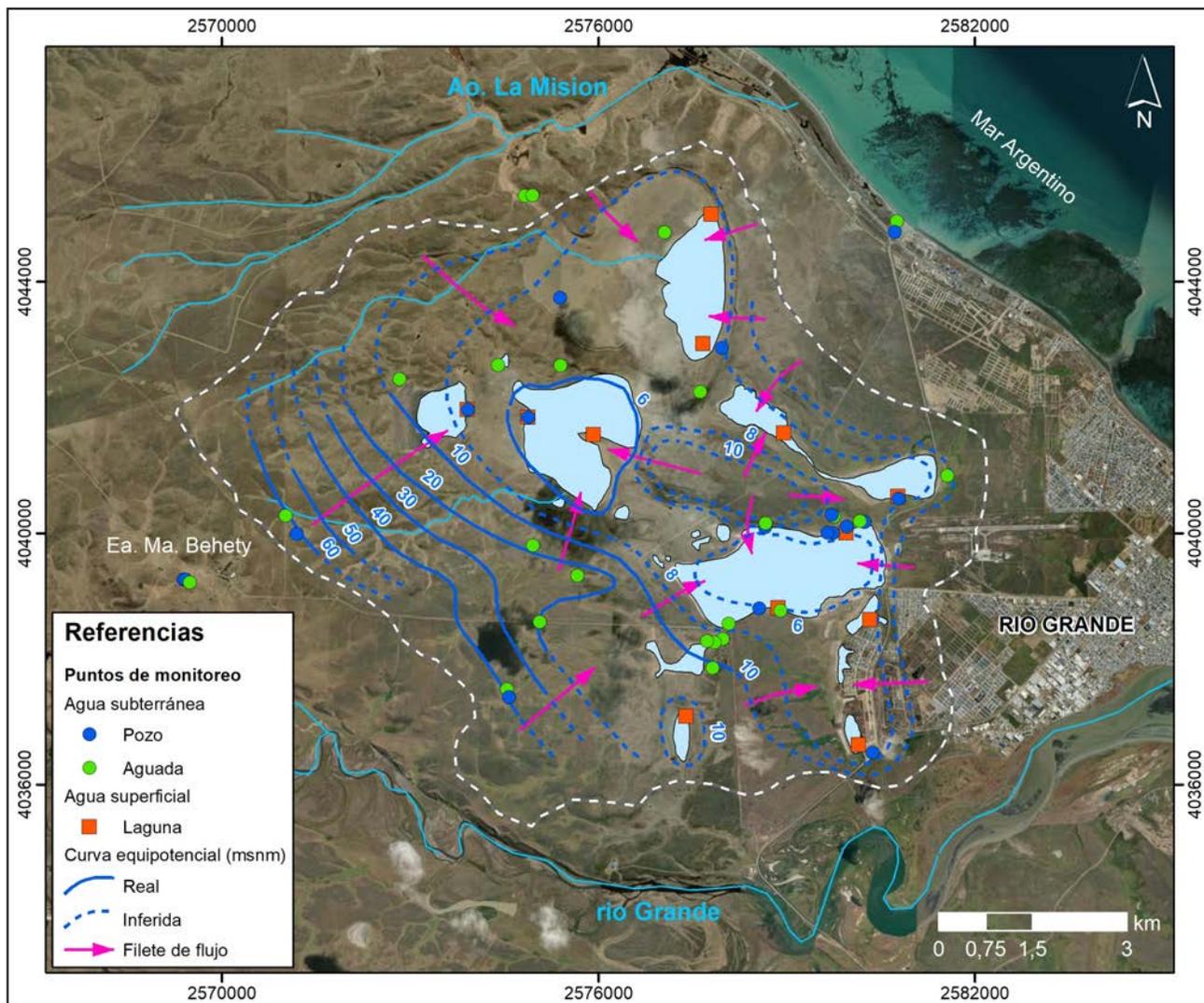


Figura 8. Mapa equipotencial del acuífero libre en el sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande.

Hidroquímica

La caracterización química del agua superficial y subterránea se basa en la interpretación de valores de parámetros físicos in situ en la totalidad de los puntos relevados.

El área de influencia de las lagunas se caracteriza por aguas de variada salinidad con valores extremos entre 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector de vega, hasta cercanos a 47.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el cuerpo de agua superficial. En relación al agua superficial de las lagunas, los valores más bajos de conductividad eléctrica in situ se midieron en las lagunas Redonda (1.960 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Seca (2.030 y 2.790 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y Azul (5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los valores más altos se registraron en laguna Don Bosco (12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Larga, de los Cisnes y Peñón (> 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

En correspondencia con la red de flujo subterránea las concentraciones aumentan desde la periferia de la cuenca hasta las lagunas, donde se reconocen contenidos superiores al agua de mar. Los elevados valores de conductividad eléctrica del agua superficial responden al funcionamiento de las lagunas como punto terminal de la descarga subterránea, donde se producen procesos de evaporación y concentración progresiva de solutos.

