

# 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 44 • 2020

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  
Tel/Fax (011)4322-2820

Editada en la Ciudad de Córdoba - Argentina





**EDITOR JEFE**

*MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman*

UCIS Consultores  
editor@editoresasagai.org.ar

**EDITORA 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

*Dr. Julio Luis del Río*

Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario  
Universidad Nacional de Mar del Plata  
Argentina  
julioluisdelrio@gmail.com

*Lic. Luis Mario Giaconi*

Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)  
Universidad Nacional de La Plata  
Argentina  
lmgiaconi@gmail.com

*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

**SECRETARIA**

*Dra. María Paula Bunicontro*

IGEBA (CONICET-UBA)  
Argentina  
secretaria@editoresasagai.org.ar

**PRODUCCIÓN EDITORIAL**

Encargada de Diseño

*Paula Paredes*  
paulaparedes13@gmail.com

Webmaster

*Guillermo Saint*  
saintdisegno@gmail.com

*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

---

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
Mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia	<i>Sadud, Faisal</i>	1
Estimación de curvas IDF para tormentas de larga duración en la cuenca del río Gualeguay en la provincia de Entre Ríos	<i>Margasin, Andrea - Bruno, Sabina - Gimenez, Vanesa - Mastaglia, María Inés - Sato, Rodolfo</i>	15
Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales, acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta. Argentina	<i>Quispe, Carmen - Visich, María</i>	31
Estimación del campo de conductividades hidráulicas en pilas de lixiviación	<i>Delahaye, Carlos H.- Berenguer, Tadeo A. - Bilbao, M. Alejandra - Gatica, Graciela</i>	51
Directrices para autores		67
Formulario de suscripción o compra		71



## 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.

### Legenda 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 (editor@editoresasagai.org.ar).

En la página 71 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 or 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 its use in an 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 ([editor@editoresasagai.org.ar](mailto:editor@editoresasagai.org.ar)).*

*In page 71 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



## Mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia

### Potential liquefaction susceptibility maps city of Santa Cruz de la Sierra - Bolivia

Sadud, Faisal

Recibido: 13 de agosto de 2018 • Aceptado: 27 de enero de 2020

#### Resumen

*Estudios recientes del sub andino sur de Bolivia, han pronosticado que la liberación de energía acumulada en una cuña orogénica con atrapamiento de entre 85 a 100 km de la falla denominada Mandeyapecua, generaría un terremoto de Magnitud Momento Sísmico ( $M_w$ ) de 8,5. La ciudad de Santa Cruz de la Sierra está ubicada al este de Bolivia, en la unidad fisiografía llanura chaco-beniana colindante con la faja sub andina, de topografía semiplana, está asentada en una cubierta cuaternaria encima de una superficie de formaciones terciarias que se acumularon en espesas secuencias sedimentarias. Los suelos de las capas superiores, consistentes en depósitos aluviales, eólicos y palustres, en gran porción están constituidos por arenas y limos saturados, resultando muy susceptibles a licuefacción. Con objetivo de evaluación, hemos confeccionado "Mapas de susceptibilidad a la licuefacción de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra", basándonos en el procedimiento simplificado en base a 172 ensayos de penetración estándar (SPT) con determinación de  $(N_1)_{60cs}$ , calculando Relación de Resistencia Cíclica (CRR, Cyclic Resistance Ratio), Relación de Cíclica de Tensiones (CSR, Cyclic Stress Ratio) e Índice de Licuefacción Potencial (LPI, Liquefaction Potential Index) para cada perfil de SPT. Usando las distribuciones de LPI, calculamos los valores de LPI de 5 y 15, que tomamos como los límites inferiores de licuefacción "moderada" y "alto", respectivamente. Se procedió al cálculo y tabulación correspondiente y de los resultados obtenidos se graficaron 15 mapas de susceptibilidad de licuefacción confeccionados en Arc Gis, de los cuales se concluyó que con un  $M_w=6$  y ( $a_{max}$ =aceleración sísmica)  $a_{max}=0,15g$  se tendría una licuefacción moderada en el 1% de la superficie de la ciudad y con  $M_w=8,5$  y  $a_{max}=0,5$  una licuefacción del 97% de los suelos del área total de la ciudad.*

**Palabras clave:** Licuefacción, Método simplificado, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia.

## Abstract

Recent studies in the southern sub-Andean region of Bolivia have predicted that the release of accumulated energy in an orogenic wedge with entrapment between 85 and 100 km from the Mandeyapeca fault could generate an earthquake of a Magnitude Moment Scale ( $M_w$ ) of 8. The city of Santa Cruz de la Sierra, is located in eastern Bolivia, in the chaco-beniana plain physiography unit adjoining the sub-Andean belt with semi-flat topography, seated on a Quaternary cover above a surface of tertiary formations that accumulated in thick sedimentary sequences. The soils of the upper layers, consisting of alluvial, aeolian and marsh deposits, are largely made up of saturated sands and silts, which are very susceptible to liquefaction. In mean of evaluation, we have made a first Map of Susceptibility to Liquefaction of the City of Santa Cruz de la Sierra, based on the simplified procedure based on 172 SPT tests with determination of (N1) 60cs, calculating, Cyclic Resistance Ratio (CRR), Cyclic Stress Ratio (CSR) and Liquefaction Potential Index (LPI) for each SPT profile. Using the LPI distributions, we calculated the probability of exceeding the LPI values of 5 and 15, which we take as the lower limits of "moderate" and "high" liquefaction, respectively. Furthermore all result and tabulations obtained were graphed in 15 maps regarding liquefaction susceptibility confectioned in Arc Gis. from which we conclude that an  $M_w=6$  with seismic acceleration ( $a_{max}$ ) 0,15g will results in a moderate liquefaction in 1% of the surface of the city and with  $M_w=8,5$  – $a_{max}$  0,5 g a liquefaction rate of 97% of the soil in the total area of the city.

**Keywords:** Liquefaction, Simplified Method, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia.

## ANTECEDENTES

La ciudad de Santa Cruz de la Sierra-Bolivia, en su historia sísmica, ha sufrido en 1845 un sismo de Magnitud Momento Sísmico ( $M_w$ ) de 5,2 y en la cercana población de Warnes un sismo de  $M_w$  5,3 en 1929; no teniéndose registros posteriores de importancia por lo que los mapas sísmicos de la región la muestran como una zona de muy bajo riesgo y peligro sísmico.

La publicación de Books et al., (2011) que alerta sobre la probabilidad de ocurrencia de sismos de grandes magnitudes en la región denominada llanura chaqueña de Bolivia, afectarían a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra con magnitudes de  $M_w=8.5$  y  $M_w$  7,7 determinando un sustancial cambio en la amenaza geodinámica de la zona.

Los suelos existentes en el área urbana, son mayoritariamente granulares en estado saturado que resultan ser muy propensos a sufrir licuefacción; siendo uno de los temas más importantes en el análisis y mapeo de los riesgos y peligros sísmicos y que se define como "la transformación del material granular del estado sólido al licuado, como consecuencia del incremento de las presiones de poro; por la tendencia de tendencia de materiales granulares a compactarse cuando se someten a las deformaciones de cortante cíclicas y con la consecuente reducción de presiones efectivas..El cambio de estado sólido al licuado, ocurre con preferencia en suelos sueltos a medianamente compactos, pobremente drenados, como son arenas limosas o gravas confinadas o con sellos de materiales impermeables" (Youd y Idriss, 2001).

El planeamiento y desarrollo urbano de la ciudad que por sus características de topografía plana se ha realizado mayormente en escritorio, trazando circunferencias (denominados anillos de circunvalación) y radiales, mostrando similitud a una tela de araña. En los últimos 15 años se multiplicaron extraordinariamente los edificios en altura, construidos sobre suelos evaluados por su perfil geológico-geotécnico de sitio y su capacidad de soporte,

los que si bien se fundaron sobre pilotes, el diseño de los mismos sólo obedeció a satisfacer las solicitudes de capacidad de carga y normas en vigencia no actualizadas.

Dentro de tal planificación no se han considerado las características y propiedades de los suelos y peor aún la temática de licuefacción, con la adición de que la clasificación sísmica de zona es de bajo riesgo, por lo que la evaluación previa o actual de licuefacción en Santa Cruz de la Sierra es inexistente. La falta total de investigaciones sobre la temática de licuefacción llevó al necesario e imprescindible estudio sobre su potencialidad de licuefacción, a consecuencia del extraordinario incremento de la presión de poros, debido a las grandes vibraciones que generarían terremotos debidos a la liberación de energía de la falla Mandeyapeca.

El conocimiento de las características y propiedades de los suelos y su comportamiento frente a las solicitudes vibratorias nos llevará a realizar la zonificación de la ciudad en base esta amenaza geodinámica sísmica secundaria, y a la evaluación y cuantificación de los riesgos, llegando que base a los resultados obtenidos se efectuarán proposiciones de nuevas normativas y las posibles proposiciones de atenuación de daños.

## DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

### Ubicación

La ciudad de Santa Cruz de la Sierra está ubicada al este de Bolivia en el centro de Sudamérica. Su centro histórico se encuentra a 17° 47' de latitud sur y 63° 10' de longitud oeste, con una altitud promedio de 420 msnm está desarrollada en una llanura de gran extensión con poca pendiente. Debido a la alta productividad de su entorno, la ciudad tiene un impresionante crecimiento en extensión física, poblacional y económica. En 1959 tenía una población de 60.645 habitantes y en la actualidad la ciudad ocupa una superficie de 35.000 hectáreas y tiene una población cercana a los tres millones de habitantes (Figura 1).

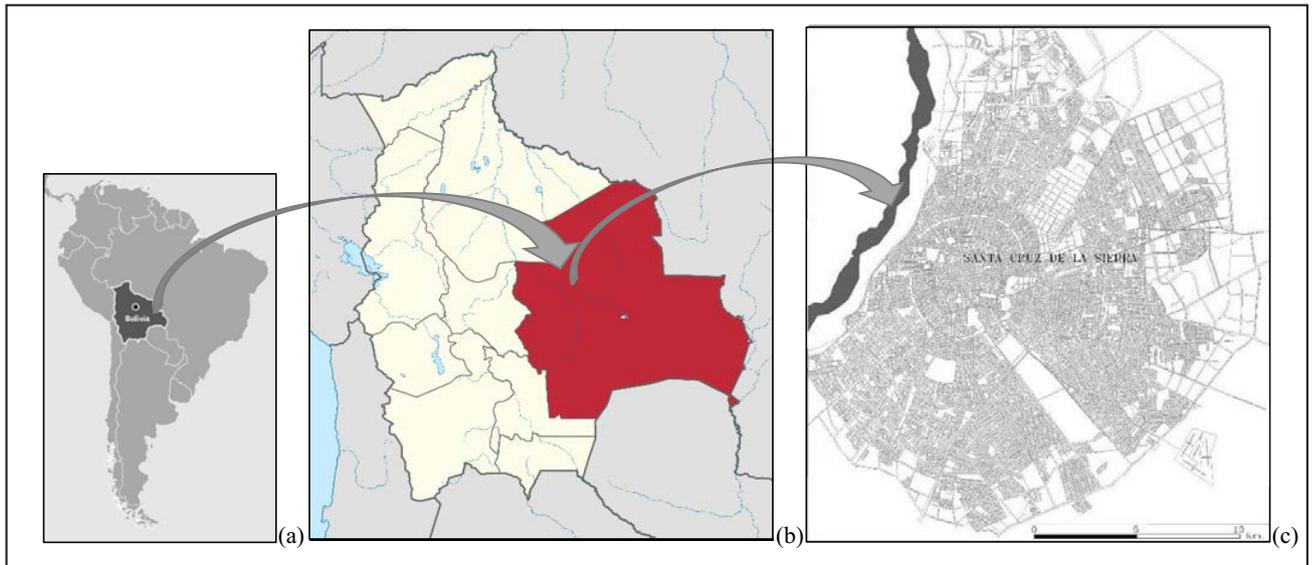


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

### GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

La ciudad se edificó en la región morfológica denominada llanura Chaco Beniense. Está asentada sobre una cubierta cuaternaria depositada sobre capas terciarias que se acumularon en secuencias sedimentarias semi planas, en una cuenca geológica continental ubicada entre los Andes y el escudo brasileño.

La cuenca fue rellenada por acciones sedimentarias del mega-abanico del río Grande y un gran abanico del río Pirai; ríos que provenientes del oeste arrastrando materiales de las zonas montañosas del subandino.

En la región urbana los suelos provienen de los depósitos de los abanicos, depósitos aluviales de los ríos Pirai y Peroveles, palustres de paleolagunas formadas por rebalse, sedimentación y evaporación de finos arrastrados por el río Grande; depósitos eólicos en dos etapas del "mar de arena" del Paleozoico y depósitos eólicos como dunas de arena del holoceno.

Se elaboró un mapa de zonificación (Figura 2) que muestra la existencia de siete zonas geológico-geotécnicas principales, determinadas en función de su geomorfología, tipo de depósitos superficiales, el perfil geotécnico de sondeos efectuados y las características geológicas geotécnicas de los suelos encontrados.

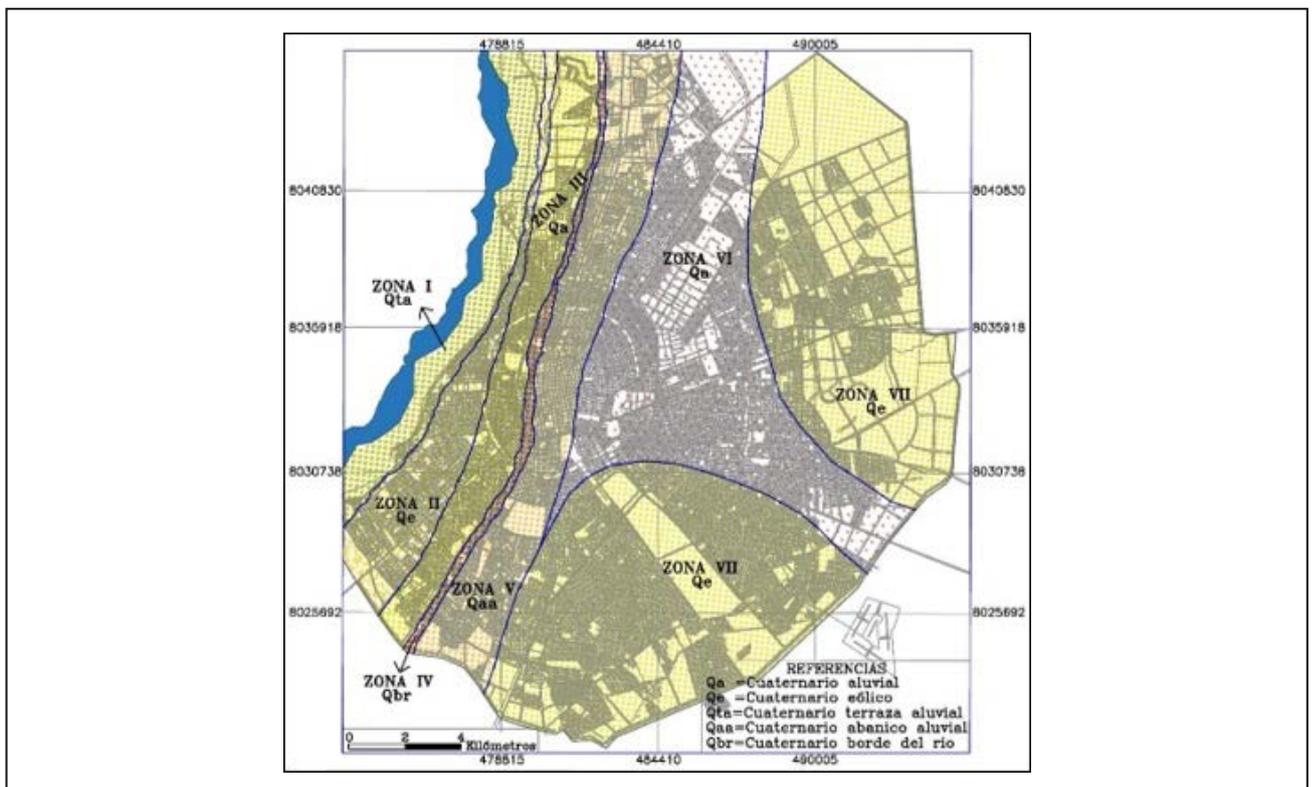


Figura 2. Mapa de Zonificación de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Fuente: elaboración propia.

Los límites entre zonas no están totalmente definidos por la falta de mayores datos. Las características generales de las zonas son las siguientes:

La zona I (Qta) (Qta= Cuaternario terraza aluvial) corresponde a las terrazas del río Piraí, caracterizadas por arenas limosas SM y limos arenosos ML en los primeros metros y de tipo SM-SP, SP en las capas más profundas. La profundidad de nivel freático oscila entre 1 y 3 metros. Posibilidad de licuefacción alta.

La zona II (Qe) (Qe= Cuaternario eólico) está constituida por una secuencia de dunas de elevación suave con desniveles entre pie y cresta de hasta 3 m, que son notorias en calles y avenidas. Las arenas limosas finas de coloración marrón claro rojizo finas mal graduadas características de suelos loessicos. La profundidad del nivel freático está relacionada con la morfología de las dunas, cresta o pie. En general se encuentra a 6 m de profundidad.

La zona III (Qa) (Qa= Cuaternario aluvial) es una terraza aluvial formada por un antiguo río llamado Perovelez, que en la actualidad corre con muy poco caudal en canales de drenaje construidos en la ciudad. Esta área está caracterizada por arenas SM saturadas y con nivel freático entre 2 y 3 m de profundidad.

La zona IV (Qbr) (Qbr= Cuaternario borde del río) se caracteriza por una fuerte pendiente en corto espacio, formando el mayor desnivel de la ciudad, construido por erosión de la terraza chacobeniana formada por los abanicos aluviales, por los ríos Piraí y Perovelez. Tratándose de una zona de depósitos de erosión de terraza y de borde de río, los suelos son heterogéneos con presencia de arenas limosas (SM), limos arcillosos (CL-ML), delgados lentes de arcilla limosa (CL). La profundidad del nivel freático es variable en función de la cota del talud.

La zona V (Qaa) (Qaa= Cuaternario abanico aluvial) es la más alta de la ciudad (Desnivel con la zona III 10 m) y la geológicamente más antigua. Está formada por los mega abanicos que rellenaron la cuenca estratigráfica la llanura chacobeniana. Tiene materiales arenosos de tipo (SM), limos (ML) y en profundidad se encuentran arenas limpias y de tipo (SM-SP) a los 8 metros se encuentran gravas finas bien graduadas El NF está en promedio a los 9 metros.

La VI (Qa) zona, está ubicada en el sector este de la ciudad, caracterizada por depósitos de paleolagunas con suelos cohesivos (CL), y (CL-ML), que se extienden a profundidad variable. Los depósitos producto de sedimentación de derrames del río Grande están compuestos por limos, arcillas y limos arcillosos (limo cuarzoso e illita subordinada) En esta zona se ubicaron antiguas "tejerías" y modernamente industrias cerámicas. La distribución es caótica en función de las antiguas depresiones de evaporación y sedimentación de los coloides.

La zona VII (Qe) está caracterizada por depósitos eólicos holocenos, en los que son notorias dunas de altura y extensión variable distribuidas caóticamente sobre suelos preponderantemente limosos y arenosos. Los materiales superficiales formadores de dunas son de tipo loésico. Los suelos inferiores desde 3 metros hasta el final las exploraciones (20 m) son limos arenosos y arenas (SM) y arenas limpias (SM-SP) y (SP). El nivel freático es detectado entre 4 y 5 metros de profundidad.

En muchas zonas de la ciudad pueden apreciarse dunas de arena sueltas sin continuidad y que en algunos casos alcanzan hasta 10 metros de altura, las que por su destaque panorámico han sido aprovechadas por clubes de tenis, hoteles y pistas de motocross.

El río Piraí, ubicado al oeste, divide a la ciudad de Santa Cruz de la Sierra con el municipio de Porongo, donde se ha desarrollado desde hace pocos años una nueva y gran urbanización denominada Urubó, que en realidad es un nuevo barrio de la ciudad sin que pertenezca políticamente a ella. La geomorfología del área del Urubó, muy diferente a la de Santa Cruz de la Sierra, está caracterizada por colinas y depresiones de poca magnitud, con muchos cursos de agua estacionales; con suelos lateríticos y depósitos eólicos de magnitud. Este trabajo no contempla esta zona por no contar con ensayos suficientes y por no ser políticamente integrante de la ciudad.

## OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es elaborar mapas de susceptibilidad a la licuefacción de los suelos de Santa Cruz de la Sierra, empleando el método simplificado para determinar los valores del Factor de seguridad de licuefacción  $FS_{LIQ}$  y el Índice Potencial de Licuefacción LPI (Liquid Potential Index) considerando sismos de  $M_w = 7,7$  y  $M_w = 8,5$  (determinados en los trabajos de Brooks) y  $M_w = 6,0$  generados por sismos corticales ocurridos en Bolivia. Ante la falta de datos experimentales se adoptaron valores de aceleraciones  $a_{max} = 0,15; 0,2; 0,3; 0,4;$  y  $0,5g$  ( $g = galileo$ ).

También han servido de base para el trabajo las propiedades y parámetros de los suelos, determinados por SPT, perfiles geotécnicos y ensayos de laboratorio de 172 puntos de muestreo distribuidos en el área citadina.

La probabilidad de las  $M_w$  adoptadas fue determinada en los trabajos de Brooks, quedando determinar la probabilidad de ocurrencia de la combinación de  $M_w$  vs.  $a_{max}$ , las que determinarían la aplicabilidad de normativas de sitio.

## MARCO TEÓRICO

Después de los terremotos ocurridos en 1964 en Alaska, Estados Unidos y Niigata, Japón, que causaron desastres por licuefacción de suelos, se desarrolló y publicó el denominado "Método simplificado" (Seed y Idriss, 1971) convirtiéndose en una práctica común para evaluar la resistencia a la licuefacción de los suelos. Al transcurso de los años, el método se ha modificado y mejorado constantemente con documentos históricos (Seed, 1979; Seed y Idriss, 1982; Seed, 1985; Boulanger y Idriss 2008, 2012, 2014).

El método simplificado y sus actualizaciones determina los factores de seguridad contra la licuefacción  $FS_{LIQ}$ , (Seed y Idriss, antes citado) basado en dos términos de evaluación de: la demanda sísmica sobre las capas de suelos expresadas en términos de Relación Cíclica de Tensiones CSR y la capacidad del suelo de resistir la licuefacción expresado como Relación de Resistencia Cíclica CRR.

El método simplificado se basa en el desarrollo empírico, en la colección de datos de los suelos observaciones de campo y laboratorio y en la demanda sísmica de la zona. Para la práctica de rutina de investigación de la licuefacción en sitio se emplean ensayos de campo que incluyen al SPT, CPT (CPT= Ensayo de Penetración de Cono), velocidad de ondas de corte y ensayo BPT (BPT=Becker penetration test).

El  $FS_{LIQ}$  muestra el potencial de licuefacción y no la severidad de esta, por lo que Iwasaki et al (1978) propusieron el LPI. Este proporciona una integración del potencial de licuefacción a lo largo de la profundidad de un perfil de suelo y predice el rendimiento de toda la columna del suelo y con

dependencia de la magnitud de la aceleración horizontal máxima del terreno (Luna & Frost, 1998).

### Determinación de los factores de seguridad contra la licuefacción $FS_{L10}$

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron, como base, ensayos de SPT y el Método Simplificado (Boulanger y Idriss, 2014).

### Relación cíclica de tensiones inducido por terremoto (CSR)

La razón de esfuerzo cíclico inducido por terremoto (CSR) a una profundidad  $z$  según el Procedimiento Simplificado de Seed y Idriss, (1971) se expresa como:

$$CSR_{(M,\sigma'v)} = 0,65 * \frac{amax}{g} * \frac{\sigma'v}{\sigma'_v} * r_d \quad (1)$$

Donde:  $\sigma'v$  = tensión total vertical en la profundidad  $z$ ;  $\sigma'_v$  = tensión vertical efectiva en la profundidad  $z$ ;  $amax/g$  = aceleración horizontal pico (como una fracción de la aceleración de la gravedad) en la superficie del suelo;  $r_d$  = factor de reducción del esfuerzo cortante que explica la respuesta dinámica del perfil del suelo.

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) * M] \quad (2)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (4)$$

Donde:  $z$  = profundidad debajo de la superficie y  $M$  = Magnitud del momento del sismo.

Ante la inexistencia de una base de datos de Santa Cruz de La Sierra sobre la respuesta dinámica de los suelos  $amax$ , para este trabajo han sido asumidos valores de  $amax=0,15, 0,2; 0,3; 0,4$  y  $0,5$  g.

### Corrección del número de golpes del SPT (NSPT)

Por la variabilidad e incertidumbre de ensayos de SPT, los valores de NSPT para evaluación de licuefacción son corregidos por una serie de factores según:

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \quad (5)$$

Donde:  $N_m$  es el número medido golpes del SPT;  $(N_1)_{60}$  es  $N_m$  SPT corregido por porcentaje de energía que recibe el suelo con relación a la energía total ejercida por el martinete;

$C_N$  = Factor de corrección por sobrecarga

$C_E$  = Factor de corrección de energía del martillo,  $C_E$

$$C_E = ER_m / 60 \quad (6)$$

Donde:  $ER_m$  = Razón de energía medida como porcentaje del máximo teórico

Factor de corrección por longitud de barra,  $C_R$

$$C_R = 1 - 0,36e^{(-0,085 * L)} \quad (7)$$

Donde:  $L$  = Longitud de barra total, desde el punto de impacto del martillo hasta la base del muestreador.

Factor de corrección por diámetro de la perforación,  $C_B$  Factor de corrección por diámetro del pozo de perforación

Diámetro de 65 - 115 mm.  $C_B = 1.00$

Diámetro de 115 mm.  $C_B = 1.05$

Diámetro de 200 mm.  $C_B = 1.15$

(Skempton, 1986)

Factor de corrección para el uso de cucharas bipartida con o sin alineador,  $C_S$

Para muestreador sin alineador  $C_S=1$

Corrección por presión de confinamiento ( $C_N$ )

Idriss y Boulanger (2003,2008) recomendaron que  $C_N$  pudiera expresarse en términos de  $(N_1)_{60cs}$  de la siguiente manera:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \quad (8)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (9)$$

Donde:  $P_a$ =Presión atmosférica;  $(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60}$  corregido por contenido de finos;  $(N_1)_{60cs}$  limitados a valores  $\leq 46$ .

El uso de la ecuación requiere una iteración que se logra utilizando la opción de iteración automática en una hoja de cálculo de Excel.

Corrección por contenido de finos

Las ecuaciones para determinar CRR, están basadas en arenas limpias, por lo que no siendo así se debe corregir  $(N_1)_{60}$  por contenido de finos (FC) según la siguiente ecuación.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (10)$$

Los ajustes a  $\square (N_1)_{60} = f(FC)$  se derivan para que el CRR pueda expresarse únicamente en términos de  $(N_1)_{60cs}$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01}\right)^2\right) \quad (11)$$

### Relación de resistencia cíclica

La razón de máxima resistencia cíclica (CRR) representa la máxima razón de esfuerzo cíclico (CSR) a la cual un suelo puede resistir licuación.

$$CRR_{(M,\sigma'v)} = CRR_{(M=7.5,\sigma'v=1)} * MSF * K_\sigma \quad (12)$$

Donde:  $CRR_{(M=7.5, \sigma'v=1)}$  = CRR normalizada a una magnitud  $M=7.5$   $\sigma'v=1$  atm;  $CRR_{M \sigma'v}$  = CRR corregida para magnitud  $M$  y esfuerzo efectivo  $\sigma'v$ .

$$CRR_{(M=7.5, \sigma'v=1atm)} = \exp \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (13)$$

Factor de corrección de sobrecarga ( $K_\sigma$ )

La relación  $K_\sigma$  utilizada fue desarrollada por *Boulanger (2003)* y modificada por *Boulanger y Idriss (2008)* que recomienda que la relación  $K_\sigma$  resultante se exprese en términos de los valores de  $(N_1)_{60cs}$  como sigue:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left( \frac{\sigma'v}{P_a} \right) \leq 1.0.3 \quad (14)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (15)$$

El coeficiente  $C_\sigma$  puede limitarse a su valor máximo de 0.3 al restringir  $(N_1)_{60cs} \leq 37$

Factor de escala de magnitud, MSF

El factor de escala de magnitud MSF (Magnitude Scaling Factor) es utilizado para contabilizar los efectos de duración (es decir, el número y amplitud relativa de los ciclos de carga) en el desencadenamiento de la licuefacción.

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left( 8.64 \exp \left( \frac{-M}{4} \right) - 1.325 \right) \quad (16)$$

Donde: MSF max Factor de Escala de Magnitud Máximo

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2 \quad (17)$$

### Factor de Seguridad a la Licuación ( $FS_{LIQ}$ )

*Seed & Idriss (1971)* propusieron un procedimiento simplificado para evaluar la resistencia a la licuación de los suelos en términos de factores de seguridad ( $FS_{LIQ}$ ) relacionando la razón de resistencia cíclica (CRR) con la razón de esfuerzo cíclico (CSR).

La determinación de CRR y CSR sufrió las adecuaciones que se describieron en los puntos específicos llegando a:

$$FS_{LIQ} = \frac{CRR_{\sigma'v}}{CSR_{\sigma'v}} \quad (18)$$

Una capa de suelo con  $FS_{LIQ} < 1$  generalmente se clasifica como licuable y con  $FS_{LIQ} > 1$  se clasifica como no licuable (*Seed e Idriss, 1971*).

### Determinación del índice potencial de licuefacción (LPI)

La expresión propuesta por *Iwasaki et al (1978)* es la siguiente:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) * w(z) dz \quad (19)$$

Donde: LPI: Índice de potencial de licuación; z: Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo; F(z): Factor de severidad calculado por

$$F(z) = 1 - FS_{LIQ} \text{ para } FS_{LIQ} < 1 \quad (20)$$

$$F(z) = 0 \text{ para } FS_{LIQ} \geq 1 \quad (21)$$

w(z): Factor de ponderación calculado por

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ para } z \leq 20 \text{ m.} \quad (22)$$

$$w(z) = 0 \text{ para } z > 20 \text{ m.} \quad (23)$$

dz: Incremento diferencial de la profundidad

Para la interpretación del significado de los valores de LPI hemos adoptado la clasificación de categorías de *Luna & Frost, (1998)* que adaptaron la clasificación de *Iwasaki, et al. (1982)*, el que compilando información de 6 terremotos históricos en Japón propuso 4 categorías. Ambas clasificaciones están contenidas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Categorías potencial de licuefacción basadas en valor LPI.**

**Fuente: Categoría potencial de licuefacción (Iwasaki et al., 1982) y (Luna & Frost, 1998)**

LPI	Categoría potencial licuefacción (Iwasaki et al., 1982)	Categoría potencial licuefacción (Luna and Frost, 1998)
0	Muy bajo	Bajo a nulo
$0 < LPI \leq 5$	Bajo	Bajo
$5 < LPI \leq 15$	Alto	Moderado
$LPI > 15$	Muy alto	Alto

### DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTUDIO

Para la evaluación de la licuefacción potencial de Santa Cruz de la sierra se utilizó la zonificación geológica y geotécnica de la ciudad, los datos recolectados en 172 ensayos de SPT distribuidos en distintas zonas urbanas y la nueva condición sísmica alertada por los trabajos de (*Brooks et al., 2011*) y (*Weiss et al., 2016*).

### Ensayos de Standard Penetration Test (SPT)

Los ensayos utilizados se ejecutaron bajo la norma ASTM D1586 en 172 sitios (Figura 3), en los que se determinó su

posición en coordenadas UTM, se midió la cota del terreno registrándose el diámetro del pozo y demás características.

De todos y cada uno de los sondeos ejecutados, han sido confeccionadas tablas que contienen la numeración correlativa,

el nombre del sitio de sondeo, su ubicación en CUTM, la cota, la profundidad, descripción y clasificación unificada de los suelos, las capas de suelo, el valor de N y de la densidad.

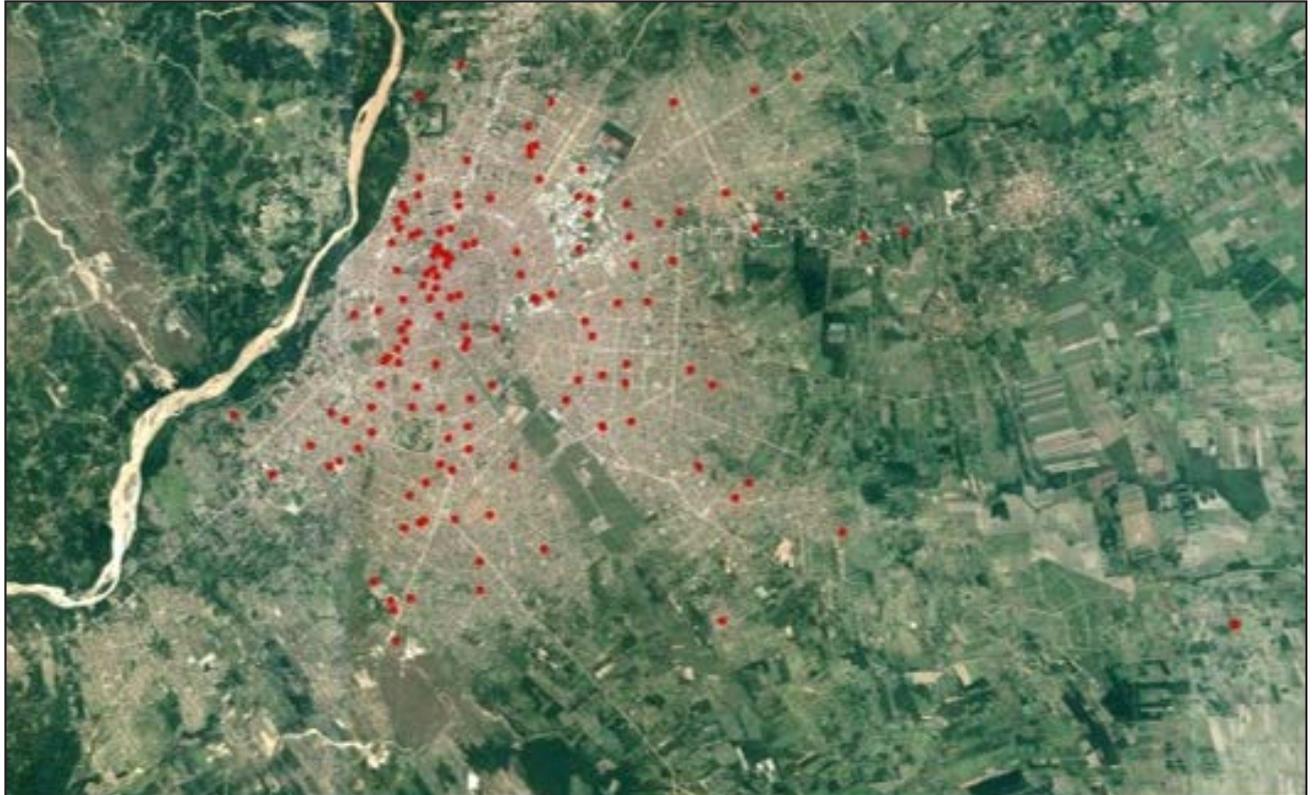


Figura 3. Ubicación de sitios de sondeo.

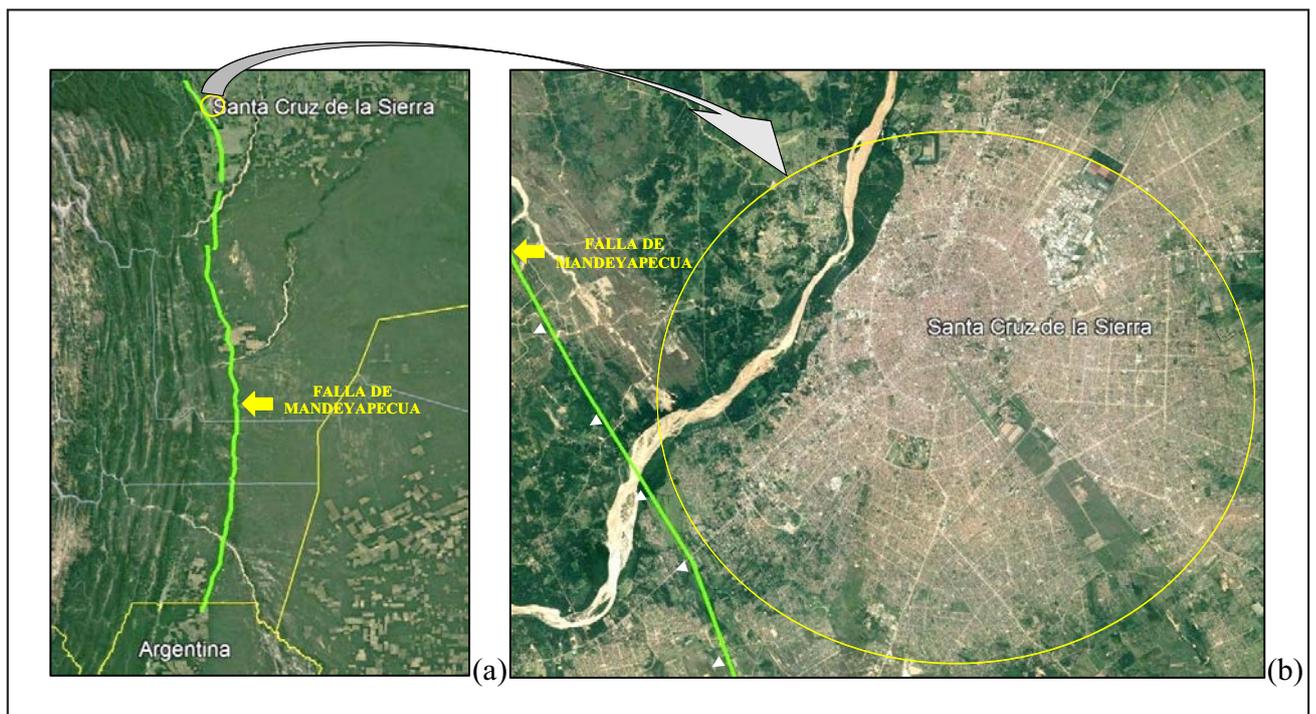


Figura 4. Falla de Mandeyapeca.

### Nueva Condición Sismo tectónica del Área de Estudio

Santa Cruz de la Sierra está catalogada con muy bajo riesgo sísmico con  $Ao/g=0,06$  (*Norma Sísmica Boliviana en vigencia NBDS, 2006*).

Una nueva condición sísmica de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra está directamente relacionada con los trabajos de *Brook et al (2011)*, sobre la falla inversa denominada Mandeyapecua.

La falla, mostrada en la Figura 4, está ubicada en el borde del sub-andino boliviano, que con una longitud de 486 km se extiende desde las proximidades de la localidad de Yacuiba, cercana a la frontera Bolivia-Argentina, con rumbo generalizado N, concluyendo a aproximadamente a 30 km al NW de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Fue mapeada por geólogos a principios del siglo XX y se encuentra definida en el Mapa Geológico de Bolivia. Se relaciona a esta falla con los sismos de magnitud 6,4 ocurridos en 1887 y 1899, que destruyeron la localidad de Yacuiba.

La notoriedad reciente de la mencionada falla se debe a que se publicó "*Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc*" (*Brooks et al.2011*)

en *Nature Geosciences*, estudio éste en el que utilizando controles satelitales con GPS se realizó la medición del desplazamiento de las placas tectónicas de Nazca y Continental sudamericana y se efectuaron trabajos de campo para observaciones y mediciones de la Neo tectónica.

La técnica de medición con GPS del desplazamiento entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, les permitió descubrir que una sección poco profunda entre 85 a 100 kilómetros de longitud de la falla Mandeyapecua, está "encajada" con muy bajo movimiento respecto a la generalidad, lo que ocasiona tensión y acumulación de energía, la que al ser liberada determina la probabilidad de ocurrencia de terremotos de gran magnitud de hasta  $Mw=8,5$ .

La Figura 5, elaborada en base a *Brooks et al. (2011)*, muestra la geografía del subandino boliviano, la falla de Mandeyapecua, la posición de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y zonas con diferentes velocidades de movimiento de las placas medidas con GPS. Se destaca claramente la muy baja velocidad en el sector atrapado.

En la Tabla 2, elaborada desde *Brooks et al (2011)*, se presenta el resumen de localidades cercanas, la magnitud probable de sismo y su tiempo de recarga. Se destaca Santa Cruz de la Sierra con  $Mw=8,5$  en 1.326 años.

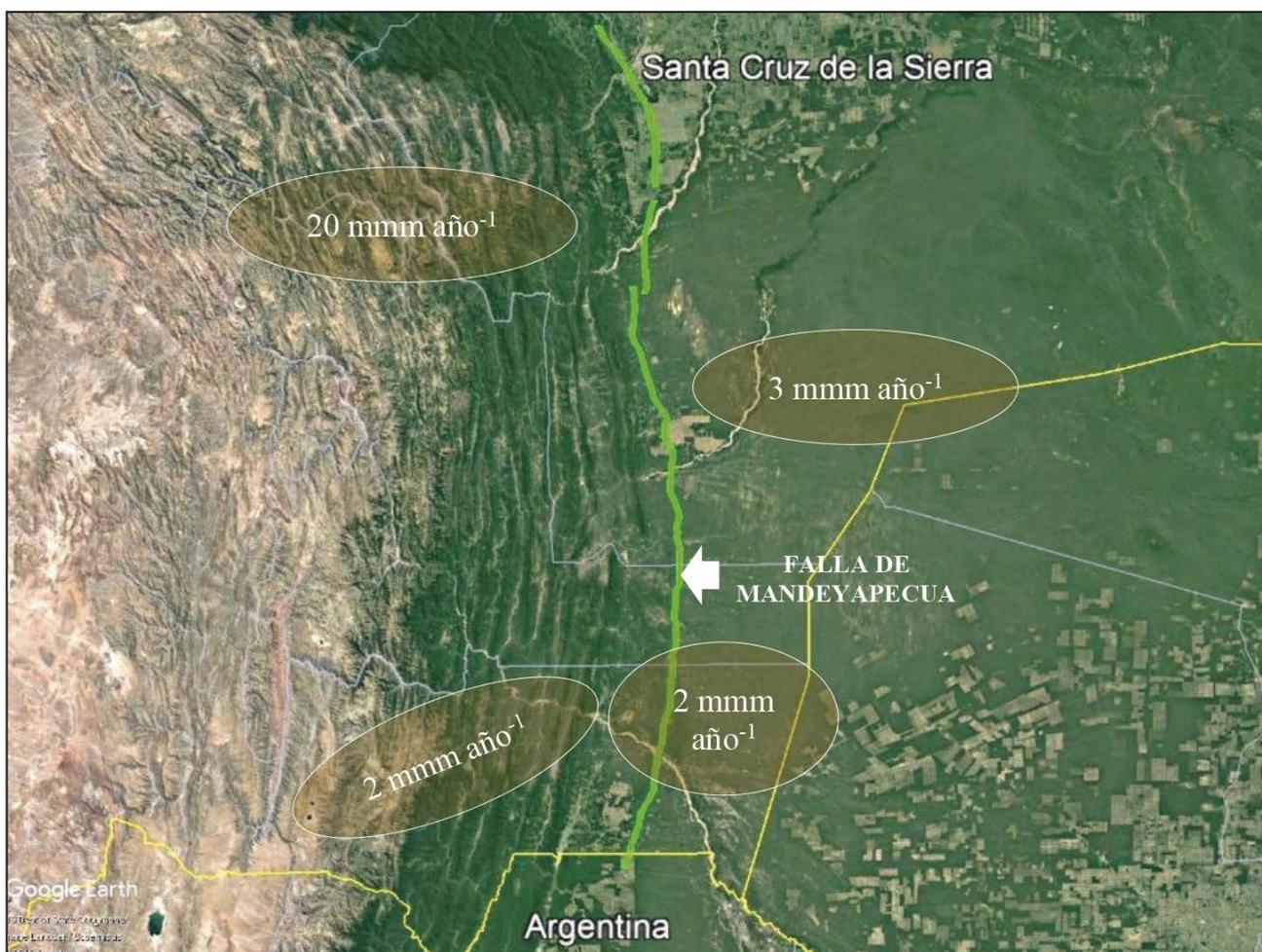


Figura 5. Velocidades de movimiento de placas tectónicas.