En relación al agua subterránea, registros inferiores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondientes con aguas dulces (Custodio y Llamas, 1983), se presentan mayormente en vertientes o manifestaciones del nivel freático en superficie y en pozos que interceptan agua hasta 40 metros bajo boca de pozo. Valores similares se determinaron en pozos que alcanzan una profundidad final de 60 mbnt, en la Estancia María Behety, al oeste del área de estudio y que forma parte de la cuenca del Río Grande.

Las mayores concentraciones en agua subterránea son del orden de 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en pozos ubicados en el margen de la laguna Larga y de los Cisnes, que interceptan agua de distintos niveles acuíferos hasta una profundidad de 45 mbnt. En estos sectores las características saladas del agua subterránea podrían relacionarse con un prolongado tiempo de residencia debido a una menor velocidad del flujo subterráneo; y a la presencia de sedimentos con contenido de sales como consecuencia de los procesos de evaporación.

CONCLUSIONES

El sistema de lagunas de los Cisnes, del Peñón, Don Bosco, Redonda, Larga, Seca y Azul ubicado al oeste de la ciudad de

Río Grande conforma una cuenca endorreica, que se encuentra regulada fundamentalmente por el aporte del acuífero freático con contribución de la componente climática.

La sucesión de ciclos deficitarios y de exceso tienen influencia directa sobre las variaciones del nivel freático y en consecuencia la morfología de las lagunas y su dinámica subterránea.

La desecación parcial de las lagunas genera la exposición de materiales de textura fina, tipo arcilla que conforman los sedimentos del lecho lacustre. El pastoreo ovino en las zonas proximales resulta una práctica habitual que ha producido una continua degradación generalizada potenciando los fenómenos de desertificación. En los meses de verano se observa un incremento en la frecuencia e intensidad de los vientos con una dirección oeste y oeste sudoeste. La acción eólica, mediante el proceso de deflación de carácter dinámico y eventual, genera la voladura de estos materiales disponibles produciendo serios problemas ambientales para la población y los recursos naturales.

El área de influencia de las lagunas se caracteriza por aguas de variada salinidad con valores extremos entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sector de vega, hasta cercanos a 47.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el cuerpo de agua superficial. Aguas de características dulces se presentan mayormente en vertientes o manifestaciones del nivel freático en superficie al igual que en pozos que interceptan niveles hasta 40 metros bajo boca de pozo; mientras que concentraciones más elevadas se presentan en pozos donde se reconoce un mayor tiempo de residencia y fenómenos de concentración de sales en los sedimentos.

Las mediciones de conductividad eléctrica in situ del agua superficial permitieron reconocer que en las lagunas Don Bosco, Larga, de los Cisnes y Peñón, los valores son un orden de magnitud superior que los obtenidos en las lagunas Redonda, Seca y Azul. En las zonas próximas a estas lagunas de mayor salinidad se observaron depósitos de acumulación (mantos eólicos y dunas) que constituyen la principal fuente de material movilizado durante las tormentas de polvo.

Los resultados de la prospección geoelectrica permitieron reconocer que el agua subterránea presentaría características dulces hasta una profundidad aproximada entre 15 y 20 mbnt;

en correspondencia con materiales arcillosos, o aguas de características salobres a partir de 20 mbnt. En este sentido, debido al comportamiento ganador de los cuerpos de agua superficial, el aporte de agua dulce del nivel freático contribuiría a disminuir la salinidad del agua superficial. Por este motivo, la relación agua superficial-subterránea juega un importante rol en la dinámica de movilización de sedimentos del lecho lacustre.

RECOMENDACIONES

Las posibles medidas de prevención y mitigación para controlar el fenómeno extremo se encuentran condicionadas por la extensión de las lagunas, el deterioro y mala calidad de los suelos marginales.

Como medidas de prevención se sugiere la implementación de un sistema de alerta temprana, donde se registren diversas variables hidrogeológicas y climáticas, con la finalidad de anticipar la ocurrencia de eventos extremos y ejecutar acciones inmediatas.

Una posible medida de acción ante situaciones de emergencia en meses extremos, podría ser la implementación de un sistema de recarga artificial de las lagunas con agua del Río Grande complementado con otras fuentes de agua adicional (subterránea o planta de tratamiento de residuos cloacales).