**Tabla 2. Alivio de la Falla de Mandeyapeca.**  
**Fuente: Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc. (Brooks et al., 2011).**

Localidad	Ubicación	Mw	Tiempo (años)
Santa Cruz de la Sierra	17.7°S 63.2°W	8,5	1,326
	17.7°S 63.2°W	7,7	331
Charagua	19.9°S 63.2°W	8,5	1,326
	19.9°S 63.2°W	7,7	331
Villamontes	21.3°S 63.5°W	8,6	1,380
	21.3°S 63.5°W	7,9	388
Ibibobo	21.5°S 63°W	8,5	1,253
	21.5°S 63°W	7,7	313
Yacuiba	22°S 63.4°W	8,3	970
	22°S 63.4°W	7,5	242

Se ha continuado con los trabajos iniciados por *Brooks y otros (2011)* y es así que muchos investigadores del USGS han realizado estudios, y a nivel regional son destacables los trabajos de *Yagupsky* sobre *Modelación en el Área del Subandino*, de *Rafael Toruál* sobre *La Neo Tectónica de Mendoza y Subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana*, y los de *Ryan Anderson et al. (2017)* sobre *La Arquitectura de Los Andes en Perfil del 21° S*. Merece especial mención el trabajo de *Weiss et al (2016)* "Isolating active orogenic wedge deformation in the southern Subandes of Bolivia *journal of geophysical research:solid earth*", en el que muestra testigos en tierra, que fueron colocados para los estudios de GPS satelitales en secciones transversales medibles.

En los últimos años se han producido sismos de magnitud variable en poblaciones ubicadas en la trayectoria de la falla, en la Tabla 3 se muestran sismos de Mw > 4 desde el 2015 hasta 2018.

**Tabla 3. Sismos Mw>4 producidos en la trayectoria de la falla Mandeyapeca.**  
**Fuente: United States Geological Survey (USGS).**

Fecha	Ubicación	Magnitud	Profundidad
03/05/2018	Carandaity	4,2	579
02/04/2018	Carandaity	4,5	560
02/04/2018	Boyuiibe	4,6	567
02/04/2018	Carandaity	5,0	570
02/04/2018	Carandaity	6,8	559
14/01/2016	Charagua	4,5	582
29/05/2016	Boyuiibe	4,3	565
14/01/2016	Charagua	6,1	582
12/01/2016	Carandaity	4,5	566
21/12/2015	Jorochito	4,9	36

## RESULTADOS OBTENIDOS

Se llevaron a cabo los cálculos pertinentes confeccionando 1.892 hojas de cálculo en Microsoft Office Excel, 11 tablas de cada uno de los 172 sitios, siguiendo el método simplificado de *Seed y Idriss (1971)*, *Boulanger e Idriss (2014)* y el método de *Iwasaki et al (1978, 1982)* determinando CRR, CSR y  $FS_{LIQ}$  y LPI, para sismos de Mw=6, Mw 7,5 y Mw=8,5 y valores de amax de 0,15g; 0,2g; 0,3g; 0,4g y 0,5g,

En la Tabla 4 se presenta el de resumen de resultados obtenidos para un punto típico (Sitio) de sondeo. Se elaboraron planillas de estas características para los 172 puntos.

Resúmenes de valores porcentuales  $FS_{LIQ} < 1$  (Suelos licuables) presentados en la tabla 5.

**Tabla 5. Valores porcentuales de  $FS_{LIQ}$ .**  
**Fuente: Resultados de investigación F. Sadud**

Mw	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
6	2%	20%	56%	67%	74%
7,5	10%	45%	69%	85%	89%
8,5	1%	40%	82%	91%	95%

En la tabla 6 se presentan los valores de LPI para diferentes Mw y amax.

**Tabla 6. Resumen de porcentaje de LPI con relación de Mw y amax.**  
**Fuente: Resultados de investigación F. Sadud**

Mw	amax	Bajo a nulo	Bajo	Moderado	Alto
6	0,15	81%	8%	1%	0%
	0,20	32%	46%	19%	3%
	0,30	3%	12%	33%	52%
	0,40	1%	3%	13%	83%
7,5	0,50	1%	0%	5%	94%
	0,15	60%	30%	9%	1%
	0,20	9%	33%	40%	18%
	0,30	1%	3%	15%	81%
8,5	0,40	1%	1%	3%	95%
	0,50	0%	1%	1%	98%
	0,15	54%	35%	10%	1%
	0,20	7%	34%	39%	20%
0,30	1%	1%	14%	84%	
	0,40	0%	1%	3%	96%
	0,50	0%	1%	2%	97%

Representación gráfica de resultados de CSR-CRR,  $FS_{LIQ}$  y LPI.

En la Figura 6 se representan los sondeos mostrando profundidad NF, clasificación de suelos USCS,  $(N_1)_{60}$ , la relación CRR- CSR y los valores de  $FS_{LIQ}$  y LPI con el propósito de comparar objetivamente el comportamiento de los suelos presentes en sitio.

**Tabla 4. Resumen de resultados. Sondeo A1, Mw 7.5 y amax 0,20 g.**  
**Fuente: Resultado de investigación F. Sadud**

PUNTO:	A-1	USCS	rd	(N1)60cs	CSR7,5	CRR7,5	FS7,5	CAPA N° DE A:	PROF. (m)	N promedio	amax (m/s <sup>2</sup> ):		F	H (m)	Z (m)	W	LPI
											por capa	0,20g					
0,00	-	-	-	-	-	-	-	1	0,00	11	1,27	0,00	0,00	2,50	1,25	9,38	0,00
1,00	11	SC	1,00	17,09	0,13	0,17	1,32		1,00								
2,00	12	SC	0,99	15,44	0,13	0,16	1,22	2	2,00	13	0,00	1,00	1,00	2,00	2,00	9,00	18,00
3,00	14	SM	0,98	15,42	0,13	0,16	1,23		3,00								
4,00	18	SM	0,97	16,57	0,13	0,17	1,32	3	4,00	20	0,00	1,00	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00
5,00	22	SM	0,96	19,08	0,13	0,20	1,53		5,00								
6,00	26	SM	0,95	20,30	0,13	0,21	1,67	4	6,00	26	0,00	1,00	1,00	1,00	5,50	7,25	7,25
7,00	14	SM-SP	0,94	9,01	0,12	0,11	0,90	5	7,00	16	1,09	0,00	0,00	1,00	7,00	6,50	0,00
8,00	12	SP	0,92	6,09	0,13	0,09	0,70		8,00								
9,00	14	SM-SP	0,91	8,93	0,14	0,11	0,80		9,00								
10,00	16	SM	0,90	13,63	0,14	0,14	1,01		10,00								
11,00	18	SM	0,88	14,46	0,15	0,15	1,02		11,00								
12,00	24	SM	0,87	17,35	0,15	0,18	1,16		12,00								
13,00	11	CL	0,85	10,79	0,15	0,12	0,80		13,00								
14,00	26	SM-SP	0,84	13,77	0,16	0,15	0,93	6	14,00	26	1,06	0,00	0,00	0,70	14,15	2,93	0,00
15,00	34	SM	0,82	21,56	0,16	0,23	1,43	7	15,00	24	1,06	0,00	0,00	1,20	15,10	2,45	0,00
16,00	14	CL	0,81	11,78	0,16	0,13	0,83		16,00								
17,00	22	SM	0,79	15,08	0,16	0,16	0,99	8	17,00	22	0,00	1,00	1,00	1,30	1,10	9,45	12,29
18,00	12	CL	0,78	10,62	0,16	0,12	0,77	9	18,00	12	1,13	0,00	0,00	1,70	17,85	1,08	0,00
19,00	38	SM	0,76	22,23	0,16	0,24	1,49	10	19,00	36	1,10	0,00	0,00	1,30	19,35	0,32	0,00
20,00	34	SM-SP	0,75	15,89	0,16	0,16	1,03		20,00								

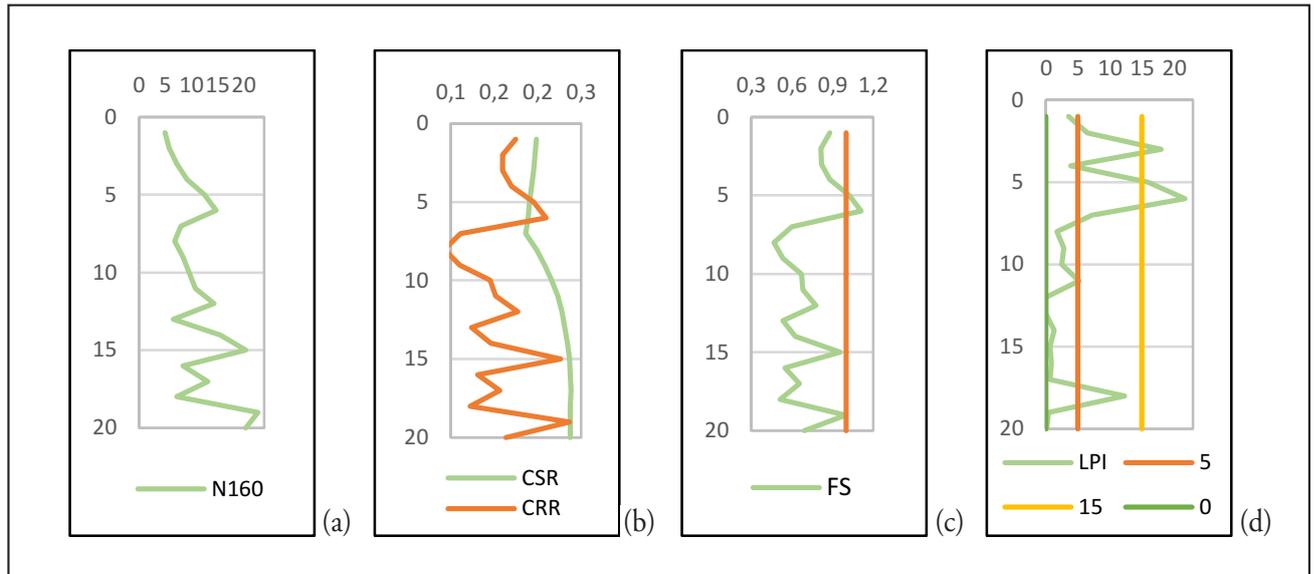


Figura 6. Sondeo A1 Graficación de la relación (N1)60- CRR-CSR, FSLIQ y LPI.

**MAPAS DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA**

Se elaboraron 15 mapas de potencial de licuefacción de Santa Cruz de la Sierra-Bolivia, empleando el software ArcGis 10.2, resultantes de las combinaciones de  $M_w=6, 7,5$  y  $8,5$  con  $a_{max}=0,15; 0,2; 0,3; 0,4$  y  $0,5g$ . Se presenta como mapa típico

en la Figura 7, mostrando la categorización de licuefacción para  $M_w= 7,5$  y  $a_{max} 0,2g$ .

En la Figura 7 se presenta un mapa característico de potencial de licuefacción de suelos en Santa Cruz de la Sierra, obtenido con  $M_w=7,5$  y  $a_{max}=0,2g$ .

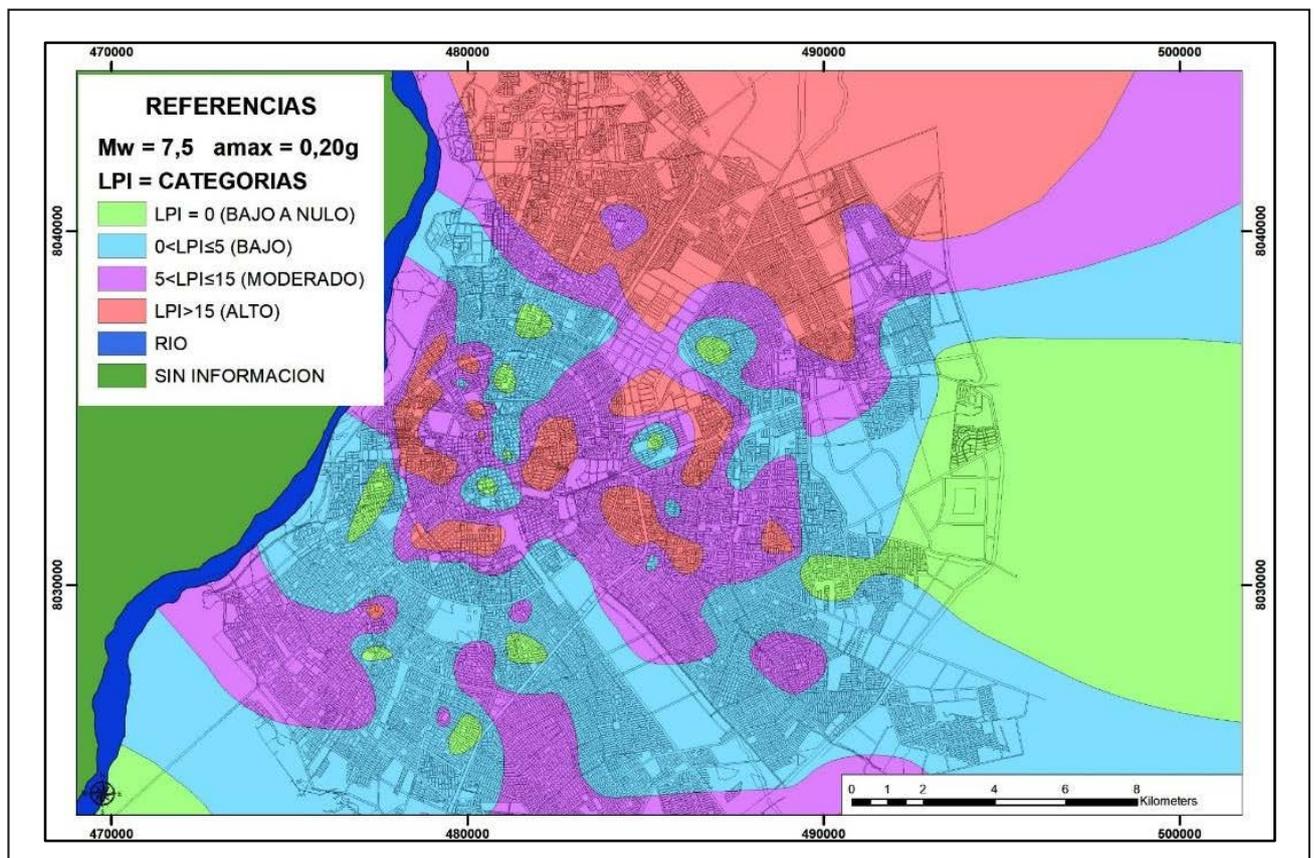


Figura 7. Mapa de Potencialidad de Licuefacción para  $M_w= 7,5$  y  $a_{max}= 0,2$ .

### ESTUDIO ESTADÍSTICO

Se ha realizado el estudio estadístico para cada una de las zonas geológico-geotécnicas en que dividiéramos la ciudad, considerando los sondeos presentes en cada una de ellas y también la evaluación total de los valores obtenidos en todos los puntos de sondeo.

En la Figura 8, se muestra la graficación típica de la frecuencia frente a LPI para  $M_w=6$  y aceleraciones de  $a_{max}=0,15$ ;  $0,2$  y  $0,3g$ .

También se ejecutaron gráficos relacionando los valores porcentuales de LPI frente a  $M_w$  y diferentes  $a_{max}$ . Del gráfico como el de la Figura 9 (Típica) se extrae la dependencia directa de la licuefacción respecto a las aceleraciones.

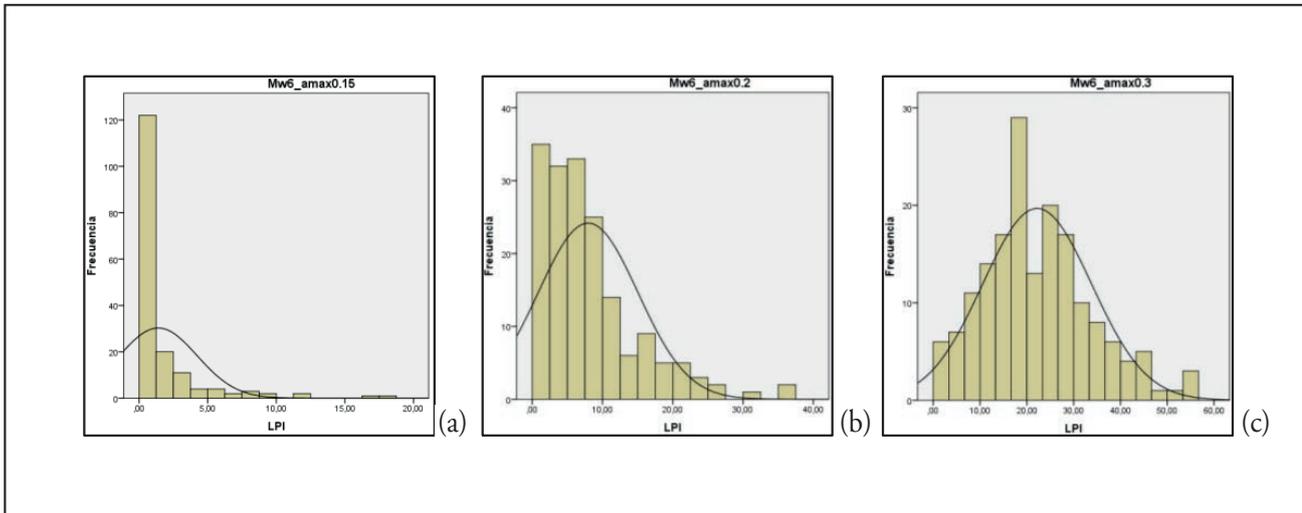


Figura 8. Gráfico de frecuencia de LPI con  $M_w=6$ .

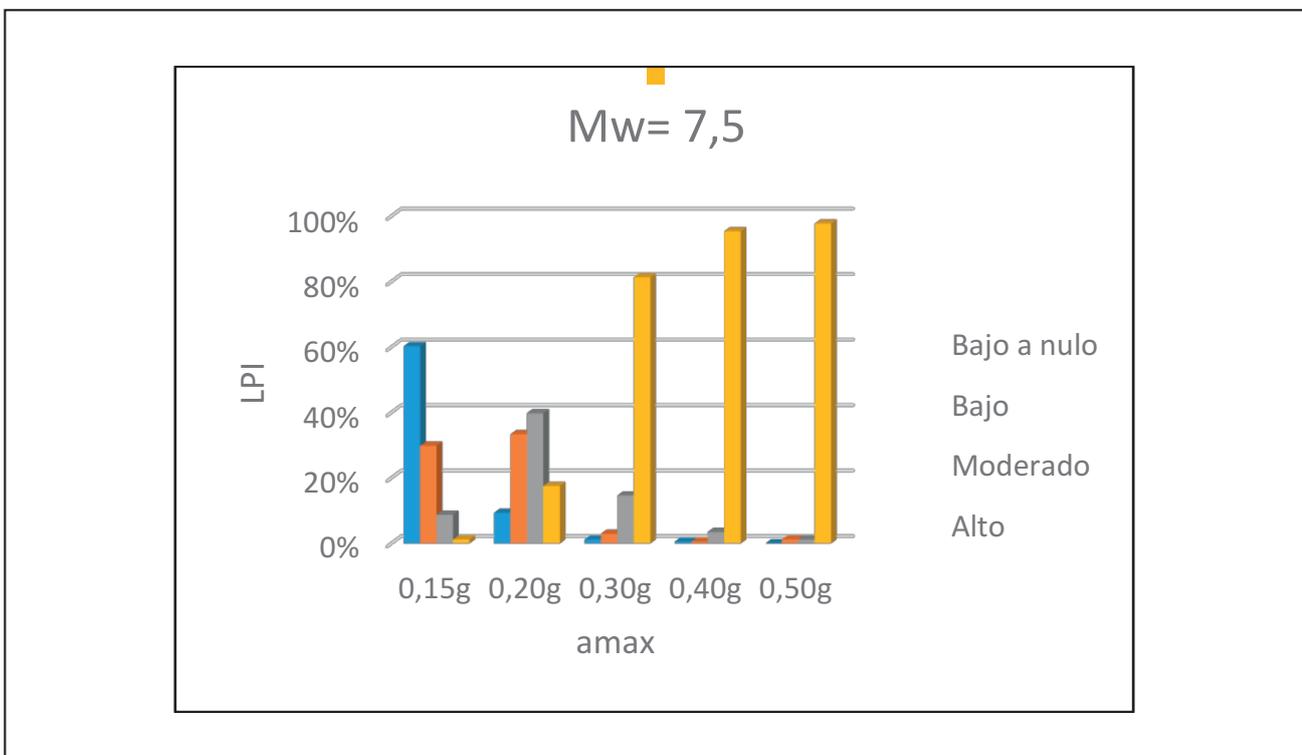


Figura 9. Gráfico de relación de LPI y  $a_{max}$  con  $M_w=7,5$ .

## CONCLUSIONES

Realizados los trabajos correspondientes para la determinación de factores de seguridad a la licuefacción empleando el método simplificado con el empleo de SPT y la determinación del índice de licuefacción potencial para los 172 sitios de muestreo en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, se llegó a lo siguiente:

- Con las mínimas condiciones consideradas  $M_w=6$  y  $a_{max}=0,15$ , se genera la licuefacción de 2% del área de la ciudad.
- Para la máxima condición  $M_w=8,5$  y  $a_{max}=0,5$  g se generaría la licuefacción del 95% del área.
- El Índice de Licuefacción Potencial (LPI) con los mínimos valores estudiados  $M_w=6$  y  $a_{max}=0,15$  el área, presenta un 18% categorizado como BAJO.
- Para todos los  $M_w$  considerados a una aceleración  $a_{max}=0,3$ , más del 50% del área presenta un potencial de licuefacción ALTO.

- El máximo extremo determinado se presenta a  $M_w=7,5$  y  $a_{max}=0,5$  con 98% del área de Santa Cruz de la Sierra presenta un potencial de licuefacción ALTO.

- De acuerdo con los valores obtenidos se determina que los suelos de Santa Cruz de la Sierra son potencialmente licuables.
- Se han elaborado 15 mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial de los suelos de la ciudad en base a los valores de LPI, que muestran la potencialidad de licuefacción en la mancha citadina diferenciando regiones categorizadas como nulo, bajo y alto potencial de licuefacción.
- La aplicación de la zonificación determinada en este trabajo debe ser refrendada con la ejecución del correspondiente estudio de probabilidad de ocurrencia, que sería realizado en base a la combinación de magnitudes de momento sísmico ( $M_w$ ) con relación a las aceleraciones ( $a_{max}$ ) que se consideraron en los cálculos ejecutados.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BROOKS, B. A., BEVIS, M., WHIPPLE, K., ARROWSMITH, J. R., FOSTER, J., ZAPATA, T., KENDRICK, E., MINAYA, E., ECHALAR, A., BLANCO, M., EUILLADES, P., SANDOVAL, M., SMALLEY, R. J., (2011).  
Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc.  
*Journey of Nature Geoscience*. Doi: 10.1038/NGEO1143.
- BOULANGER, R. W., & IDRIS, I. M. (2008).  
Soil liquefaction during earthquakes.  
*Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*. Doi: ISBN#978-1-932884-36-4.
- BOULANGER, R. W., AND IDRIS, I. M. (2012A).  
Probabilistic SPT-based liquefaction triggering.  
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 138(10), 1185-1195*.
- BOULANGER, R. W., & IDRIS, I. M. (2014).  
CPT and SPT based liquefaction triggering procedures.  
*University of California, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA*.
- BOULANGER R. W. (2003A).  
Relating  $K_s$  to relative state parameter index.  
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(8), 770-773*.
- IRIONDO, M. 2008  
El Chaco santafesino. Neógeno y Geomorfología.  
*Comunicación Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 13:1-39. Santa Fe*.
- IWASAKI, T., TOKIDA, K., TATSUKO, F., & YASUDA, S. (1978).  
A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan.  
*En Proceeding of 2nd International Conference on Microzonation (págs. 885-896). San Francisco*.
- IWASAKI, T., TOKIDA, K., TATSUKO, F., WATANABE, S., YASUDA, S., & SATO, H. (1982).  
Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods.  
*En Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation. Seattle: 1319-1330*.
- LUNA, R., & FROST, J. D. (1998).  
Spatial Liquefaction analysis system.  
*Journal of Computing in Civil Engineering, 12(1), 48-56. Doi: 10.1061/(asce)0887-3801(1998)12:1(48)*
- RYAN ANDERSON ET AL. (2017).  
Shortening and Structural architecture of the Andean fold-thrust belt of southern Bolivia (210 s).  
*Implications of kinematic development and crustal thickening of central Andes. Geoscience World*.
- SEED, H. B., & IDRIS, I. M. (1971).  
Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential.  
*Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97, 1249-1273*.

- SEED Y IDRIS, (1982): SEED, H. B., & IDRIS, I. M. (1982).  
Ground motions and Soil Liquefaction during earthquakes.  
*Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute.*
- SEED, H. B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F., & CHUNG, R. M. (1985).  
Influence of SPT procedures in soil Liquefaction resistance evaluations.  
*Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (12), 1425-1445. *Doi:10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:12(1425).*
- YOUNG, T. L. & IDRIS, I. M. (4 DE 2001).  
Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops  
on evaluation of Liquefaction resistance of soils.  
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127 (4), 297-313- *doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297).*
- WEISS, J. R., BROOKS, B. A., FOSTER, J.A., BEVIS, M., ECHALAR, A., CACCAMISA, S., HECK, J., KENDRICK, E., AHLGREN,  
K., RALEIGH, D., SMALLEY, R., VARGANI, G., (2016)  
Isolating active orogenic wedge deformation in the southern Subandes of Bolivia.  
*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. *Doi: 10.1002/2016JB013145.*



# Estimación de curvas IDF para tormentas de larga duración en la cuenca del río Gualeguay en la provincia de Entre Ríos

## Estimation of IDF curves for long-term storms in the Gualeguay river basin in the province of Entre Ríos

Margasín, Andrea ✉ - Bruno, Sabina - Gimenez, Vanesa - Mastaglia, María Inés - Sato, Rodolfo

Recibido: 7 de agosto de 2019 • Aceptado: 28 de enero de 2020

### Resumen

*A partir de la recopilación de datos pluviométricos disponibles en la provincia de Entre Ríos, utilizando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG), en este caso el programa QGIS, y tomando como período de registro de 30 años (1986-2016) se estudiaron valores medios anuales de tormentas de larga duración para la cuenca del río Gualeguay, que drena un área de 21.549 km<sup>2</sup>.*

*Se seleccionaron 54 estaciones representativas, cuyos datos se analizaron, completaron y validaron para la generación de un pluviómetro ficticio representativo de la Precipitación Media Areal (PMA) de la cuenca. Se efectuó un análisis de frecuencia, con el programa AFMULTI, con el que se determinaron intensidades para las series de precipitaciones medias areales máximas anuales (PMAMA) que permitieron estimar los parámetros de las expresiones matemáticas que definen las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF), para los distintos períodos de recurrencias analizados, por medio del programa ARHYMO. Este procedimiento se replicó para 6 subcuencas, estimándose también una familia de curvas IDF para cada una de ellas. Las curvas IDF definidas con esta metodología permiten obtener tormentas de diseño que consideran la distribución espacial de las precipitaciones.*

*La estimación de tormentas de diseño a partir de curvas IDF es una variable fundamental para la determinación de los caudales pico de diseño para proyectos de infraestructura tales como puentes, vías de comunicación, defensas contra inundaciones entre otras obras que afectan grandes extensiones de la provincia. Disponer de IDF de la región, permite diseños más eficientes, ajustados a las condiciones locales.*

**Palabras clave:** intensidad de precipitación, cuencas extensas, precipitación media areal.

### Abstract

*Based on the collection of rainfall data available in the province of Entre Ríos, using a Geographic Information System (GIS) as a tool, in this case the QGIS software, and taking 30 years (1986-2016) as a recording period, annual average values of long-term storms were studied for the Gualeguay river basin, which drains an area of 21.549 km<sup>2</sup>.*

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Paraná (E.R.),  
Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina.  
✉ andreamargasín@gmail.com

54 representative stations were selected, whose data were analyzed, completed and validated for the generation of a fictitious rain gauge representative of the Average Areal Precipitation (PMA) of the basin. A frequency analysis was carried out with AFMULTI software which intensities were determined for the annual maximum average areal precipitation series (PMAMA) that allowed estimating the parameters of the mathematical expressions that define the Intensity Duration Frequency (IDF) curves, for the different recurrence periods analyzed through the ARHYMO software. This procedure was replicated for 6 sub-basins, also estimating a family of IDF curves for each of them. The IDF curves defined with this methodology allow to obtain design storms that consider the spatial distribution of rainfall.

The estimation of design storms from IDF curves is a fundamental variable for the determination of peak design flows for infrastructure projects such as bridges, communication roads, flood defenses among other works that affect large extensions of the province. Having IDF of the region, allows more efficient designs, adjusted to local conditions.

**Keywords:** precipitation intensity, large basins, average areal precipitation.

## INTRODUCCIÓN

El estudio y análisis del comportamiento de las precipitaciones de la región permiten aportar patrones de conducta y la posibilidad de contar con indicadores efectivos y eficientes en el diseño hidrológico, (Pizarro et al., 2003).

El conocimiento de las intensidades extremas de precipitación, su duración y la frecuencia con que se producen es imprescindible para la planificación de obras hidráulicas y viales, la optimización de recursos hidráulicos en cuencas hidrográficas y la prevención de avenidas (Casas Castillo, 2005).

La cuenca del río Gualeguay es la cuenca interior más grande de la provincia de Entre Ríos, y muchas de las localidades dentro de ella sufren inundaciones severas en ocasión de tormentas de importancia.

La provincia cuenta con más de 200 estaciones pluviométricas, donde se efectúan lecturas diarias desde el año 1934. Ante la disponibilidad de registros pluviométricos abundantes en el territorio de la provincia de Entre Ríos y en conocimiento de la necesidad de contar con herramientas para la planificación territorial y el dimensionamiento de obras de infraestructura dentro de la cuenca, se plantea el estudio de tormentas para la cuenca del río Gualeguay que tengan en cuenta la distribución espacial de las mismas.

Para cuencas de pequeña a mediana extensión suele considerarse que la distribución de la lluvia es uniforme, y se utilizan tormentas de diseño en base a registros de una estación puntual. Para cuencas mayores, de más de 100 km<sup>2</sup>, como es el caso de la cuenca del río Gualeguay y sus subcuencas, la suposición de uniformidad de la precipitación no es válida. La disponibilidad de información posibilitó la obtención de precipitaciones medias areales que caractericen en forma más adecuada las tormentas en la cuenca en estudio (y sus subcuencas).

## CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La cuenca del río Gualeguay abarca la zona central de la provincia de Entre Ríos, entre los sistemas de Lomada de Montiel y Lomada Grande, desde el Norte, en el departamento Federal, hasta el sur, en la desembocadura del río Gualeguay en el Delta entrerriano. Esta cuenca es la más extensa dentro de la provincia, drena un área de 21.549 km<sup>2</sup> y está compuesta por una gran variedad de suelos, en su gran mayoría fértiles y propicios para

la actividad agropecuaria. En la zona de bañados en la naciente, por ejemplo, los suelos se componen de arcillas, limos densos y limos arcillosos.

El río Gualeguay es uno de los afluentes del curso inferior del río Paraná, nace entre las ciudades de Federación y San José de Feliciano. Fluye en dirección Sudoeste, atravesando las localidades de Villaguay, Rosario del Tala y Gualeguay y desemboca en los brazos del Paraná Pavón y Paraná Ibicuy del Delta entrerriano. Desde su nacimiento, el cauce principal tiene aproximadamente 415 km. Entre los tributarios más importantes se destacan los arroyos Raíces, El Tigre y Clé por la margen derecha, y por la margen izquierda el arroyo Lucas y el Villaguay.

Las rutas de mayor importancia que atraviesan el río Gualeguay son la Provincial N.º 28 y 22 al Norte, la Nacional N.º 18 al centro, la Provincial N.º 39 en inmediaciones a la localidad de Rosario del Tala y la Nacional N.º 12 en la localidad de Gualeguay. En la Figura 1 pueden observarse los departamentos que comprende la cuenca y su distribución territorial.

Respecto de la morfometría de la cuenca, la misma es levemente alargada, con un perímetro de 884,34 km. Posee un coeficiente de forma de Horton de 0,125, un coeficiente de compacidad de 1,70 y una relación de elongación de 0,548. En la naciente de la cuenca las cotas rondan los 72 m IGN, alcanzando en su desembocadura cotas de 6 m IGN.

El cauce del río es sinuoso, formando múltiples meandros y bancos de arena, así como un amplio valle de inundación hacia ambas márgenes. Las crecidas de este río son regulares y pueden prolongarse por varias semanas. En presencia de crecidas máximas, vastos sectores de la planta urbana de Gualeguay resultan anegados como sucedió con las lluvias extraordinarias de abril de 2016, que anegaron también las localidades de Rosario del Tala y Puerto Ruiz.

## ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

A fin de conocer el régimen pluviométrico de la zona en estudio y su comportamiento, en primera instancia se recopilieron los datos históricos de precipitación. En la provincia de Entre Ríos existen diferentes organismos que mantienen registros de carácter oficial de las mediciones de precipitación a los que se pudo acceder:

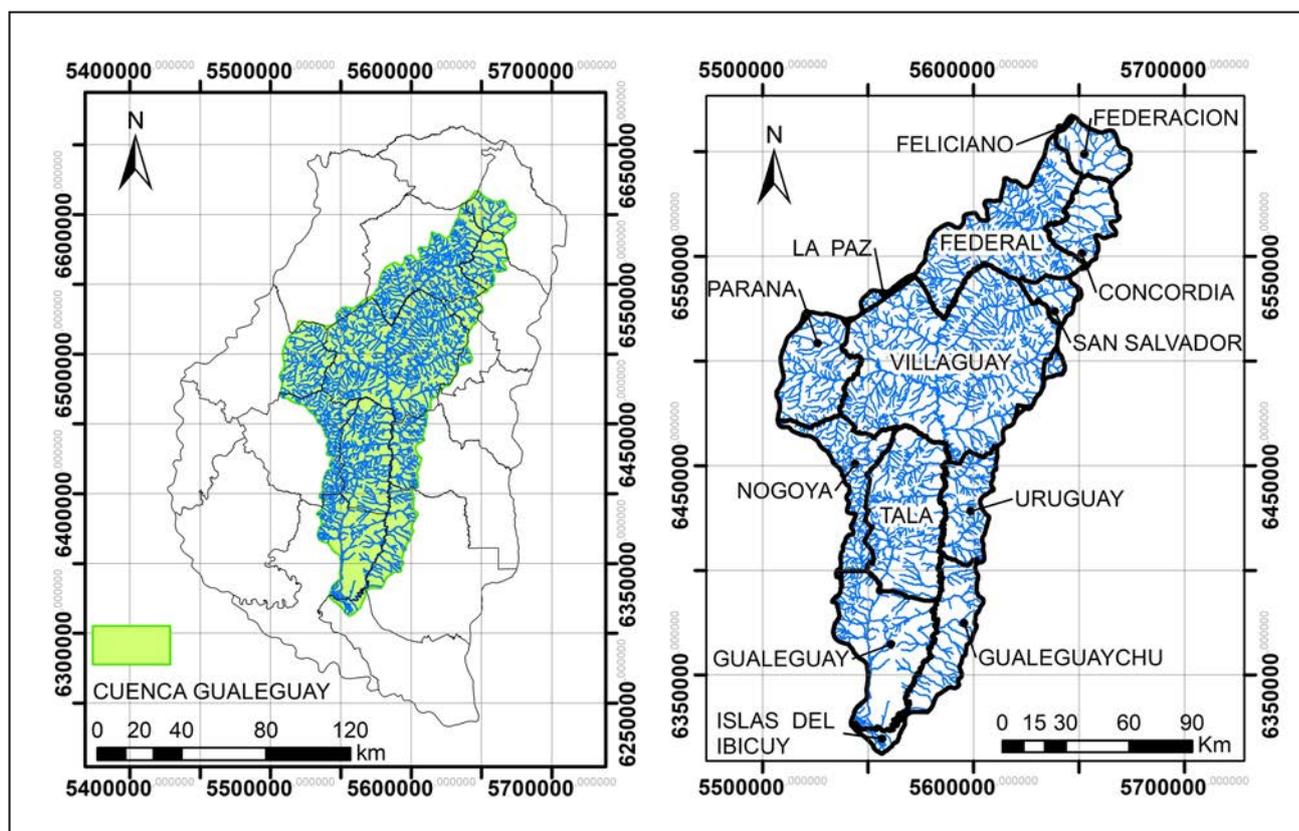


Figura 1. Cuenca del río Gualeguay.

- Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos (DHER)
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH)
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
- Bolsa de cereales de Entre Ríos

Para el caso de estudio de la cuenca del río Gualeguay se dispuso de información proveniente de 70 estaciones localizadas en la cuenca del río Gualeguay y otras 39 ubicadas en cuencas aledañas: arroyo Feliciano, río Gualeguaychú, arroyo Nogoyá, río Mocoretá y propias del río Paraná. Estas últimas se consideraron estaciones auxiliares por encontrarse cerca del límite de la cuenca. De cada estación se evaluó la extensión del registro, la ubicación (coordenadas, cuenca y departamento al que pertenece) y operador (en general DHER). Del total de estaciones analizadas, existen 15 estaciones con registros de medición disponibles hasta 2016 y 22 estaciones que aún continúan operando con acceso normal a sus datos. Las estaciones restantes no poseen registros disponibles actuales o han dejado de operar.

Para el estudio de frecuencias de la cuenca del río Gualeguay se definió un intervalo de 30 años de registros pluviométricos, que comienza en septiembre del año 1985 y finaliza en agosto del 2016.

A fin de evaluar la relevancia de cada una de las estaciones, se elaboró un sistema de categorización en función de la extensión y continuidad de los registros. Se definieron 5 rangos con base en el cociente entre la cantidad de meses observados de todo el

período de registro y la cantidad total de meses de la serie anual completa, clasificando cuantitativamente a las estaciones de mayor a menor calidad. La categoría 1, corresponde a las estaciones con mayor extensión de datos continuos y completos: 30 años de registro con al menos 95 % de la información de cada año; a la categoría 2 corresponden pluviómetros con al menos 25 años de registros completos o que posean más del 90 % de la información en dichos años; categoría 3 se asigna a estaciones con un mínimo de 20 años de registros completos o que posean más del 80% de la información en dichos años; categoría 4 son los pluviómetros con mínimo 15 años de registros completos o que posean más del 70 % de la información en dichos años y la categoría 5 se asigna a estaciones, con períodos de registro cortos o discontinuos, que no cumplen ninguna de las condiciones anteriores (registros con menos de 15 años o menos del 70 % de la información en dichos años).

La información se sistematizó mediante una plataforma SIG, utilizando el programa QGIS (*QGIS Development Team, 2019*), en el que se consignaron las ubicaciones y categorías de las estaciones disponibles, tal como se aprecia en la Figura 2.

Como índice de estimación de la calidad de la información y la densidad de red se comparó la categoría y cobertura promedio con la red mínima establecida por la Organización Meteorológica Mundial (*OMM, 2008, 2011*). Esta proporciona las características generales de la precipitación u otras variables y ayuda a establecer su eventual densificación en función de necesidades reales que permiten llegar a una red óptima. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 1.