Por último, se recomienda una adecuada planificación en el uso del suelo, destinado a fines forrajeros o ganaderos, tendiente a fomentar el mejoramiento de las pasturas naturales en los sectores más vulnerables, y minimizando la presión del ganado. De manera complementaria se propone revegetar los márgenes de las lagunas con especies predominantes de la estepa que posibiliten la fijación del suelo.

Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento a Carmelo Sánchez y Rita Lofiego por la importante colaboración durante los relevamientos de campo, y también a José Luis Hormaechea, Gerardo Connon y Luis H. Barbero de la Estación Astronómica de Río Grande (UNLP).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AUER V. (1956).

The Pleistocene of Fuego-Patagonia. Part I: The Ice and Interglacial Ages. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, A III Geologica-Geographica* 48: 1-226.

BONARELLI G. (1917).

Tierra del Fuego y sus turberas. *Anales del Ministerio de Agricultura de la Nación, Sección Geología, Mineralogía y Minería* 12 (3): 1-119.

BORRELLO A.V. (1969).

Los Geosinclinales de la Argentina. *Anales de la Dirección de Geología y Minería* 14: 1-188. Buenos Aires, Argentina.

BUATOIS L.A. Y CAMACHO H.H. (1993).

Geología del sector nororiental del lago Fagnano, Isla Grande de Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48(2): 109-124.

BUJALESKY G.G., CORONATO A., ISLA F. (2001).

Ambientes glaciales y litorales cuaternarios de la región del río Chico, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(1) 2001: pp 73-90.

Bujalesky G.G. (1998).

Holocene coastal evolution of Tierra del Fuego, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula. AA BalkEMA- Rotterdam-Brookfield*: pp 247-281.

- CALDENIUS C.C. (1932).
Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego.
Geografiska Annaler 14:1-164. *Stockolm*.
- CAMINOS, R., HALLER, M., LAPIDO, O., LIZUAIN, A., PAGE, R., Y RAMOS, V. (1981).
Reconocimientos geológico de los Andes Fueguinos, Territorio Nacional de Tierra del Fuego.
VIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 759-786. San Luis. Argentina.
- CATTLE S. R. (2016).
The case for a southeastern Australian Dust Bowl, 1895-1945.
Aeolian Research 21, pp 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.02.001>
- CLAPPERTON C.H. (1993).
Quaternary Geology and Geomorphology of South America.
Elsevier Science Publishers, 779 pp.
- CODIGNOTTO J. (1969).
Nota acerca de algunos aspectos geológicos de la costa patagónica comprendida entre punta Loyola y el cabo Vírgenes.
Boletín del Servicio de Hidrografía Naval, 6(3): 257-263. Buenos Aires.
- CODIGNOTTO J. Y MALUMNIÁN N. (1981).
Geología de la Región al N del paralelo 54° L.S. de la Isla Grande de Tierra del Fuego.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 1:44-88.
- CORONATO A.M. (1990).
Definición y alcance de la última glaciación pleistocena (Glaciación Moat) en el Valle de Andorra, Tierra del Fuego.
XI Congreso Argentino, Actas 1: 286-289. San Juan.
- CORONATO A.M. (1993).
La Glaciación Moat (Pleistoceno superior) en los valles Pipo y Cañadón del Toro, Andes Fueguinos.
XII Congreso Geológico Argentino, Actas 6: 40-47. Mendoza.
- CORONATO A.M. (1995A).
Geomorfología glacial de valles de los Andes Fueguinos y condicionantes físicos para la ocupación humana.
Ph.D. Dissertation, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, 318 pp. Inédito.
- CORONATO A.M. (1995B).
The last Pleistocene Glaciation in tributary valleys of the Beagle Channel, Southernmost South America.
Quaternary of South America & Antarctic Peninsula, 9 (1993): 153-172. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.
- CORONATO, A, BUJALESKY, G., PÉREZ ALBERTI, A, Y RABASSA, J. (2004).
Evidencias criogénicas fósiles en depósitos marinos interglaciarios de Tierra del Fuego, Argentina.
X Reunión Argentina de Sedimentología. Acta 1:48-49. San Luis, Argentina.
- CORONATO A., PONCE J.F., QUIROGA D.R.A., Y GOGORZA C. (2017).
Caracterización geológica y geomorfológica de la cuenca de la laguna Carmen (Estepa fueguina, Argentina) y su registro sedimentario durante el Holoceno tardío.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 74(2): pp 263-273.
- CUSTODIO E. Y LLAMAS M. (1983).
Hidrología Subterránea.
Tomos I y II Ed. Omega. Barcelona.
- FERUGLIO E. (1950).
Descripción Geológica de la Patagonia. Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales 3: 1-431.
Ministerio de Industria y Comercio de La Nación. Buenos Aires.
- ITURRASPE R. Y URQUIOLO A. (2000).
Clasificación y Caracterización de las Cuencas Hídricas de Tierra del Fuego.
XVIII Congreso Nacional del Agua. Ed. UNSE; ISBN: 978-987-99083-4-1. pp 365-366.
- ITURRASPE R. Y URQUIOLO A. (2002).
Ciclos deficitarios en el régimen de sistemas lagunares de la estepa fueguina.
XIX Congreso Nacional del Agua. Córdoba, Argentina. CD-Rom, 10 pp.
- JOHANSEN H. (1975).
An interactive computer-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings.
Geophysical Prospecting, 23.
- KRANCK E. H. (1932).
Geological investigations in the Cordillera of Tierra del Fuego.
Acta Geographic 4, pp. 1-231.

- KRUSE E., GASPARI F., PERDOMO R., LAURENCENA P., FUCKS E., PERDOMO S., CARRETERO S., Y LOFIEGO R. (2012). Conflictos ambientales de la urbanización en Río Grande (Tierra del Fuego). *Estudio integral con énfasis en el recurso hídrico subterráneo. Proyectos de Investigación, Innovación y Transferencia en Áreas Prioritarias. UNLP-UNTdF. Informe inédito.*
- MALUMIAN N. Y OLIVERO E. (2006). El Grupo Cabo Domingo, Tierra del Fuego: Bioestratigrafía, Paleoambientes y Acontecimientos del Eoceno-Mioceno marino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 2: 139-160.*
- MALUMIAN N. (1999). La sedimentación en la Patagonia Extraandina. *En Caminos, R. (Ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales, Geología Argentina, Anales 29: 557-578.*
- MARIAZZI A., CONZONNO V., ULIBARRENA J., PAGGI J., Y DONADELLI J. (1987). Limnological investigation in Tierra del Fuego - Argentina. *Biología Acuática (10). La Plata.*
- MEGLIOLI A. (1992). Glacial geology and chronology of Southernmost Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina and Chile. P h.D. *Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, U.S.A., 216 pp. Inedito.*
- MEGLIOLI A., EVENSON E., ZEITLER P., Y RABASSA J. (1990a). Cronología relativa absoluta de los depósitos glaciares de Tierra del Fuego, Argentina y Chile. *XI Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 457-460. San Juan.*
- MEGLIOLI A., EVENSON E., Y RABASSA J. (1990B). Multiple relative and absolute dating techniques applied to the glacial history of Tierra del Fuego. *Geological Society of America, Northeastern Section Meeting, Syracuse, Abstracts.*
- NORDENSKJÖLD O. (1898). Notes on Tierra del Fuego. An account of the Swedish Expedition of 1895-1897. *Scott. Geograph. Magaz. Edimburg 13: 393-399.*
- OLIVERO E. Y MARTINIONI D. (1998). A review of the Mesozoic-Paleogene geology of the Marginal-Austral Basin of Tierra del Fuego. *IGCP Project 381 South Atlantic Mesozoic Correlations Third Annual Conference, Comodoro Rivadavia, Argentina, Field Trip N° 3: 1-13.*
- OLIVERO E.B. Y MALUMIÁN N. (1999). Eocene stratigraphy of Southern Tierra del Fuego, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 83(2): 295-313.*
- OLIVERO E.B., MALUMIÁN N., Y MARTINIONI D.R. (2006). Mapa Geológico de la Isla Grande de Tierra del Fuego e Isla de los Estados; Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur; República Argentina (escala 1:500.000). *SEGEMAR, Buenos Aires.*
- ORELLANA, E. (1982). Prospección en corriente continua. Madrid. Paranainfo.
- PEREZ-ALBERTI A., VALCARCEL DÍAZ M., CORONATO A, RABASSA J., Y COSTA CASAS M. (2008). Wedge structures in southernmost Argentina (Río Grande, Tierra del Fuego). *IX International Conference on Permafrost, Fairbanks, University of Alaska, 1381-1385. Alaska*
- PORTER S.C. (1989). Character and ages of Pleistocene drifts in a transect across the Strait of Magellan. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula, 7: 35-49. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.*
- PROSPERO J. M., Y LAMB P. J. (2003) African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science 302, pp. 1024-1027.*
- RABASSA J., SERRAT D., MARTI C., Y CORONATO A. (1988). Estructura interna de drumlins, Isla Gable, Canal Beagle, Tierra del Fuego. *II Reunión Argentina de Sedimentología, 222-226. Buenos Aires.*
- RABASSA J., HEUSSER C.J., Y RUTTER N. (1989). Late Glacial and Holocene of Argentina, Tierra del Fuego. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula 7:327-351. Rotterdam: A.A. Balkema. Rotterdam.*
- RABASSA J., SERRAT D., MARTI C., Y CORONATO A. (1990). El Tardiglacial en el Canal Beagle, Tierra del Fuego, Argentina. *XI Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 290-293. San Juan.*