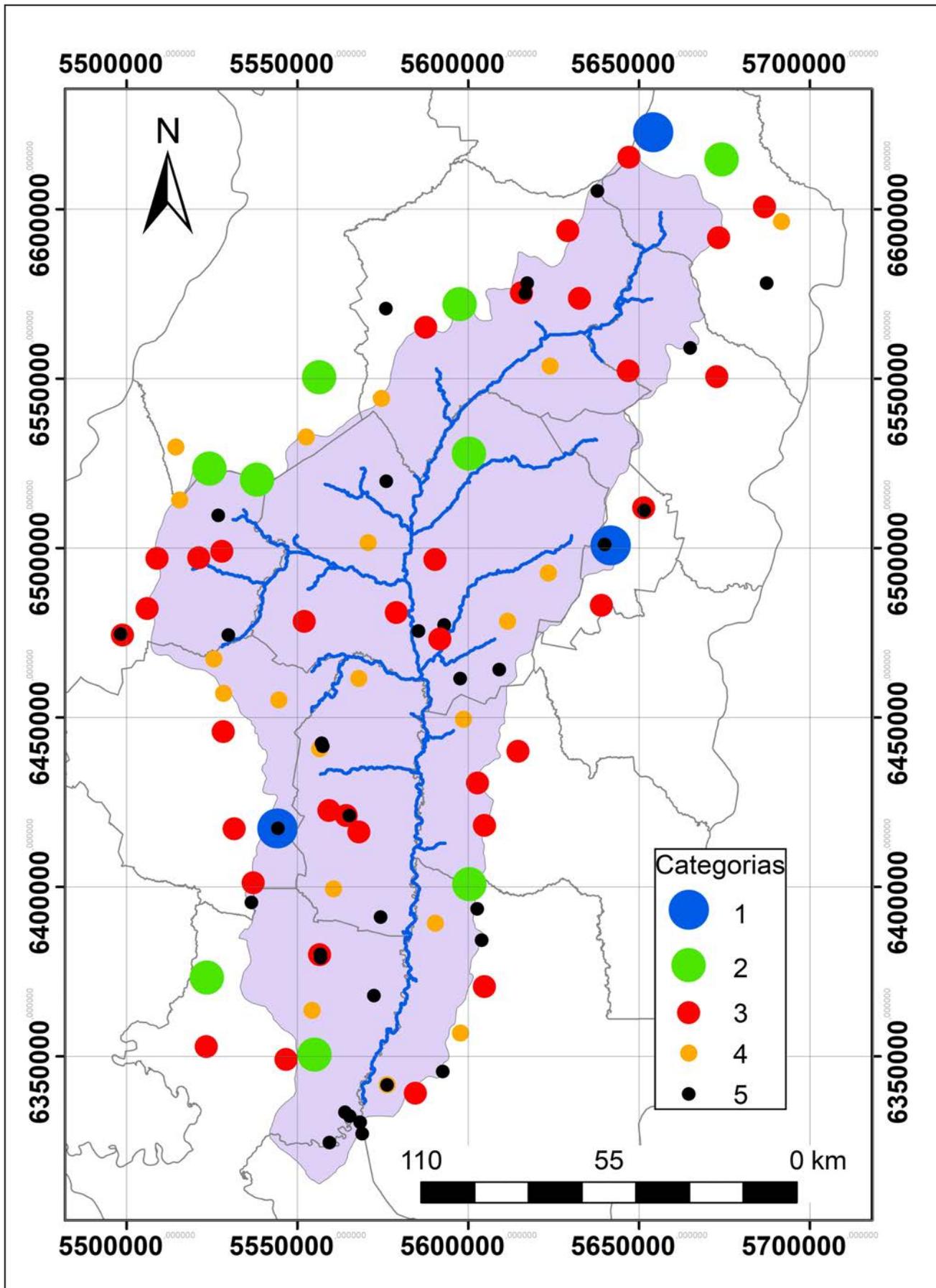


Figura 2. Estaciones pluviométricas según categoría.

**Tabla 1. Densidad de la red pluviométrica de la Cuenca del río Gualeguay.**

Área cuenca [km <sup>2</sup> ]	Estaciones	Categoría					Categoría Promedio	Total de Pluviómetros	Área Promedio [km <sup>2</sup> /Pluv]
		1	2	3	4	5			
21.549	Internas	2	4	18	16	30	3,83	109	197,69
	Externas	1	5	16	5	12			
	Total	3	9	34	21	42			

La densidad obtenida satisface las condiciones establecidas por la OMM para una red mínima. Respecto a la categorización de los pluviómetros se halla en promedio entre 3 y 4.

#### SELECCIÓN DE ESTACIONES REPRESENTATIVAS

La generación de una base de datos pluviométricos en plataforma SIG, permitió el análisis espacial de la red facilitando el proceso de selección de las estaciones considerando la calidad de los datos, la extensión de los registros y la cobertura espacial de cada una.

La selección de estaciones se realizó mediante el trazado preliminar de círculos de influencia de 15 km de radio de acuerdo a criterios de la DHER cumpliendo los límites establecidos por la OMM para una red pluviométrica mínima. Se eliminaron los pluviómetros de categorías 4 y 5 cuyas áreas de influencia presentaron superposición con los de mayor categoría, logrando así una red pluviométrica depurada.

Como puede observarse en la Figura 3, prevalecieron las estaciones pluviométricas de categoría 3 y 4. La etiqueta numérica corresponde al código de identificación otorgado por el organismo propietario de cada estación. Se identificaron falencias en la cobertura espacial; resultando extensas áreas sin registros disponibles, especialmente en la zona centro y sur de la cuenca.

En la Figura 4 se representan las áreas de influencia resultantes del trazado de polígonos de Thiessen para cada pluviómetro seleccionado.

En la Tabla 2 se resume la categoría promedio y la densidad media de la red pluviométrica depurada en las zonas de estudio.

**Tabla 2. Densidad media de la red pluviométrica adoptada para la cuenca del río Gualeguay.**

Área cuenca [km <sup>2</sup> ]	Estaciones	Categoría					Categoría Promedio	Total de Pluviómetros Seleccionados	Área Promedio [km <sup>2</sup> /Pluv]
		1	2	3	4	5			
21.549	Internas	0	3	19	12	7	3,4	54	399
	Externas	1	4	3	4	1			
	Total	1	7	22	16	8			

La cobertura media de las estaciones varió entre los 49 km<sup>2</sup> y 1.097 km<sup>2</sup>, representando superficies de círculos equivalentes de radios de 4 a 19 km. Considerando que este último es levemente superior al límite deseable de 15 km de radio y que el valor promedio está dentro de los límites establecidos para una red mínima; se consideró aceptable la red de estaciones seleccionadas a los efectos de obtener precipitaciones medias en la cuenca para la ejecución del estudio.

Por otra parte, se halló que el valor promedio de la categoría de los pluviómetros seleccionados es cercano a 3,5. Esto significa, en términos de valores medios, la disponibilidad de registros entre 15 y 20 años de longitud mayoritariamente completos en los últimos 30 años.

#### RELLENAMIENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS

Para poder realizar un análisis de frecuencias es necesario contar con series de 30 años de registros continuos completos. Por ello se evaluaron distintos métodos de rellenamiento de datos, adoptándose, por su ajuste y facilidad de ejecución, el método Inverse Distance Wighted (IDW) del *National Weather Service*.

Este método consiste en determinar la precipitación diaria faltante de una estación a partir de los registros de estaciones pluviométricas cercanas. La variable principal es la distancia entre la estación a completar y las estaciones seleccionadas para el relleno.

Se colocó la estación a completar (estación pivote) en el origen de un sistema de coordenadas cartesianas ficticio, tal como se observa en la Figura 5. Mediante el análisis espacial en la plataforma del SIG, se buscaron los pluviómetros más próximos y de mejor categoría en cada cuadrante con disponibilidad de datos para el rellenamiento de los registros faltantes en la estación pivote. Cuando las estaciones cercanas no contaban con los registros necesarios se seleccionaron estaciones más alejadas.

El procedimiento de rellenamiento se validó aplicando el método de curvas de doble acumulación, contrastando la serie obtenida con un registro extenso y completo de una estación confiable (categoría 1). Este método se basa en que, para zonas meteorológicamente homogéneas, existe una relación de proporcionalidad entre sus precipitaciones acumuladas que puede analizarse analítica y gráficamente.

#### DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUBCUENCAS

Debido a la extensión de la cuenca del río Gualeguay, se trazaron 6 (seis) subcuencas en puntos de control considerados de interés. La primera subcuenca tiene cierre en Cañada Bermúdez, la segunda en arroyo Guerrero, la tercera en Paso Duarte, en coincidencia con la Ruta Provincial N° 22, una cuarta subcuenca con cierre en Villaguay, donde se cuenta con aforos al igual que en la quinta, Rosario del Tala, y la última, en Paso Alonso, que abarca casi la totalidad de la cuenca. Las subcuencas delimitadas pueden apreciarse en la Figura 6. Los puntos de cierre que poseen datos de aforos posibilitan la calibración de futuras estimaciones a partir de modelos hidrológicos.

En la Tabla 3 se consignan las características físicas principales para las subcuencas propuestas. Los datos de las pendientes del escurrimiento fueron determinados a partir del Modelo de Elevación Digital del terreno (MDE) y con ellos se calcularon los tiempos de concentración por la fórmula de Kirpich (*Kirpich et al., 1940*).

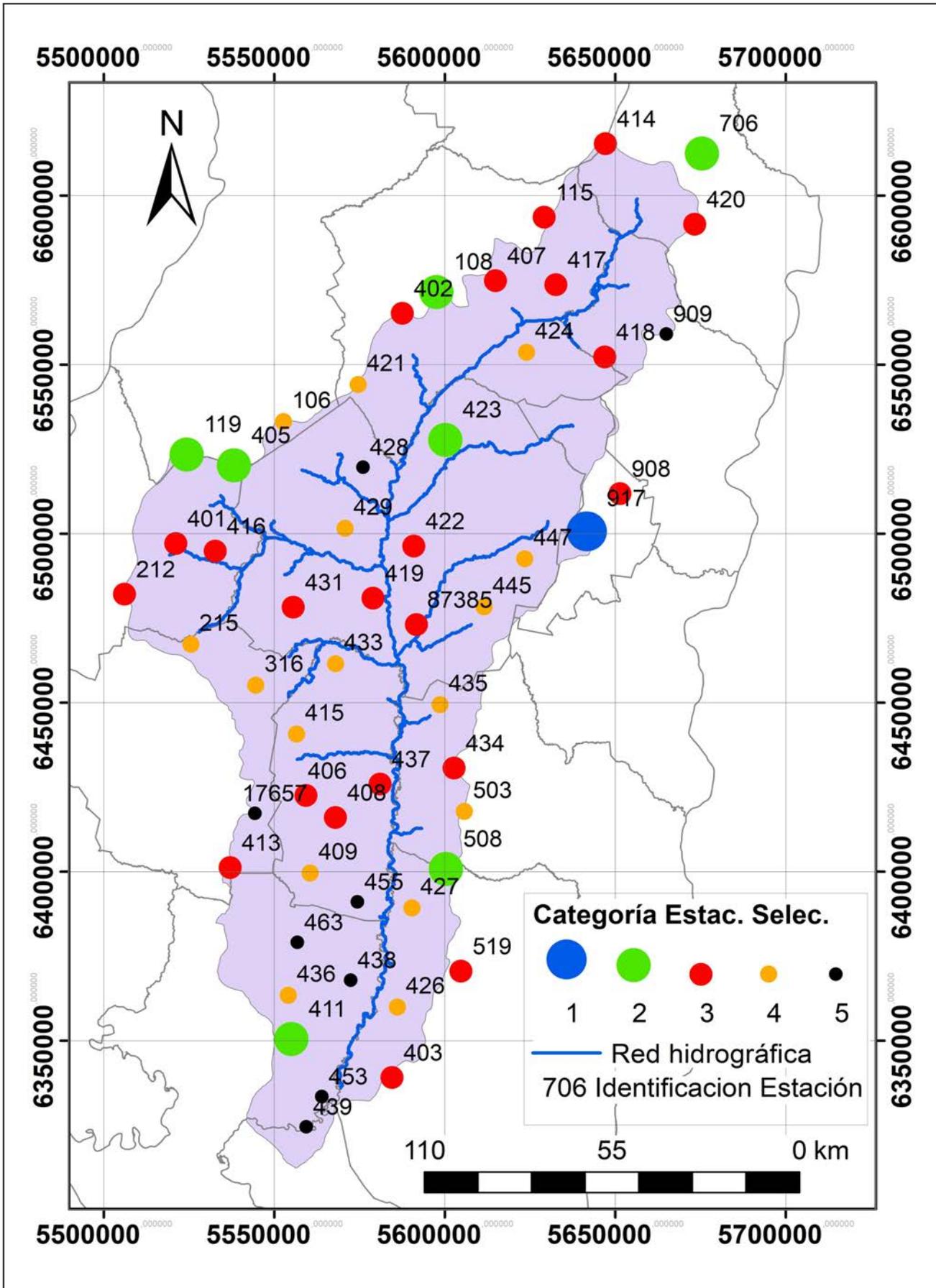


Figura 3. Red de estaciones seleccionadas cuenca del río Gualeguay.

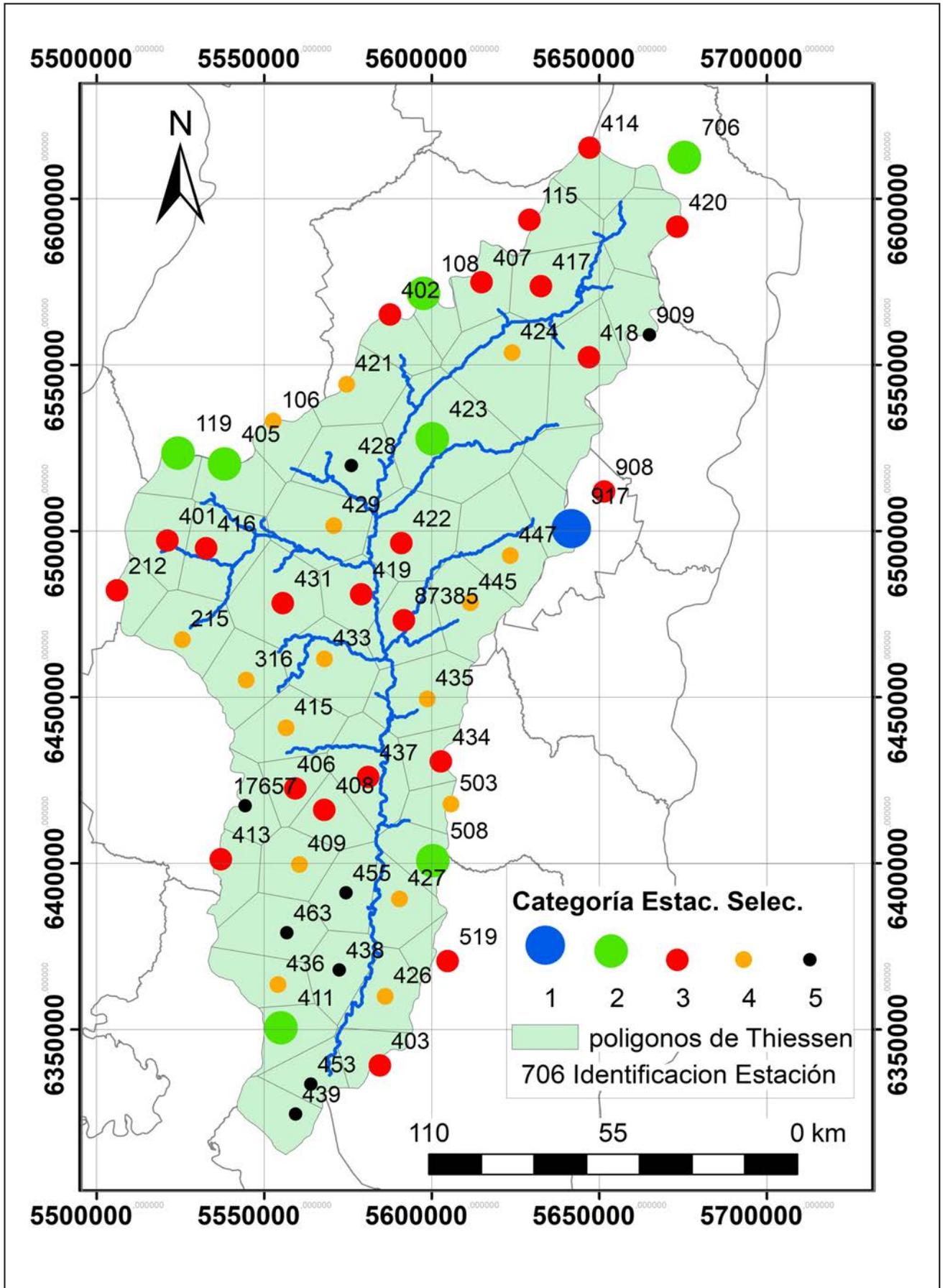


Figura 4. Trazado de polígonos de Thiessen para la red adoptada.

Tabla 3. Parámetros físicos de las subcuencas del río Guaqueguay.

Subcuencas Denominación	Mayor trayectoria del escurrimiento						
	Área	Longitud del curso	Cota aguas arriba	Cota aguas abajo	Diferencia de nivel	Pend. Cauce	Tiempo de concentración
	A	L <sub>c</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	ΔH	i	tc
Sección de control	[km <sup>2</sup> ]	[km]	[m IGN]	[m IGN]	[m]	[%]	[h]
Cañada Bermúdez	611	31	72	60	12	0,04	19,1
Arroyo Guerrero	818	31	72	60	12	0,04	19,1
Paso Duarte	2971	90	72	50	22	0,02	52,5
Villaguay	10.863	194	72	36	36	0,02	104,4
Rosario del Tala	16.098	266	72	30	42	0,02	142,0
Paso Alonso	21.239	383	72	6	66	0,02	181,8

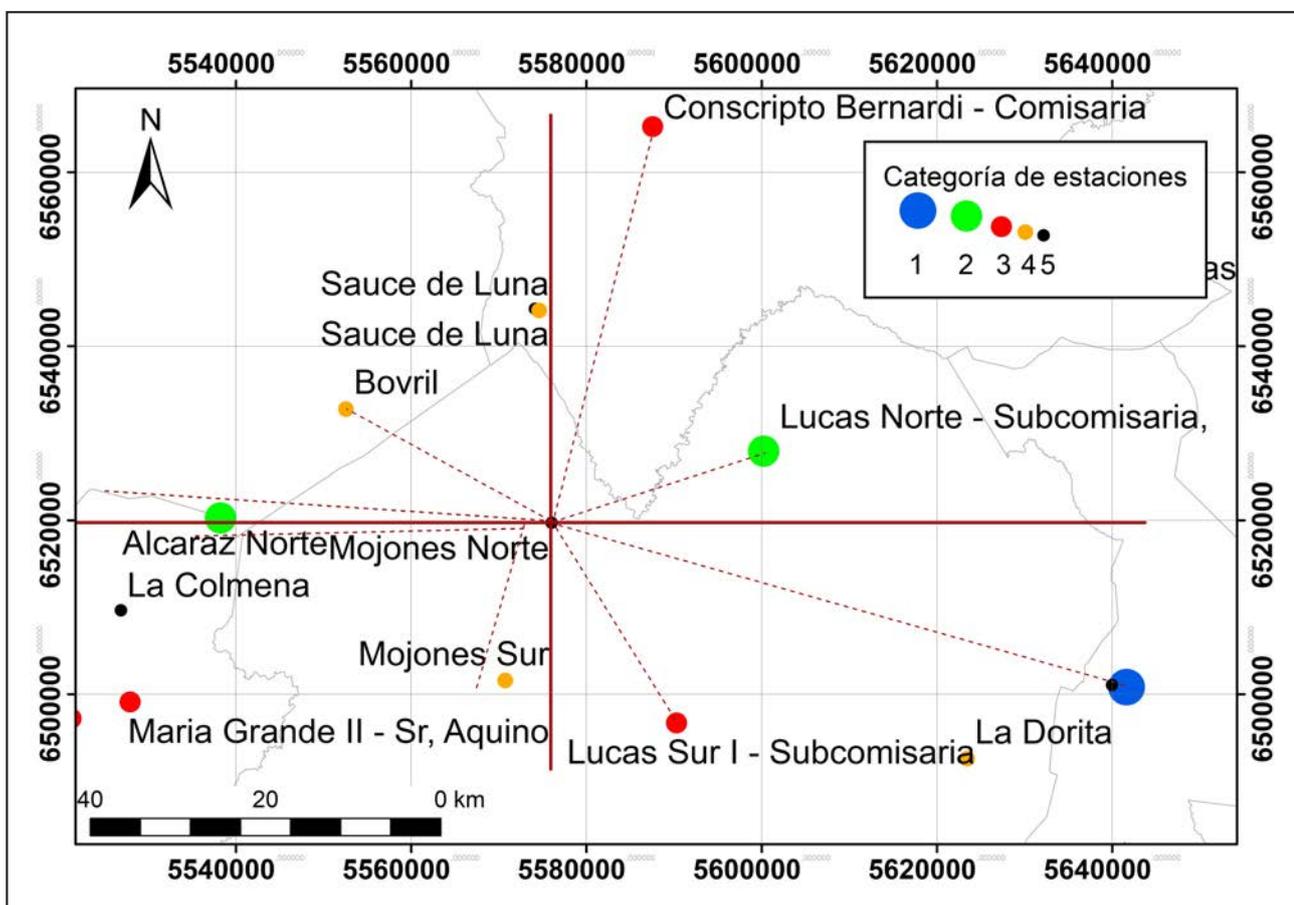


Figura 5. Ubicación de pluviómetros para el rellenamiento de datos.

### ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

Para cada subcuenca se generó una serie diaria de precipitaciones denominada “pluviómetro ficticio” (Caamaño et al., 2011). Cada registro diario es la PMA de la subcuenca para ese día, obtenida por el método de los polígonos de Thiessen. Este método considera la eventual falta de uniformidad en la

distribución de estaciones y provee mejores resultados en zonas de topografía suave y condiciones atmosféricas uniformes (Aparicio, 1997).

La PMA se calcula como la suma de los productos de la precipitación diaria de cada estación puntual por un coeficiente de proporción entre el área del polígono generado para esa estación y el área total de la cuenca o subcuenca considerada.