- RABASSA J., BUJALESKY G.G., MEGLIOLI A., CORONATO A., GORDILLO S., ROIG C., Y SALEMME M. (1992).
The Quaternary of Tierra del Fuego, Argentina: the status of our knowledge.
Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. Ca 81: 241-256. Sweden.
- RABASSA J. Y CLAPPERTON C.H. (1990).
Quaternary Glaciations of the Southern Andes.
Quaternary Science Reviews, 9: 153-174.
- RIDLEY D.A., HEALD C.L., Y PROSPERO J.M. (2014)
What controls the recent changes in African mineral dust aerosol across the Atlantic?,
Atmospheric Chemical Physics, (14), pp. 5735-5747.
- RIEMER N., DOHERTY O.M., Y HAMEED S. (2006)
On the variability of African dust transport across the Atlantic,
Geophysical Research Letters, 33 (13), L13814
- SPEER M.S. (2013).
Dust storm frequency and impact over Eastern Australia determined by state of Pacific climate system.
Weather and Climate Extremes (2), pp 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.10.004>
- THOMAS, E. R. (1949).
Manantiales Fieles. Magallanes Province, Chile.
Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists 33 (9): 1579-1589.
- UNEP, WMO, UNCCD (2016).
Global Assessment of Sand and Dust Storms.
United Nations Environment Programme, Nairobi.
- URCIUOLO A., ITURRASPE R., LOFIEGO R., Y NOIR G. (2009).
Estrategias para el ordenamiento hidro-ambiental de la cuenca binacional del Río Grande de Tierra del Fuego.
XXII Congreso Nacional del Agua. Trelew.
- VILLARREAL M.L., CORONATO A., MAZZONI E., Y LÓPEZ R. (2014).
Mantos eólicos y lagunas semipermanentes de la estepa fueguina (53° S), Argentina.
Revista de la Sociedad Española de Geología 2: 81-96.
- XI X., Y SKOLIK I.N. (2015).
Dust interannual variability and trend in Central Asia from 2000 to 2014 and their climatic linkages.
Journal of Geophysical Research (120)
- ZHANG J.S., PENG G.B., HUANG M., Y ZHANG Z. H. (2006),
Are dust storm activities in North China related to Arctic ice-snow cover?,
Global Planetary Change, 52 (1-4), pp 225-230
- ZODHY, A. (1989).
A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curve.
Geophysics, 54(2), 245-253.

DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas técnicas, Reseñas de Libros, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista.

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores seguir estrictamente las siguientes instrucciones para la confección del manuscrito:

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y aplicar estrictamente las siguientes instrucciones:

1. DE CARÁCTER GENERAL

- Las contribuciones deben ser originales. Se debe garantizar que éstas no hayan sido enviadas a otra revista en simultáneo y que no hayan sido publicadas con anterioridad, de forma total o parcial.
- Se debe garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los *derechos de autor (copyright)*, que los derechos de terceros (*terceras partes*) no serán violados y que la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI) no será considerada legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se admitirán trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- Todos los envíos serán evaluados preliminarmente por el Editor Jefe y la Editora Asociada. Con posterioridad serán enviados a revisión por pares en carácter ciego.
- Toda nueva presentación debe ser acompañada de una nota al Editor de la Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente en la cual debe constar el título del trabajo y los autores, expresando que el mismo es original, que no ha sido enviado ni se enviará a ninguna otra revista durante el proceso editorial. Se debe aclarar aquí cualquier conflicto de interés o personal.
- Los artículos que no cumplan las normas editoriales serán devueltos sin arbitrar.
- La revista no cobra por el envío de artículos. En el caso que el número de autores no socios de ASAGAI supere el 50% de la totalidad de estos se deberá proceder al pago, en concepto de derecho de publicación, de AR\$ 2000.
- Puede consultar el enfoque y alcance de la Revista, así como el resto de sus políticas en <https://www.editoriasasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/about>

2. SOBRE EL FORMATO Y LA EXTENSIÓN DEL TEXTO

- Los **artículos originales** deberán tener una extensión que no supere las 20 (veinte) páginas y deberá ajustarse a las normas establecidas.
- En las **notas técnicas**, la extensión total del manuscrito no debe superar las 3 (tres) páginas, debe incluir Resumen, *Abstract*, Palabras claves, *Keywords*, hasta 2 (dos) figuras y una tabla.
- En el caso de **Artículos Invitados** la extensión podrá ser superior a 20 páginas, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con el Editor de la Revista y el Comité Editorial.
- El resto de las situaciones mencionadas (**Discusiones Técnicas** y **Reseñas de Libros**) deberán tener hasta una página de extensión.
- El título del manuscrito debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido y escrito sin utilizar abreviaturas.
- El texto debe prepararse en el procesador de texto Microsoft Word® (.doc o .docx).

- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm).
- Los márgenes para utilizar son de 20 mm (izquierdo, derecho, superior e inferior).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo. Para ello utilizar fuente Times New Roman, tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
- Si el trabajo está escrito en español, el título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir el título en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés se debe incluir, además, el título en español. Se deberán seguir las especificaciones mencionadas en el ítem anterior. El espaciado entre ambos títulos será de 12 puntos.
- Debajo del título, en texto centrado, con fuente Times New Roman tamaño 10, se incluyen los datos de los autores y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- A partir de la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. En primer lugar, se debe incorporar el resumen, resumen, abstract, de acuerdo con el idioma del manuscrito. Todo el texto deberá estar escrito con fuente Times New Roman, tamaño 12, a interlineado sencillo, con sangría de un centímetro y con espacio simple entre párrafos. Se conservarán los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados símbolos y términos científicos o expresiones latinas o extranjeras.
- En el caso que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen", de hasta 250 palabras, las "Palabras claves" en un número entre 3 y 5. A continuación, el correspondiente "*Abstract*" y, seguidamente, las correspondientes "*Keywords*". Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- En el caso de que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "*Resumo*" de hasta 250 palabras, seguido de las "*Palavras chave*" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "*Abstract*" y las correspondientes "*Keywords*" en inglés. Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- En el caso de que el idioma del trabajo sea inglés, la primera sección será el "*Abstract*" de hasta 250 palabras, seguido de las "*Keywords*" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Resumen" y las correspondientes "*Palabras clave*" en español. Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- Las palabras claves (o *keywords*) se utilizarán, también, a los fines de la indexación. Pueden incluir frases cortas. Deben estar ordenadas alfabéticamente y se recomienda no repetir palabras incluidas en el título.
- Se debe usar justificación completa en el cuerpo del texto.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte de este. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una línea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando números entre paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:)}).
- Los subíndices y superíndices deben ser legibles.
- Tener especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".

- Proporcionar el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples usar el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo: Sy/Xm.
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo, Ca²⁺ y CO₃²⁻, no como Ca++ o CO--3.
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo: ¹⁸O
- Se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como P₂O₅).

3. SOBRE EL FORMATO DE FIGURAS Y TABLAS

Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., citadas en el texto. Éstas deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja (170 x 257 mm). Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de calidad.

- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente debajo de la misma, que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará fuente Times New Roman tamaño 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por un punto, en la forma Figura n. donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda preparar leyendas cortas y concisas.
- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, o bien entre paréntesis como (Figura 1). El tamaño debe considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf, .png o .eps) con una definición igual o mayor a 300 dpi. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes, las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben poseer contraste, ser claras y con una luz adecuada. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg o pdf., con una definición igual o mayor a 300 dpi. Cuando en las fotografías no existan elementos que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.) deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas.
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser claros y poseer contraste.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (coordenadas UTM o Lat/Long). Deberán tener las referencias adecuadas correspondientes a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- A los fines de la elaboración de las figuras tipo mapa, se sugiere que la simbología se adapte a:
 - https://ngmdb.usgs.gov/fgdc_gds/geosymstd/fgdc-geosym-all.pdf
 - <http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/docs/ModeloMAGNA.pdf>
 - <https://doi.org/10.1080/02626666209493264>.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.

- Las tablas se deben remitir como archivo de texto (formato Word) y no como imagen. Se deben incluir en archivos separados. Serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis, es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. La tabla y el número se deben indicar como **Tabla n** donde n es el número de orden que corresponda.