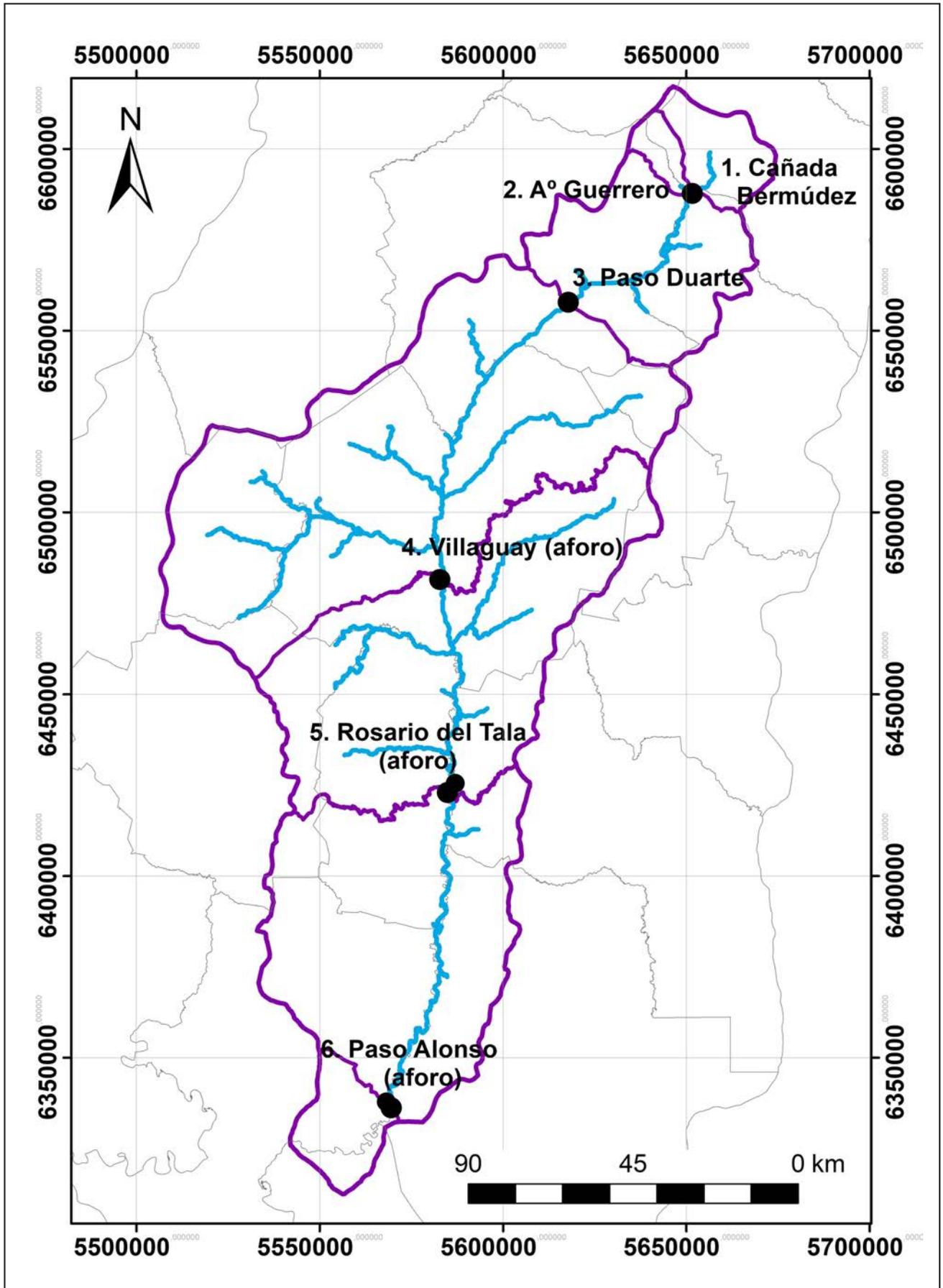


Figura 6. Delimitación de subcuencas del río Gualeguay.

En la Figura 7 se aprecia la PMA para el pluviómetro ficticio resultante en la cuenca del río Gualeguay para el período de estudio, año 1985 a 2016.

**ANÁLISIS DE LAS SERIES**

Se generaron las series de Precipitaciones Medias Areales Máximas Anuales (PMAMA), para cada subcuenca, utilizando los registros de los pluviómetros ficticios, para el año hidrológico septiembre-agosto para duraciones de tormenta de entre 1 y 4 veces el tiempo de concentración.

Se adoptaron 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 26, 30 y 35 días de duración de manera de garantizar el aporte de la

totalidad de las subcuencas del río Gualeguay consideradas en el punto de cierre.

La PMAMA es una serie en la cual el valor de precipitación para cada año hidrológico se obtiene como la máxima precipitación diaria acumulada para cada duración analizada en ese año.

Se efectuó un estudio estadístico de análisis de frecuencia sobre estas series de PMAMA que constan de 30 datos (un dato por año hidrológico). Para ello se analizaron distintos modelos de distribuciones de probabilidad a partir del software AFMULTI (*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL, 2017*), para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

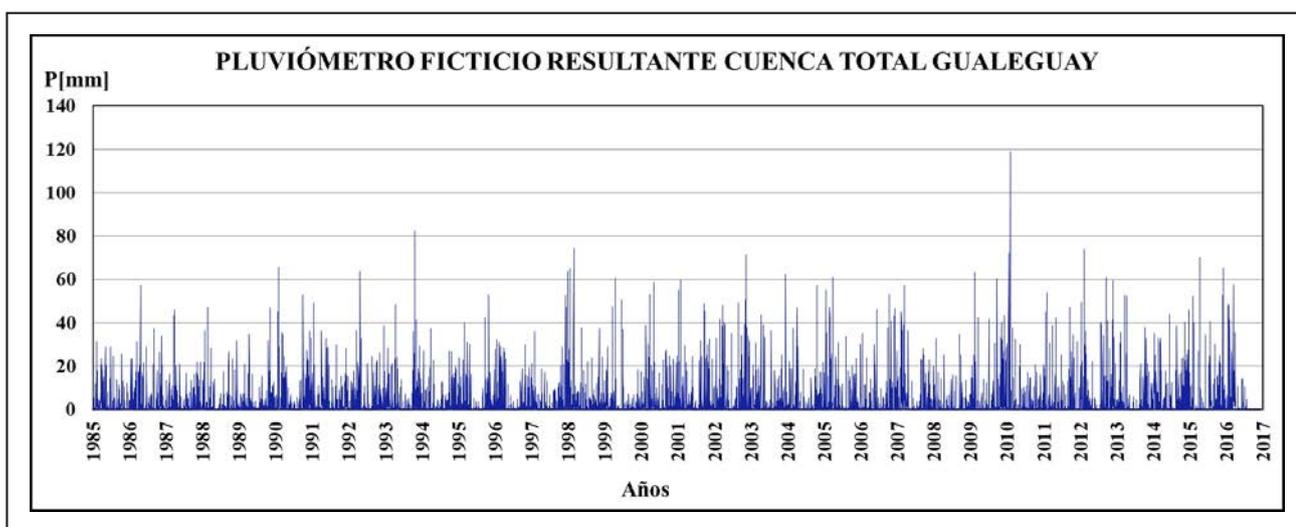


Figura 7. PMA para el Pluviómetro Ficticio resultante en la cuenca del Gualeguay. Año 1985 a 2016.

Tabla 4. Resultados del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

Probabilidad de ocurrencia	R [años]	VALOR DE LA VARIABLE PARA DIFERENTES RECURRENCIAS Y MODELOS					
		LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOG PEARSON	EXPONENC.
0,50	2	56,3	55,87	56,3	56,23	55,31	53,43
0,20	5	71,11	70,07	70,93	70,79	69,69	68,6
0,10	10	80,35	79,48	80,13	79,78	79,62	80,07
0,05	20	88,87	88,5	88,59	87,96	89,47	91,55
0,02	50	99,55	100,18	99,06	97,99	102,77	106,72
0,01	100	107,38	108,93	106,55	105,18	113,21	118,2

Tabla 5. Indicadores de bondad de ajuste y errores del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

	MODELOS DE DISTRIBUCIÓN					
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOGPEARSON	EXPONENC.
KOLMOGOROFF	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	
CHI CUADRADO	—	—	—	—	—	—
ECMF	0,0452	0,0453	0,044	0,0441	0,052	0,0795
ECMV	42,82	40,19	42,85	43,74	38,72	48,57

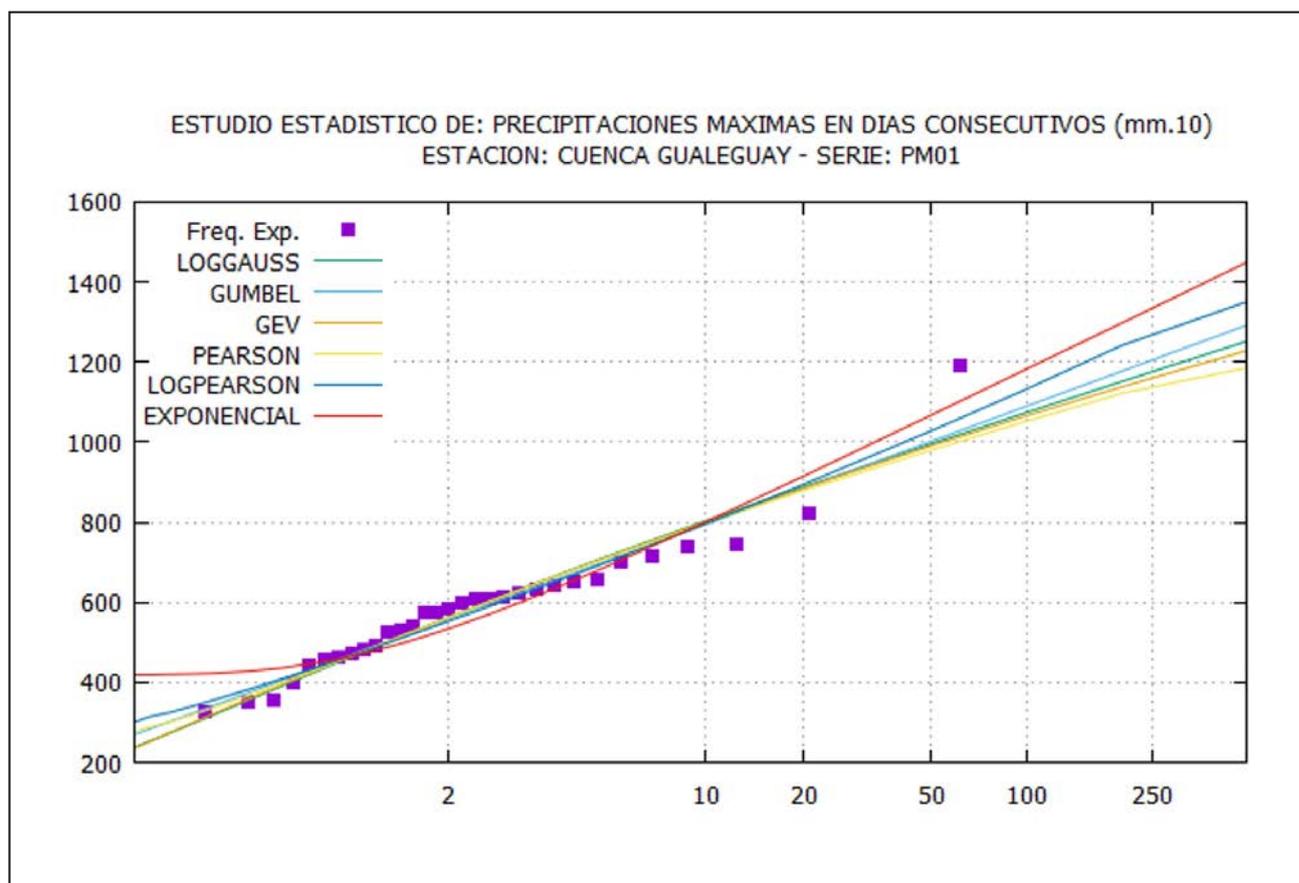


Figura 8. Salida gráfica del modelo AFMULTI para las precipitaciones de 1 día de duración para distintas funciones de distribución en la cuenca del río Gualeguay.

De esta manera se obtuvieron los valores de la variable para cada recurrencia y distribución analizada: LOGGAUSS, GEV, PEARSON, LOGPEARSON, GUMBEL, Y EXPONENCIAL. A modo de ejemplo, en la Tabla 4 y la Figura 8, se presentan los resultados del Programa AFMULTI para la cuenca total del río Gualeguay, para 1 (un) día de duración. En la Tabla 5 se presentan los indicadores para la misma.

A partir de la interpretación visual y el análisis de los indicadores de bondad de ajuste de cada distribución de probabilidad (Test Chi Cuadrado, Kolmogorof, Error Cuadrático Medio de la Frecuencia -ECMF-, Error Cuadrático Medio de la Variable -ECMV) se optó por la distribución GEV.

Para independizar las precipitaciones obtenidas de la hora de medición se aplicó un factor de corrección  $RT_n$ , que incorpora la diferencia entre el día pluviométrico y mediciones pluviográficas de 24 h de duración (Ecuación 1) que pudieran estar desfasadas (Zamanillo *et al.*, 2008). El factor queda definido según la Ecuación 2.

El valor de  $RT$  se recupera como "Relaciones  $RT$  de los pluviógrafos provinciales" del estudio de Zamanillo *et al.*, 2008; con valores de 1,16 para Concordia, 1,14 para Concepción del Uruguay y 1,15 para Paraná. Para el estudio se utilizó como valor promedio  $RT= 1,15$  para efectuar la relación.

$$P_n = RT_n \times P_{\text{máx diaria}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$RT_n = 1 + \frac{(RT-1)}{n} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

- $P_n$ : Precipitación para tormenta de  $n$  días de duración
- $P_{\text{máx diaria}}$ : Precipitación máxima diaria de la subcuenca analizada (según distribución GEV)
- $RT_n$ : Relación entre la precipitación de 24 h y  $n$  días de duración
- $RT$ : Relación entre la precipitación de 24 h de duración y la precipitación diaria máxima.
- $n$ : días de duración de la tormenta

Con los valores de precipitación según la distribución GEV, corregidos con el coeficiente  $RT_n$ , se procedió al cálculo de las intensidades de precipitación en mm/h para para las 6 subcuencas, para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 21, 26, 30 y 35 días; y recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Estos valores se ajustaron a través de una familia de curvas IDF las que debieron ser parametrizadas con el objeto de otorgarles la flexibilidad necesaria para su utilización en cualquier modelo lluvia-escorrentía (Borsellino *et al.*, 2005).

Las curvas IDF, obtenidas según el Método Chicago, son definidas mediante una expresión matemática del tipo representado en la Ecuación 3, para cada recurrencia.

$$i = \frac{A}{(d+B)^C} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde

i: intensidad de lluvia correspondiente a una duración d y tiempo de recurrencia T

d: duración de lluvia en minutos

A, B, C: coeficientes empíricos

Los coeficientes empíricos A, B y C se obtuvieron a partir de los datos de intensidad de precipitación para cada duración y recurrencia, con la herramienta de software ARHYMO (CRA del INCyTH, 1975).

En la Tabla 6 se presentan las intensidades calculadas y los coeficientes obtenidos para la cuenca del río Gualeguay.

## RESULTADOS

Se obtuvieron las expresiones matemáticas para las relaciones IDF para cada recurrencia analizada para los pluviómetros ficticios que registran la PMA sobre la cuenca completa y las 6 subcuencas en estudio. En la Figura 9 se presentan las gráficas de las curvas IDF correspondientes a la cuenca total del río Gualeguay. La Tabla 7 presenta los coeficientes para las expresiones del tipo de la Ecuación 3 que representan las familias de curvas para cada subcuenca analizada.

A modo de ejemplo, se presenta la ecuación (4) que es la expresión de la intensidad de precipitación en [mm/h] para una recurrencia de 10 años para la subcuenca Villaguay, donde d es la duración de precipitación en minutos:

$$i = \frac{344,672}{(d+3,006)^{0,603}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

**Tabla 6. Intensidad para distintas recurrencias. Estación ficticia Cuenca total río Gualeguay.**

Intensidad [mm/h]	Recurrencia [Años]						
	d [h]	2	5	10	20	50	100
24		2,70	3,40	3,84	4,24	4,75	5,11
48		1,79	2,26	2,55	2,83	3,16	3,41
96		1,10	1,46	1,70	1,94	2,25	2,50
144		0,83	1,10	1,29	1,46	1,68	1,85
192		0,71	0,92	1,05	1,17	1,31	1,41
240		0,59	0,79	0,92	1,06	1,23	1,37
288		0,54	0,71	0,83	0,94	1,09	1,20
336		0,50	0,65	0,76	0,85	0,97	1,06
432		0,45	0,60	0,70	0,79	0,90	0,99
504		0,41	0,56	0,65	0,73	0,84	0,91
624		0,38	0,50	0,56	0,62	0,69	0,73
720		0,36	0,46	0,52	0,57	0,63	0,66
840		0,33	0,43	0,50	0,55	0,62	0,66
Coefficientes	A	199,119	231,502	255,39	286,615	321,359	506,653
Curvas IDF	B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
	C	0,599	0,587	0,582	0,583	0,581	0,618

Si analizamos por ejemplo un período de retorno de 50 años, que es una recurrencia usualmente utilizada en diseño de obras de arte menores, podemos determinar la intensidad de precipitación para tormentas de distintas duraciones. A modo

de ejemplo, se calculan las intensidades para precipitaciones de 1,2,4,8,12,18,21,30 y 35 días de duración para cada subcuenca para 50 años de recurrencia.

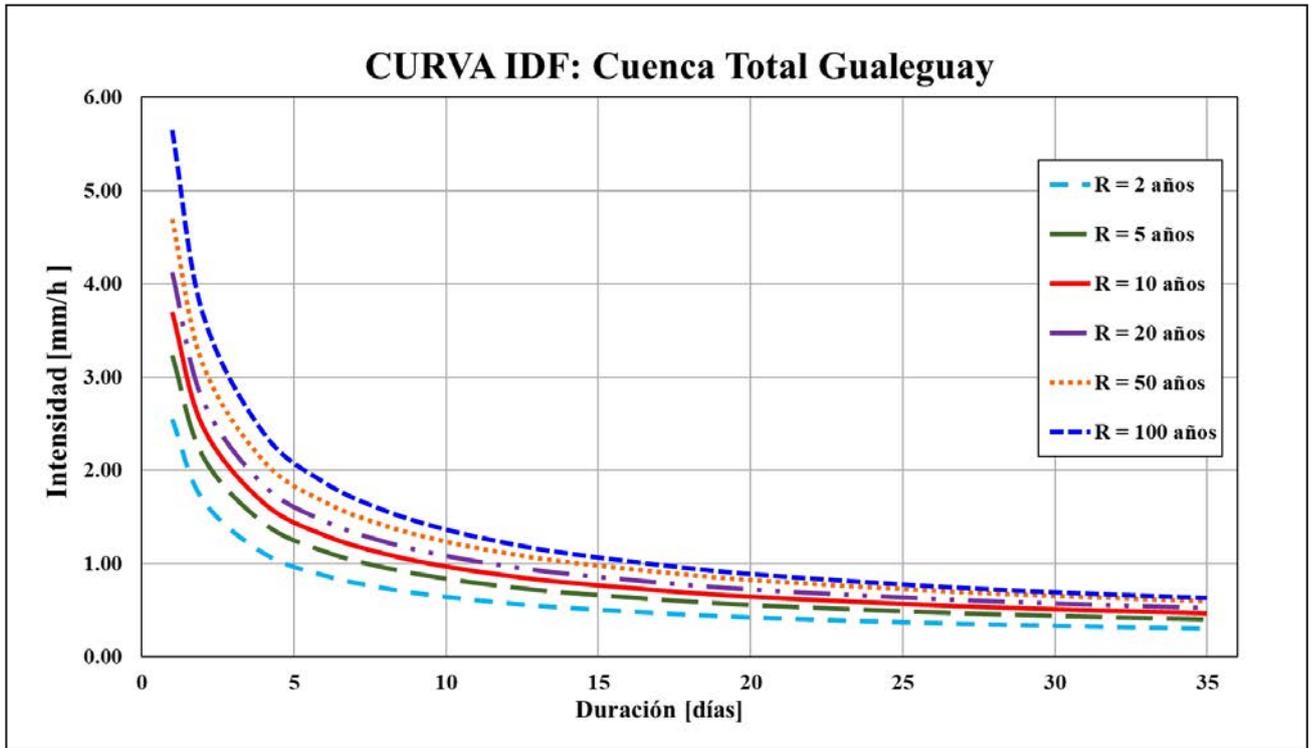


Figura 9. Relación intensidad-duración-recurrencia para la estación pluviométrica ficticia en la Cuenca total del río Gualeguay.

Tabla 7. Coeficientes empíricos de la familia de curvas IDF para cada subcuenca analizada.

Subcuenca	Área [km <sup>2</sup> ]	Coeficientes Empíricos IDF	Recurrencia [Años]					
			2	5	10	25	50	100
Subcuenca Cañada Bermúdez	610	A	547,406	755,859	929,273	1088,936	1317,69	1529,46
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,676	0,675	0,679	0,68	0,683	0,687
Arroyo Guerrero	818	A	559,862	737,533	861,703	1000,524	1193,144	1330,417
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,679	0,676	0,675	0,678	0,681	0,682
Paso Duarte	2971	A	307,665	365,579	405,488	460,216	543,792	616,472
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,623	0,611	0,607	0,607	0,609	0,612
Villaguay	10.863	A	248,264	310,155	344,672	376,622	428,724	459,407
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,615	0,608	0,603	0,599	0,596	0,593
Rosario del Tala	16.098	A	232,829	271,045	306,813	345,212	397,608	442,531
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,61	0,596	0,594	0,593	0,593	0,595
Paso Alonso	21.239	A	193,476	229,503	265,98	305,471	377,095	433,511
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,592	0,582	0,583	0,586	0,596	0,602
Cuenca total	21.552	A	199,119	231,502	255,39	286,615	321,359	506,653
		B	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006
		C	0,599	0,587	0,582	0,583	0,581	0,618

**Tabla 8. Intensidades de precipitación calculadas para cada subcuenca para distintas duraciones y 50 años de recurrencia.**

Intensidad de Precipitación [mm/h]		Duración de la tormenta de diseño en días								
Subcuenca	Área [km <sup>2</sup> ]	1	2	4	8	12	18	21	30	35
Cañada Bermúdez	610	9,16	5,71	3,56	2,22	1,68	1,27	1,15	0,90	0,81
Arroyo Guerrero	818	8,42	5,25	3,28	2,05	1,55	1,18	1,06	0,83	0,75
Paso Duarte	2971	6,48	4,25	2,79	1,83	1,43	1,12	1,02	0,82	0,74
Villaguay	10863	5,61	3,72	2,46	1,63	1,28	1,00	0,92	0,74	0,68
Rosario del Tala	16098	5,32	3,53	2,34	1,55	1,22	0,96	0,88	0,71	0,65
Paso Alonso	21239	4,94	3,27	2,16	1,43	1,12	0,88	0,81	0,65	0,59
Cuenca total	21552	4,69	3,14	2,10	1,40	1,11	0,88	0,80	0,65	0,60

## CONCLUSIONES

Se obtuvo una base de datos depurada de la red de estaciones pluviométricas para la cuenca en estudio, generada en plataforma SIG, que permitió su análisis espacial.

El análisis previo de disponibilidad y calidad de los registros pluviométricos de la cuenca permite concluir que, en términos de valores medios, la mayor proporción de estaciones tienen entre 15 y 20 años de registros completos, existiendo sólo una estación interior de categoría 1 con 30 años de observaciones. Esto representa un volumen de información aceptable, sin embargo, la distribución espacial es heterogénea, existiendo extensas áreas sin cobertura pluviométrica adecuada, principalmente en el centro y sur de la cuenca.

Las intensidades calculadas con las expresiones de las curvas IDF desarrolladas para las subcuencas denotan una marcada proporcionalidad inversa a la extensión de la subcuenca analizada. Los valores de intensidad obtenidos para las subcuencas más pequeñas (de hasta 1000 km<sup>2</sup>), llegan a ser alrededor de un 25 a 70 % mayores (e incluso más) que las intensidades calculadas para las subcuencas de mayor extensión (entre 10.000 y 25.000 km<sup>2</sup>), disminuyendo este porcentaje a medida que aumenta la duración de la tormenta. Esto es coincidente con

la atenuación espacial de las precipitaciones, manteniéndose la tendencia para las distintas recurrencias en análisis.

Las familias de curvas IDF obtenidas representan un avance hacia un mayor conocimiento de las características hidrológicas regionales. Son una herramienta para el diseño de obras de infraestructura, a partir de la estimación de caudales mediante modelos hidrológicos ajustados a las condiciones de precipitación locales. Ello posibilita un mejor aprovechamiento de los recursos económicos y ambientales disponibles, ya que permite una mejor predicción de, por ejemplo, caudales de escorrentía o cotas de inundación, conlleva mayores certidumbres y soluciones más económicas a la hora de proyectar obras hidráulicas. Todo esto redundará en un beneficio para las poblaciones alcanzadas por las obras y puede ser utilizada como información valiosa para un mejor planeamiento territorial.

Cabe destacar que estas curvas generadas a partir del registro de precipitaciones son indispensables para la comprensión de dicho fenómeno, la prevención del riesgo de catástrofes y el diseño de obras de interés para la sociedad como son las obras hidráulicas (puentes, alcantarillas, redes de drenaje, presas), viales, ferroviarias y de defensa e incluso una herramienta en la planificación territorial. Por ello es de fundamental importancia que se mantenga una política sostenida de medición de datos pluviométricos que permita retroalimentar el sistema.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

APARICIO, F., 1997.

Fundamentos de Hidrología de Superficie.  
*Balderas, México: Limusa.*

BORSELLINO, M. J., MATTAR M. T. Y OLMOS L. A., 2005.

Estimación de CURVAS I-D-F para datos de lluvias a nivel diario.  
*Aplicación a la región centro-oeste de Santiago del Estero. Argentina.*

CAAMAÑO NELLI, G. Y DASSO, C. M., 2011.

Lluvia de diseño sin atenuación de datos locales para una cuenca.  
*Cuadernos del CURIHAM (pp. 83-93). Rosario, Argentina.*

CASAS CASTILLO M. CARMEN, 2005.

Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya.  
*Modelización y clasificación objetiva. Barcelona: Departament d'Astronomia i Meteorologia Universitat de Barcelona.*

CENTRO REGIONAL ANDINO DEL INSTITUTO DE CIENCIA Y TÉCNICA HÍDRICAS (INCYTH-CRA). (1975).

ARHymo [Software].

FACULTAD DE INGENIERÍA Y RECURSOS HÍDRICOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL. (2017).

Afmulti. [Software].

- KIRPICH, Z.P., 1940.  
Time of concentration of small agricultural watersheds.  
*Journal of Civil Engineering (Vol.10 (n.6). p. 362).*
- OMM N°8, 2008.  
Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación.  
*Séptima Edición. Ginebra.*
- OMM N°100, 2011.  
Guía de Prácticas Climatológicas: Tiempo, Clima, Agua (p. 2-12).  
*Tercera Edición. Ginebra.*
- PIZARRO T., R.; ABARZA M., A.; FARIAS D., C.; JORDAN D., C., 2003.  
Construcción de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile central.  
*XII Congreso Forestal Mundial, Québec City, Canadá.*
- QGIS DEVELOPMENT TEAM, (2019).  
QGIS Geographic Information System.  
*Open Source Geospatial Foundation Project 3.4.10-Madeira. [Software]. <https://qgis.org>.*
- ZAMANILLO, E. A.; LARENZE, G. R.; TITO, M. J.; PÉREZ, M. M. Y GARAT, M. E., 2008.  
Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos.  
*Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.*





## Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales, acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta. Argentina

### Topographic study for the risk analysis in the embankment of the Arenales river bridge, southeast ring road access, city of Salta. Argentina

Quispe, Carmen <sup>1</sup> ✉ - Visich, María <sup>2</sup>

Recibido: 2 de abril de 2019 • Aceptado: 7 de abril de 2020

#### Resumen

*Los estudios topográficos revisten interés en el análisis de los riesgos geológicos ya que proporcionan las herramientas adecuadas para efectuar mediciones, cálculos y comparación de las modificaciones producidas en el terreno y en obras civiles, como consecuencia del accionar de diferentes procesos exógenos. En el terraplén del puente del río Arenales los procesos que causan alteraciones y riesgos están representados por la dinámica erosiva del cauce del mencionado río y por la erosión retrocedente provocada por cursos temporales. Estos últimos proceden de los relieves ubicados al este de la traza de la autopista, correspondiente a la avenida de circunvalación sureste, la que coincide con uno de los accesos a la ciudad de Salta.*

*El río Arenales es uno de los principales ríos que conforman la red hidrográfica que atraviesa la capital salteña. El puente que lo traspone, en el tramo investigado, forma parte de las obras principales correspondientes a la autopista. Los estudios topográficos, realizados desde 2015 al 2018, permitieron calcular las variaciones en la profundidad y amplitud de las cárcavas ubicadas al este del puente y en los sectores de riesgo detectados en la margen derecha del río, surcos de erosión. Se determinó además el volumen de material desplazado por los procesos mencionados y acumulado en la llanura de inundación próxima al talweg. Para el análisis de los riesgos se realizaron perfiles longitudinales y transversales, complementándolos con la detección de los factores antrópicos.*

**Palabras clave:** Riesgos naturales, cárcavas, topografía.

#### Abstract

*Topographical studies are of interest in the analysis of geological risks since they provide the appropriate tools to carry out measurements, calculations and comparisons of the modifications produced in the terrain and in civil works, as a consequence of the action of different exogenous processes.*

1. Cátedra de Topografía- Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia Nº 5.150 Código Postal Nº 4.400. Salta (Capital), Provincia de Salta, Argentina.

✉ agrimcar@hotmail.com

2. Cátedra de Geomorfología- Facultad de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia Nº 5.150. Código Postal Nº 4.400. Salta (Capital), Provincia de Salta, Argentina.

*On the embankment of the Arenales river bridge, the processes that cause alterations and risks are represented by the erosive dynamics of the riverbed and by the retrograde erosion caused by temporary courses. These last ones from the reliefs located to the east of the highway trace corresponding to the southeast ring road, which coincides with one of the entrances to the city of Salta.*

*The Arenales River is one of the main rivers that make up the hydrographic network that crosses the capital of Salta. The bridge that transposes it, in the section investigated, is part of the main works corresponding to the highway. The topographic studies, carried out from 2015 to 2018, allowed to calculate the variations in the depth and amplitude of the gullies located to the east of the bridge and, in the sectors of risks detected on the right bank of the river, furrows erosion. The volume of material displaced by the mentioned processes and accumulated in the floodplain next to the talweg was also determined. Longitudinal and transversal profiles were made to analyze the risks, complementing them with the detection of anthropic factors.*

**Keywords:** *Natural risks, gully, topography.*

## INTRODUCCIÓN

Morfogenéticamente la ciudad de Salta, Capital se encuentra ubicada en una unidad de origen fluvial, coincidente con un valle intermontano limitado al este y al oeste por unidades de origen estructural denudativo. El desarrollo del ejido capitalino se extiende hacia la ladera y el pie de monte de ambas unidades estructurales.

En este trabajo se hará referencia a los estudios topográficos efectuados para el análisis del riesgo en un sector de la unidad del este correspondiente al tramo medio de la Sierra de Mojotoro. Este cordón montañoso de rumbo submeridiano está representado, entre otros, por los cerros Chachapoyas, San Bernardo y La Pedrera. El acceso a la ciudad, desde el este, puede realizarse por tres vías de comunicación, la primera por el denominado Acceso Norte que atraviesa la quebrada de Chachapoyas, la que bisecta el primero de los relieves mencionados. El segundo acceso corta el tramo medio del cerro San Bernardo, mientras que el tercero se lleva a cabo por la circunvalación sureste, ubicada en el pie de monte del cerro La Pedrera. Esta última es relevante por ser la zona en la que se concentra el trabajo. La primera salida de la circunvalación, en dirección norte, conecta la RN N° 9 con el Parque Industrial y el centro capitalino, en tanto que la segunda salida, en dirección oeste, transpone un puente que cruza el río Arenales, el que forma parte de las obras correspondientes a una autopista. El puente fue construido en 2010 con la finalidad de unir el acceso a la ciudad por la RN N° 9, con la RP N° 68, conectando de este modo el Valle de Lerma con los valles Calchaquíes. Esta obra optimizó la calidad de vida de los vecinos ubicados en los barrios emplazados en la zona este del ejido capitalino, mejorando la circulación y por consiguiente la seguridad vial.

El puente, que tiene una longitud de 100 m y dirección este-oeste, fue construido en la llanura de inundación, afectando las terrazas de la margen izquierda del cauce. La obra civil estrangula la sección del curso de agua por lo que genera riesgos naturales. La estructura del puente está conformada por un tablero simple, los estribos y doce pilas. Estas últimas son impactadas por la dinámica de la corriente. El estribo y el talud del lado sureste del puente son erosionados por el escurrimiento pluvial procedente del cerro La Pedrera, el que genera cárcavamientos de dimensiones variables provocando la inestabilidad del estribo y el talud del terraplén de la avenida. Por otro lado, la amplitud de la cárcava disminuye la distancia entre éste y el talud norte de un ex vertedero generando la exposición de los

residuos que lo constituyen. Las pilas y el estribo del lado oeste se ubican sobre la llanura de inundación del cauce y sobre los niveles superiores de las terrazas fluviales. En este sector, los componentes citados precedentemente están afectados por procesos relacionados con la dinámica erosiva fluvial, al igual que las pilas del tramo medio del puente.

Los riesgos en ambas márgenes y en el terraplén del puente sobre la avenida Ingenieros se evaluaron considerando los diversos factores vinculados con la dinámica fluvial del río Arenales. Además, se consideraron los efectos relacionados con el componente topográfico, la acción antrópica y la dinámica pluvial vinculada con los cursos de agua, temporales, procedentes del cerro La Pedrera.

## UBICACIÓN

El sector donde se realizó el análisis, correspondiente al acceso circunvalación SE, se encuentra ubicado en el Valle de Lerma de la ciudad capital de la provincia de Salta. Se sitúa en el extremo septentrional de la ciudad de Salta entre los siguientes valores de coordenadas: al NE (24° 50' 30,41" S - 65° 22' 25,12" O), al SE (24° 50' 32,57" S - 65° 22' 25,08" O), al SO (24° 50' 2,48" S - 65° 22' 29,50" O), al NO (24° 50' 31" S - 65° 22' 29,44" O).

El puente que cruza transversalmente el río Arenales, que escurre con dirección N-S, limita al NE con el Parque Industrial, al NO con tierras fiscales, al E con las Sierras de Mojotoro, al O con parcelas pertenecientes a la provincia, antiguamente usadas como cavas para la extracción de arcillas, y al S con el ex vertedero de Finca la Angostura (Figura 1).

## ANTECEDENTES

Existen diferentes trabajos en los que se efectuó la caracterización geológica y geomorfológica de la provincia de Salta, incluyendo el geoambiente (Igarzábal, 1991, 1992; Perucca, 1993; Sastre, 1993). Otros incluyen la neotectónica, el riesgo geológico e impacto ambiental de la ciudad de Salta (Marcuzzi et al., 1996, 2018).

En el tramo medio de la serranía de Mojotoro, en sectores próximos a la zona de trabajo, se efectuaron mediciones topográficas para la determinación de la progresión de geoformas resultantes del accionar de procesos de remoción en masa y la dinámica hídrica (Quispe et al., 2015, 2018). Se efectuaron, además, estudios relacionados a la contaminación del río Arenales y a la

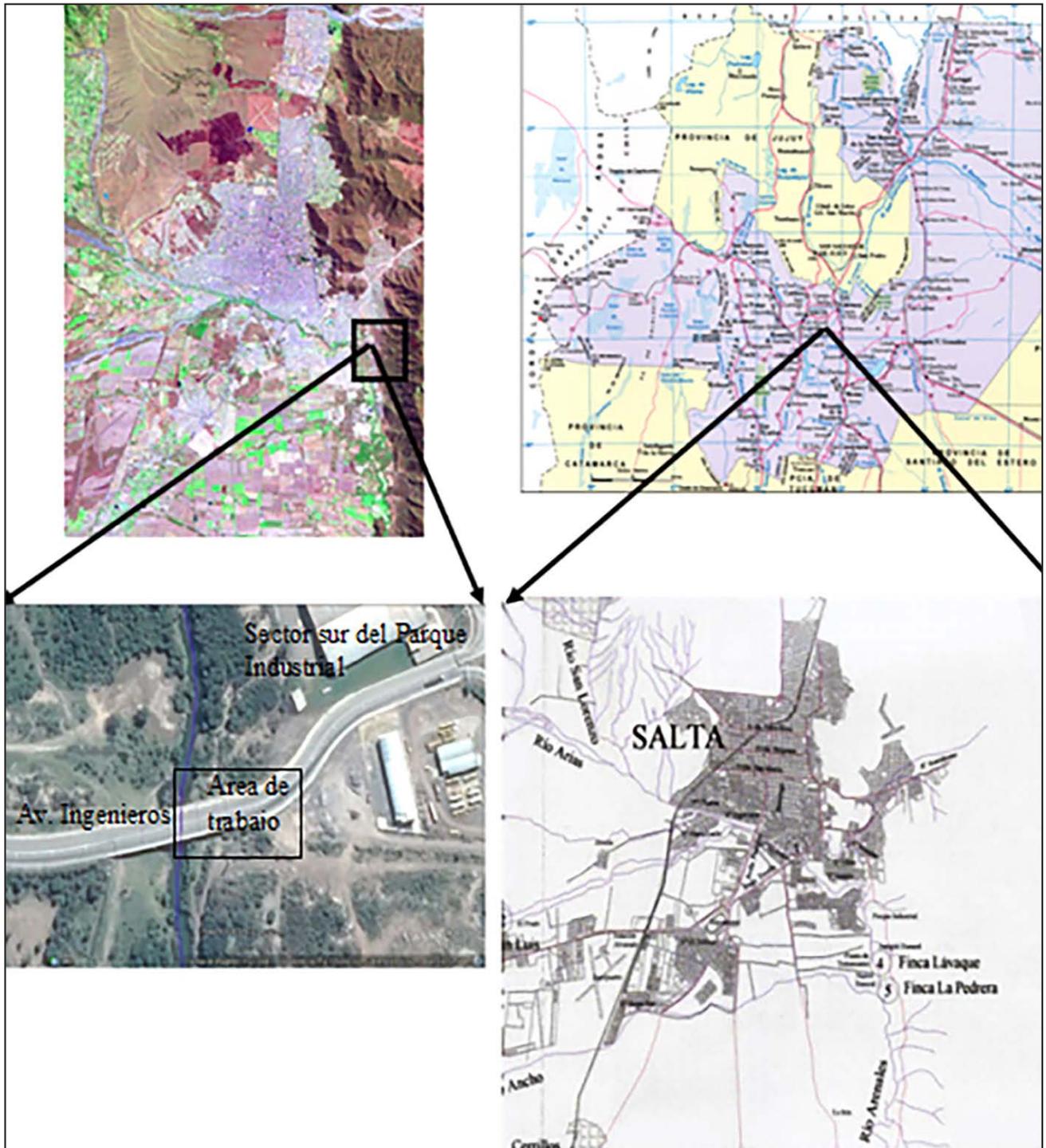


Figura 1. Ubicación del puente del río Arenales en el acceso circunvalación SE de la ciudad de Salta, Capital.

disposición, tratamiento y recuperación de un ex vertedero ubicado en las proximidades de la cárcava principal (Musso, 2001; Saiquita, 2008; Sastre, 2000).

**GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

El área de análisis se ubica en la Unidad Morfoestructural de Cordillera Oriental (Turner y Mon, 1979). El marco geológico, en este sector, está conformado por rocas correspondientes

al basamento de edad Precámbrico-Eocámbrico, Formación Puncovicana (Turner 1972); al paleozoico inferior, Cámbrico y Ordovícico, Grupos Mesón y Santa Victoria, respectivamente. Discordantemente se disponen sedimentitas Terciarias del Grupo Orán (Subgrupo Jujuy) y depósitos Cuaternarios. En la Tabla N° 1, se describe la estratigrafía de las rocas y sedimentos que constituyen cada una de las unidades formacionales representadas en la Figura 2, correspondiente al Mapa Geológico de la zona de análisis.

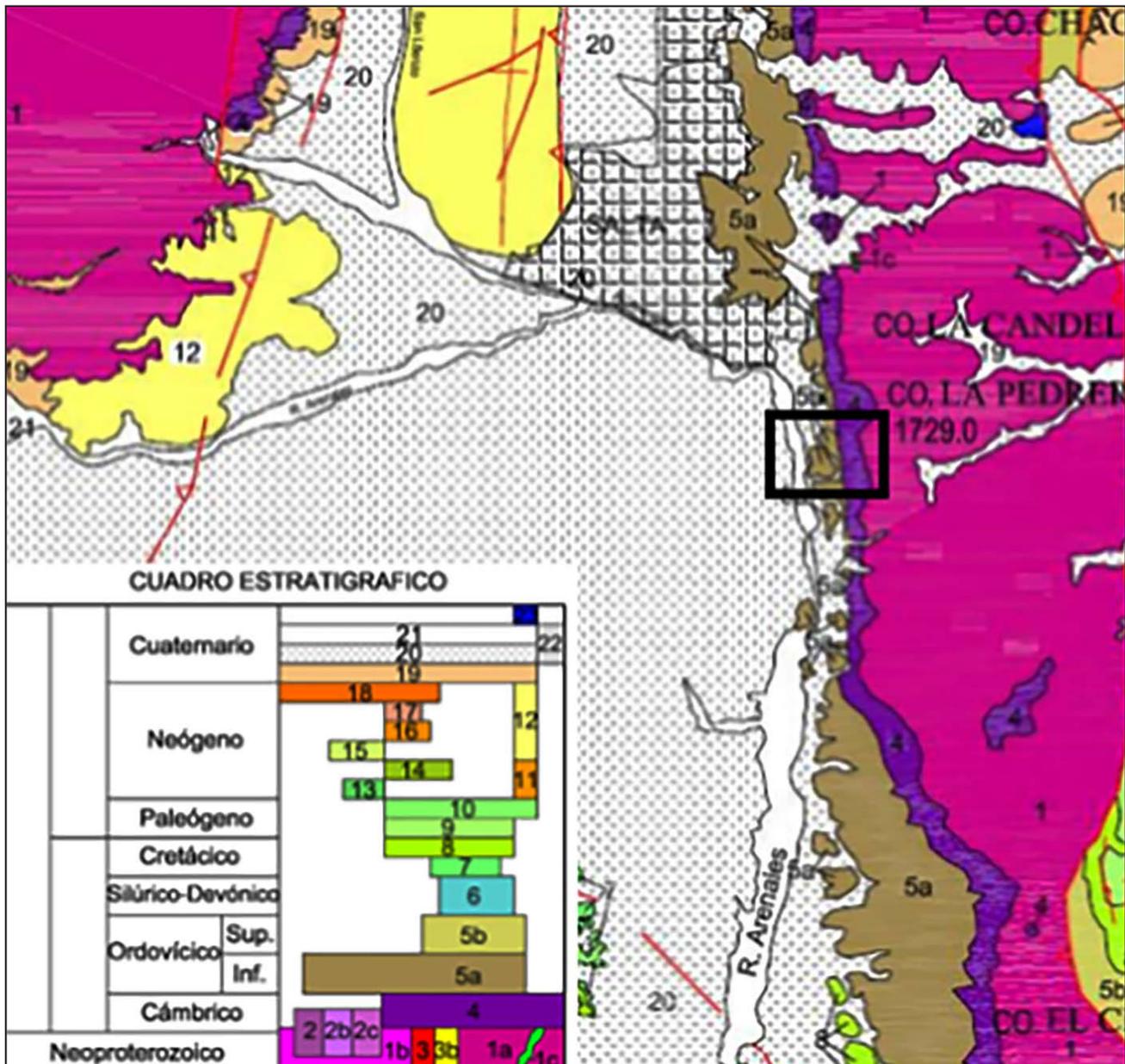


Figura 2. Geología del área de trabajo, extractado de la Hoja Geológica Salta, 2015.