4. SOBRE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y LAS CITAS DE TRABAJOS

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor/es. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del trabajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso de que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar "modificada a partir de..." seguido de la cita del artículo original.
- A los autores que deseen incluir figuras, tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias de que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio de que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente adhiere a las normas internacionales de citación bibliográfica de la **American Psychological Association (APA)**. Las normas se encuentran disponibles en <http://normasapa.net/2017-edicion-6/>.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo con el orden de aparición en el texto.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo, ...según Casio et al., (1980), "*la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma*" o bien directamente "la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma" (Casio et al., 1980).
- La lista de referencias deberá estar ordenada alfabéticamente, con las citas bibliográficas justificadas a la izquierda. Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores.
- Se citarán empleando texto en cursiva el título de la revista o actas de congreso o reunión científica del artículo citado, o el título del libro citado, según:

- Publicaciones periódicas formato impreso: Apellido, A.A., Apellido, B.B, y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista*, volumen (número): pp-pp.
- Publicaciones periódicas con DOI: Apellido, A.A., Apellido, B.B, y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista*, volumen (número), pp-pp. doi: xx
- Publicaciones en actas de congresos: Apellido, A.A., Apellido, B.B, y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre del congreso o reunión científica*, volumen, pp-pp.
- Libro: Apellido, A.A. (Año). *Título*. Ciudad, País: Editorial.
- Libro con editor: Apellido, A.A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad, País: Editorial.
- Capítulo de libro: únicamente en los casos de libros donde cada capítulo tenga un autor diferente y un editor: Apellido, A.A., y Apellido, B.B. (Año). Título del capítulo. En A.A. Apellido. (Ed.), *Título del libro* (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplos de citas:

- Palenzuela, J.A., Marsella, M., Nardinocchi, C., Pérez, J.L., Fernández, T., Chacón, J. & Irigaray, C. (2015). Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. *Landslides*, 12(6):1035-1050.
- Casio, M.; Marcinus, F.; Salina, R y Hubbard, R.T. (1980). La caída del imperio romano. *Revista de Occidente*, Vol. 180: 224-234.
- Carranza Torres, C.M. (1991). Cálculo analítico de redes de filtración. *Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, vol. VI, 250-267.
- Dearman, W.R. (1991). *Engineering geological mapping*. Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Mateos Ruiz, R.M. y M. Ferrer Gijón. (1994). Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (Eds.), *7th International Congress International Association of Engineering Geology*, (vol III: 2059-2064). Rotterdam, Holanda: Balkema.
- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo con el siguiente modelo: Barker, A. and Jones, C. (2007). Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En T. B. Fischer et al. (Eds.) *Environmental Assessment Lecturer's Handbook* (pp. 29-38). Disponible en <http://www.penta-eu.net>, último acceso 28 de Junio de 2010.
- Artículos con DOI: Slifka MK, Whitton JL (2000) Clinical implications of dysregulated cytokine production. *J Mol Med*. <https://doi.org/10.1007/s001090000086>

INFORMACIÓN SOBRE EL PROCESO EDITORIAL

Envíos

El único medio de presentación de manuscritos es a través de la página web <http://www.editoresasagai.org.ar/lojs/index.php/rgaia>, mediante la cual el autor deberá proceder a registrarse.

Al finalizar el envío Ud. recibirá una confirmación, por medio de un correo electrónico, con un número de referencia. Le solicitamos tenga a bien guardar dicho número, así como el nombre de usuario y contraseña por Ud. elegidos al momento de la registración. A aquellos autores que ya cuenten con un usuario, obtenido durante una presentación o arbitraje

previo, se les solicita no iniciar un nuevo registro, sino utilizar la función de recuperación de contraseña disponible en el portal, si fuera necesario.

Se sugiere consultar la **lista de comprobación de envíos y otras políticas de la revista** en <https://www.editoresasagai.org.ar/lojs/index.php/rgaia/about/submissions>

El texto, las figuras y los epígrafes, realizados según las instrucciones, deberán ser subidas como archivos complementarios por separado. Tanto durante la etapa de la evaluación como de la edición se irán solicitando modificaciones al archivo principal, como a las figuras que acompañan el envío. Se las deberá cargar reemplazando las originales y no como nuevos archivos, con las modificaciones requeridas.

Los trabajos enviados a los autores para corrección y devueltos después de cuatro meses, serán tratados como artículos nuevos.

Exclusión de Revisores

Los autores pueden solicitar la exclusión de evaluadores cuando remiten sus manuscritos, indicando los motivos de dicho requerimiento. Los Editores tienen la potestad de tomar una decisión al respecto.

Confidencialidad

Toda comunicación de los autores con la Editorial se considerará confidencial e incluye, exclusivamente, el contacto entre los autores con Editor Jefe, Editora Asociada y Secretaria del Comité Editorial.

Sobre el Arbitraje

De considerarse pertinente su publicación, la evaluación por pares es efectuada mediante el envío del manuscrito original a dos evaluadores 100% externos a la entidad editora y en modalidad ciego.

En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador externo.

La decisión final relativa a la publicación de los artículos y reseñas se toma en función de los dictámenes de los evaluadores externos, para lo cual se requieren dos recomendaciones favorables para la publicación.

Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.

Los posibles dictámenes son: aceptado, aceptado con cambios menores, aceptado con cambios mayores, y no aceptado.

Aviso de Derechos de Autor/a

Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a la revista el derecho de ser la primera publicación del trabajo licenciado según una licencia de atribución <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

La Revista permite a los autores mantener el derecho patrimonial sobre su obra sin restricciones. Los autores se reservan el permiso de publicar y/o almacenar la versión aceptada de su artículo en cualquier tipo de repositorio o colección con la condición de citar explícita y adecuadamente, cada vez que sea utilizado, la fuente original de primera publicación (Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente).

Originalidad y Plagio

Los autores deberán asegurar que el trabajo presentado es un manuscrito completamente **original e inédito**, que no se encuentra **ni publicado ni presentado previamente en cualquier otro soporte**, y si los autores han utilizado el trabajo y/o palabras de otros, que éstos han sido apropiadamente

citados o acotados. Únicamente se aceptará material publicado parcialmente con anterioridad (por ejemplo, en Actas de Congresos) si se hace constar la causa de tal duplicación y se explicita la fuente original del artículo en el nuevo manuscrito.

Los autores firmantes del trabajo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión.

Si se sospecha que un artículo es sustancialmente copia de otro trabajo, por favor indicarlo al Editor de la Revista de

Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, citando el trabajo previo con el mayor detalle posible.

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente utilizará un sistema de detección de plagio denominado *Plagium* (www.plagium.com) para la verificación de textos breves de hasta 5.000 caracteres de forma rápida y libre. Además, los manuscritos podrán ser verificados manualmente y contrastados con otras publicaciones si se sospecha de su originalidad. Cuando se detecte un plagio o autoplagio total o parcialmente (sin la citación correspondiente), el texto no se incorporará al proceso editorial y se le notificará al autor.

**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**

FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA

ENVIAR A:

Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería
Maipú 645 - Piso 1º - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a asagai@asagai.org.ar)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) []

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

_____ []

3. Deseo comprar los artículos:

_____ []

FORMA DE PAGO

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 3003-66304-3 del Banco HSBC

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.
CBU 1500054100030036630432

Solicitud de factura para pago mediante transferencia.

PRECIO DE COMPRA (Desde 01-10-2021):

Para Argentina:

- Compra de número vigente: **2250** Pesos
- Compra de número atrasado: **2600** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **500** Pesos por artículo

Para el exterior:

- Compra de número vigente: **22** Dólares
- Compra de número atrasado: **26** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **5** Dólares por artículo

PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-10-2021):

Para Argentina:

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **4500** Pesos
- Suscripción Instituciones: **18000** Pesos
- Compra de número atrasado: **2600** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **500** Pesos por artículo

Para el exterior:

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **45** Dólares
- Suscripción Instituciones: **180** Dólares
- Compra de número atrasado: **26** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **5** Dólares por artículo

Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en www.asagai.org.ar

Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la Revista.

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2021
Editada en Argentina

Se terminó de editar en Diciembre de 2021



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Restitución de fotografías aéreas históricas para determinar el nivel de colmatación del embalse Cabra Corral, Salta, Argentina
Núñez, Virgilio

Características y evolución de manantiales captados para usos múltiples en el distrito Vichigasta, La Rioja, Argentina
Silva, Santiago H. - Poveda, María E. - Rodríguez, Corina I. - Miguel, Roberto E.

Riesgo geomorfológico de médanos migrantes: minimización mediante la extracción de áridos en Arenas Verdes, municipio de Lobería (Buenos Aires)
Bertola, G. R. - Farenga, M. - Taverna, B. - Antenucci, D. - del Río, J. L.

Caracterización geomecánica de los taludes de la autovía RP N° 20, municipio de El Volcán, provincia de San Luis
Denaro, Juan F. - Sales, Daniel A.

Análisis hidrológico del sistema lagunar endorreico en la ciudad de Río Grande (provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur - Argentina) para proponer medidas de mitigación a la ocurrencia de tormentas de polvo
Perdomo, Santiago - Ruiz, María Soledad - Noir, Gerardo - Kruse, Eduardo Emilio

Portada: Remoción en masa en la localidad de Las Cuevas (Mendoza), ubicada sobre la Ruta Nacional N° 7 en las cercanías del Paso Internacional Cristo Redentor.
Fotografía: María Paula Bunicontro