Tabla 1. Estratigrafía y litología del área de estudio.

Era	Período		Estratigrafía y características geomorfológicas
Cenozoica	Cuaternario		Depósitos lacustres: Arcillas y margas. Depósitos fluviales-aluviales: Lutitas, areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados. Depósitos de llanura de inundación-cauce actual
	Terciario Superior	Grupo Orán Subgrupo Jujuy	Depósitos terrazados: Constituidos de base a techo por lutitas, areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados.
Paleozoica	Ordovícico		Grupo Santa Victoria: Lutitas y arcillitas arenosas.
	Cámbrico		Grupo Mesón (Formación Campanario): Areniscas cuarcíticas y cuarcitas.
Precámbrico-Eocámbrico	Precámbrico		Formación Puncoviscana: Pizarras, grauwacas y areniscas cuarcíticas.

Se describen las formaciones terciarias y cuaternarias identificadas en los sectores afectados por la obra de circunvalación este, la autopista y el puente. Los sedimentos terciarios corresponden a los dos niveles de terrazas identificadas en la margen derecha del río Arenales. Los depósitos cuaternarios fluviales-aluviales y los depósitos lacustres coinciden con las unidades descriptas por *Gallardo et al. 1985*, correspondientes a las Formaciones Tajamar y La Viña, las que, en la zona de estudio, son afectadas por los procesos de erosión retrocedente y erosión fluvial.

### Terciario superior

#### Depósitos terrazados

Están representados por los dos niveles de terrazas que se ubican en la margen derecha del cauce actual del río Arenales. La secuencia estratigráfica está constituida, de la base al techo, por grava de muy baja selección, con matriz limo arenosa y estratificación interna. En la zona de análisis solo el nivel inferior de terrazas está afectado por la acción erosiva del cauce (Figura 3).



Figura 3. a) Niveles de terrazas en la margen derecha del río Arenales, b) Secuencia estratigráfica en el primer nivel de terrazas.

### Cuaternario

#### Depósitos fluvio aluviales

##### *Formación Tajamar*

La Formación Tajamar fue identificada en la cárcava principal, sobre la margen izquierda del río Arenales. La secuencia estratigráfica está caracterizada, en la parte basal, por limolitas y arcillitas alternantes, con estratificación fina a mediana y niveles de concreciones calcáreas. En la parte media hay intercalaciones de arenas con estructuras sedimentarias (laminación paralela y ondulítica) dispuestas en cuerpos tabulares finos a medianos. Hacia el techo predominan las facies arenosas con intercalaciones de facies pelíticas. La Figura 4, muestra la secuencia del carcavamiento desde 2015 al 2018. La Figura 4 muestra la etapa inicial del carcavamiento, de fecha marzo de 2015 (4a) y la evolución en ancho y profundidad (4b y 4c) apreciando en las mismas la parte media y cuspidal de la formación Tajamar. La Figura 4b fue obtenida en abril de 2016 y la Figura 4c en mayo de 2018.

En el afloramiento descubierto por la erosión se reconocieron líneas de escurrimiento subsuperficial, las que aceleran la evolución del carcavamiento.

##### *Formación La Viña*

En el área de análisis fue identificada suprayaciendo a los sedimentos de la Formación Tajamar, en las secuencias expuestas en la cárcava de la margen izquierda del río Arenales.

Composicionalmente esta formación muestra variaciones laterales y verticales, caracterizándose por facies gruesas y finas. Formando parte de las primeras se reconocieron, de la base al techo, grava de muy baja selección con matriz sostén; gravas bien seleccionadas con escasa matriz y gravas con estratificación interna plana y abundante matriz areno-limoso. La facies fina está representada por depósitos de limos y arcillas. Ésta última, constituyó el sustrato de la cava utilizada y rellena como un basal, conocido como ex vertedero de Finca la Angostura, ubicado al sur de la cárcava principal de la margen izquierda del río Arenales. La Figura 5, muestra la facies gruesa de la unidad basal de la Formación La Viña y la Figura 6, la facies fina. Ésta última está representada en el perfil de una cava situada detrás de las terrazas de la margen derecha del río. La cava forma parte de una explotación a cielo abierto realizada para la extracción de arcillas.



Figura 4, a, b y c. Progresión del cárcavamiento, en la margen izquierda del puente del río Arenales.



Figura 5. Facies gruesa de la unidad basal de la Formación La Viña.



Figura 6. Facies pelítica de la Formación La Viña.



Figura 7. Surcos de erosión en la margen derecha del río Arenales.

### *Depósitos de llanura de inundación-cauce actual*

Los depósitos cuaternarios que constituyen la llanura de inundación del cauce actual del río Arenales están representados por clastos de grava, arena, limo y arcilla, procedentes de las áreas de aporte precámbricas, cámbricas, ordovícicas y terciarias que forman parte de los relieves de la cuenca de procedencia.

La erosión retrocedente producida por el escurrimiento concentrado en la temporada estival, durante la ocurrencia de lluvias torrenciales, provoca surcos de erosión y cárcavas de profundidades y anchos variables que afectan la estabilidad de las pilas del puente. La Figura 7 muestra dos tomas en las que se aprecian cómo evolucionan las cárcavas y sus efectos en las pilas del puente.

La influencia geoambiental que provocan los procesos de erosión, tanto en el terreno próximo al terraplén del puente del río Arenales como en la llanura de inundación (ambos márgenes), es evaluada en la sección correspondiente a los estudios topográficos.

### **ACCIONES ANTRÓPICAS QUE IMPACTAN EN EL SECTOR DE ANÁLISIS**

El área de análisis se encuentra degradada por la actividad antrópica, la que provoca impactos negativos en el ambiente. Se mencionan a continuación las que se destacan.

Alteraciones en el relieve, como resultado de la construcción del puente de Avenida Ingenieros. La ejecución de la citada obra modificó la topografía del lugar debido a la construcción de la obra civil. Los terraplenes que sostienen los estribos y las pilas del puente fueron construidos en superficies no estables litológica y espacialmente (formaciones terciarias y cuaternarias), lo que favorece el impacto producido por la erosión hídrica.

Impactos sobre el río Arenales, que en ambos márgenes del recorrido en el ejido urbano incluye en ambos márgenes áreas destinadas a la agricultura, granjas destinadas a la producción avícola o tambera y a la urbanización. En el sector analizado se destaca la actividad ganadera, que provoca en algunos sectores la compactación y en otros la remoción del material aluvional con pérdida y acumulación de material.

En la margen izquierda del río Arenales se puede apreciar la proximidad de la obra civil al talud del ex vertedero. Esta proximidad es producto en el tramo superior del carcavamiento y en el tramo medio e inferior del desmonte realizado para la ejecución de la obra civil. En la Figura 8, la que muestra el estribo este del puente del río Arenales ingresando a la ciudad desde el norte por la circunvalación este, la flecha indica la dirección de escurrimiento desde el cerro La Pedrera en dirección al río Arenales nivel de base de los cursos temporales y principales colectores.



**Figura 8. Estribo este del puente del río Arenales y talud norte del ex vertedero.**

A 1 m del estribo del estribo del puente se encuentra el talud norte del ex vertedero de Finca la Angostura. En este sector la erosión hídrica provoca la desestabilización parcial del talud norte y oeste del ex vertedero y la exposición de los residuos.

La Figura 9 muestra el talud oeste del ex vertedero, erosionado por la dinámica fluvial. De acuerdo a *Saiquita, 2008*, en el ex basural el sistema de saneamiento que se ejecutó para el tratamiento de los residuos fue inadecuado, sin la correcta compactación y cobertura de los residuos sólidos urbanos acumulados, situación que queda evidenciada en la exposición de los taludes. Es frecuente que con posterioridad al desenlace de lluvias torrenciales, los residuos removidos sean depositados por la corriente en las ramas de los árboles de la margen derecha. Estos tienen una altura aproximada de 2 m y los residuos son depositados a un metro con respecto del talweg, lo que indica la dinámica erosiva de la corriente fluvial. La Figura 10 muestra los residuos acumulados en la margen derecha del cauce.

En la llanura de inundación de esta margen, se construyeron 4 pilas, las que son afectadas por la erosión fluvial la que deja al descubierto parcialmente las fundaciones. Parte del material erosionado es depositado temporalmente debajo del puente, en la llanura de inundación. Este material es transportado por la corriente fluvial elevando el nivel de base local, embalse General Belgrano (dique Cabra Corral). En ambas márgenes, sólo el segundo nivel de terrazas está afectado por la erosión fluvial.

El ex vertedero de Finca La Angostura se encuentra totalmente abandonado. No existen carteles indicadores que adviertan su clausura y tampoco la prohibición de depositar desechos. Según *Saiquita, 2008*, el mismo no posee un plan de monitoreo periódico, tarea que es de vital importancia si la pretensión del municipio es reinsertar el área al entorno paisajístico.

La acumulación de residuos sólidos sobre la superficie y en proximidades del ex vertedero genera microbasurales, con la presencia de roedores, palomas, perros y artrópodos afectando al ambiente en una situación que se incrementa con la quema de los residuos. Se detectaron en la población próxima al ex vertedero complicaciones respiratorias y en la piel (*Saiquita, 2008*).

En la margen derecha del río Arenales, sobre la que se ubican cuatro de las doce pilas correspondientes a la obra vial, al incrementarse el volumen del curso de agua en la época estival y el posterior desecamiento se provoca una reacomodación y deformación del material que cubre la fundación de las pilas y el estribo. Este proceso genera fracturas en el material favoreciendo el posterior carcavamiento (Figura 7).

## ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

### Metodología

Para este estudio se realizaron salidas de campo que permitieron ubicar en ambas márgenes sectores con evidencias de erosión, los que fueron considerados como las zonas críticas en el área de interés debido a la incidencia que los surcos y las cárcavas provocan en las obras civiles. Posteriormente se efectuó la recopilación de antecedentes, con la finalidad de analizar la información vinculada con los problemas identificados, las características geoambientales y las modificaciones que tuvieron lugar en el área de trabajo.

La toma y gestión de los datos recopilados, mediciones, significó organizar un grupo de trabajo que periódicamente eligiera las áreas a relevar, con la finalidad de obtener medidas suficientes para efectuar posteriormente cálculos y comparaciones.



Figura 9. Talud oeste.

Entre los datos de interés se consideraron los siguientes:

- Extensión este-oeste del levantamiento (perfil longitudinal): 237,46 m
- Extensión norte-sur (perfil transversal de mayor longitud): 69,12 m
- Altura aproximada del puente: 7,40 m
- Longitud del puente: 100 m
- Distancia entre estribos: 96,80 m

En los trabajos de medición se emplearon instrumentos geodésicos, dos taquímetros, uno de marca LEICA TC403L con precisión tanto angular como lineal, la primera de 10" y la segunda de (3 mm + 3 p.p.m.), con alcance de 1.300 m con un prisma y 2.000 m con tres prismas. El otro taquímetro de marca SOKKIA S50RX con puntero laser, precisión angular de 5" y lineal de (2 mm + 2 p.p.m.), pudiendo efectuar mediciones sin prisma a una distancia de 400 m. Con un prisma el alcance es de 5.000 m. Ambos instrumentos poseen prisma de precisión y un procesador interno de datos para la evaluación de las observaciones (cálculo de coordenadas X, Y, Z, distancias horizontales,



**Figura 10. Residuos acumulados por la corriente.**

inclinada y desnivel). Se empleó también un navegador GPS marca GARMIN eTrex, memoria 24 Mb, precisión de 15 m, tiempo mínimo de adquisición de datos de unos 15", tarjeta micro SD para la transferencia de datos y un cable USB para la conexión a la PC. Este receptor GPS puede ser configurado para que indique las coordenadas Gauss Krüger. Además, se usó una cámara fotográfica marca Panasonic, modelo DMC-FS 42 con sensor de 3.648 x 2.736 pixeles (10 MP), objetivo con zoom de 4x, memoria interna y una tarjeta SD.

Las estaciones totales permitieron efectuar relevamientos en diferentes condiciones de tiempo. La accesibilidad, visibilidad y el levantamiento de tramos cortos, determinados por las irregularidades topográficas del terreno, permitieron la aplicación del método de visual convencional, es decir, un operador en el instrumento apuntando a un prisma adosado a un bastón con su porta prisma, garantizando un trabajo óptimo con precisión de las medidas según lo descrito para cada instrumento.

Los trabajos efectuados fueron los siguientes:

- Reconocimiento y selección de los sectores afectados.
- Registro fotográfico.
- Materialización de puntos fijos.
- Determinación de coordenadas de puntos fijos.
- Determinación taquimétrica de coordenadas de cada punto relevado.
- Relevamiento taquimétrico de áreas con variaciones de volúmenes.
- Levantamiento de perfiles.
- Generación y actualización de una base de datos.

- Confección de planos con resultados de diferentes períodos de levantamiento.
- Cálculos de los volúmenes de sedimentos desplazados o acumulados.

A continuación, se describen las tareas reseñadas:

- 1) El reconocimiento inicial, que se efectuó en marzo de 2015, permitió distinguir una cárcava incipiente y sectores afectados por cicatrices erosivas y por consiguiente la necesidad de realizar un análisis topográfico, el que se ejecutó antes y después de la época estival, desde noviembre de 2015 a diciembre de 2018, a los efectos de confeccionar planos comparativos. En total se realizaron 9 campañas topográficas, de las cuales 2 fueron de reconocimiento (marzo de 2015 y abril de 2016) y 7 de levantamientos topográficos.
- 2) Las tomas fotográficas permitieron obtener un registro de imágenes cuya principal ventaja es la captación rápida de las diferentes situaciones y cambios observados.
- 3) La materialización de puntos fijos, en lugares estratégicos y adecuados de manera tal que se conservaran en el transcurso del tiempo, permitió efectuar los relevamientos en diferentes períodos. Estos puntos fijos, de coordenadas predeterminadas, sirvieron de apoyo tanto para el levantamiento de perfiles como para el relevamiento planialtimétrico. La Figura 11 corresponde al denominado, en la secuencia de trabajo, Perfil Transversal N° 1, 2015-2016, realizado en el tramo inicial de la cárcava. En el plano, la denominación Cota I corresponde al relevamiento efectuado en noviembre de 2015 y Cota II en junio de 2016. La traza del Perfil Transversal está representada, en planta, en la Figura 12.

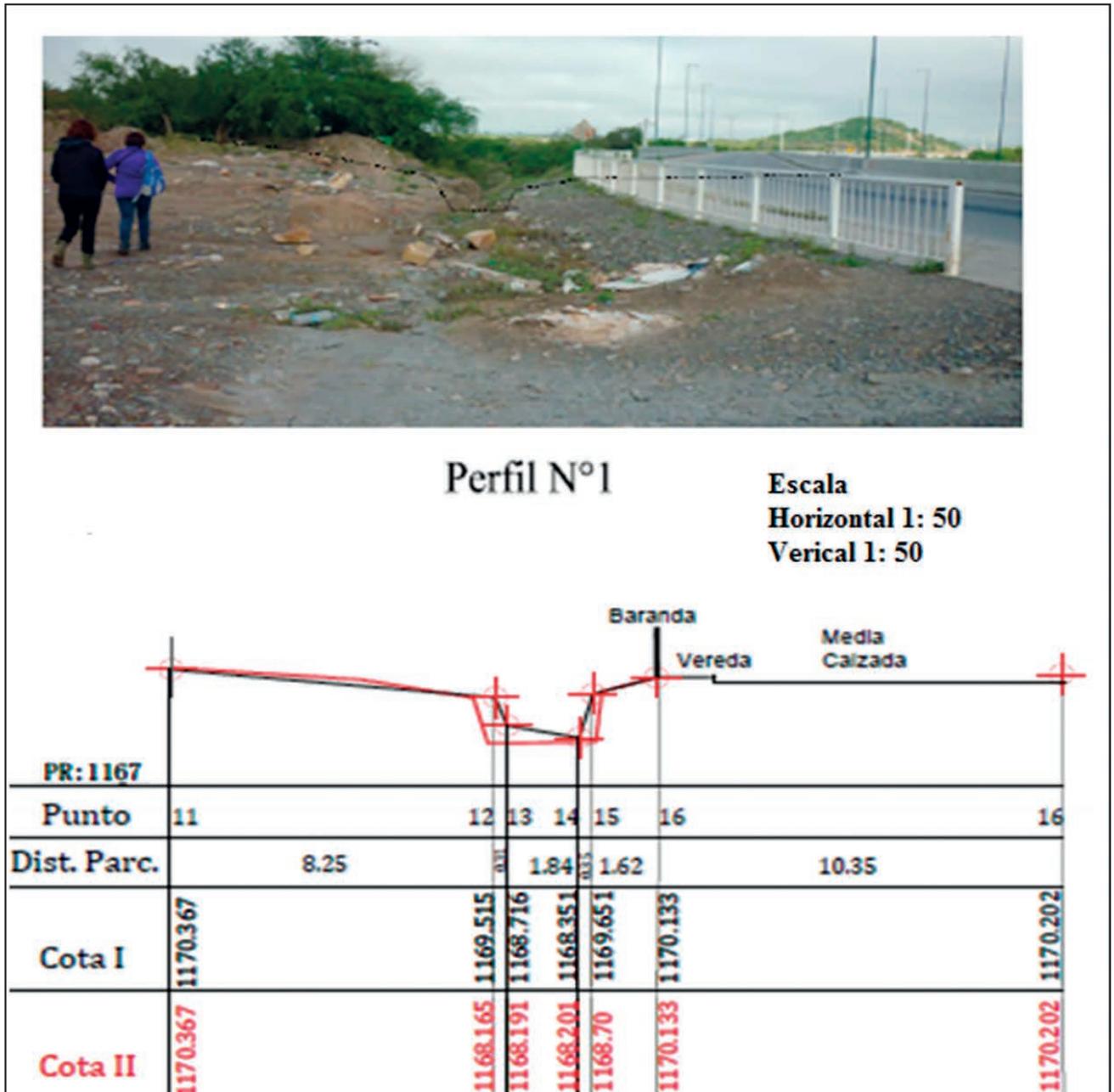


Figura 11. Perfil transversal N° 1, 2015-2016.

- 4) Debido a la ausencia, en las proximidades del lugar de trabajo, de marcas con coordenadas (x, y, z) conocidas para vincular los puntos a relevar a un sistema de coordenadas es que los valores iniciales de trabajo, correspondientes a las dos primeras estaciones, fueron determinados con un navegador GPS. Éstas fueron consideradas al centímetro como datos iniciales para el relevamiento con estación total. La posición planialtimétrica (x, y, z) de las restantes estaciones se obtuvieron con el taquímetro electrónico.
- 5) La posición relativa (x, y, z) de cada punto relevado se determinó mediante un programa interno del taquímetro electrónico. Las coordenadas de las dos primeras estaciones se determinaron con el navegador GPS y aun cuando este instrumento no posee la precisión de medición de las estaciones totales se empleó con la finalidad de establecer un único sistema de coordenadas. Todos los resultados fueron considerados al centímetro.
- 6) El reconocimiento efectuado en la etapa inicial del trabajo (marzo de 2015) permitió detectar, en una primera instancia, la formación de surcos evidenciando cicatrices que marcarían futuros desmoronamientos y posteriormente el desarrollo de cárcavas a partir de la erosión retrocedente. La distancia entre la cárcava y la infraestructura vial varía según el detalle de las Tablas 2 y 3. Las cicatrices próximas a las cárcavas definieron los sectores de levantamiento para los análisis de las variaciones del volumen removidos a través del tiempo.
- 7) Para el levantamiento de los perfiles o secciones transversales se trazó, inicialmente, un eje longitudinal.

Estos permitieron calcular la pérdida y/o acumulación de sedimentos, midiendo las variaciones en altura y amplitud de la erosión.

- 8) Las medidas iniciales de campo proporcionaron resultados suficientes para la elaboración de una primera base de datos, la que se complementó, comparó y actualizó durante los sucesivos relevamientos.
- 9) Las medidas, obtenidas de los ítems anteriores, fueron suficientes para efectuar tanto la confección de un plano con curvas de nivel y planos de un perfil longitudinal

y sus correspondientes perfiles transversales, elaborados a escala adecuada (noviembre 2015-junio 2016) (Figuras 12 y 13).

- 10) El cálculo de volumen se efectuó empleando el Método de la Sección Media. Este método, aplicado en dos secciones sucesivas, ya sea en corte o en relleno, se funda en la hipótesis que el volumen entre dos perfiles transversales consecutivos es la media de ambas superficies multiplicadas por la distancia entre las mismas.

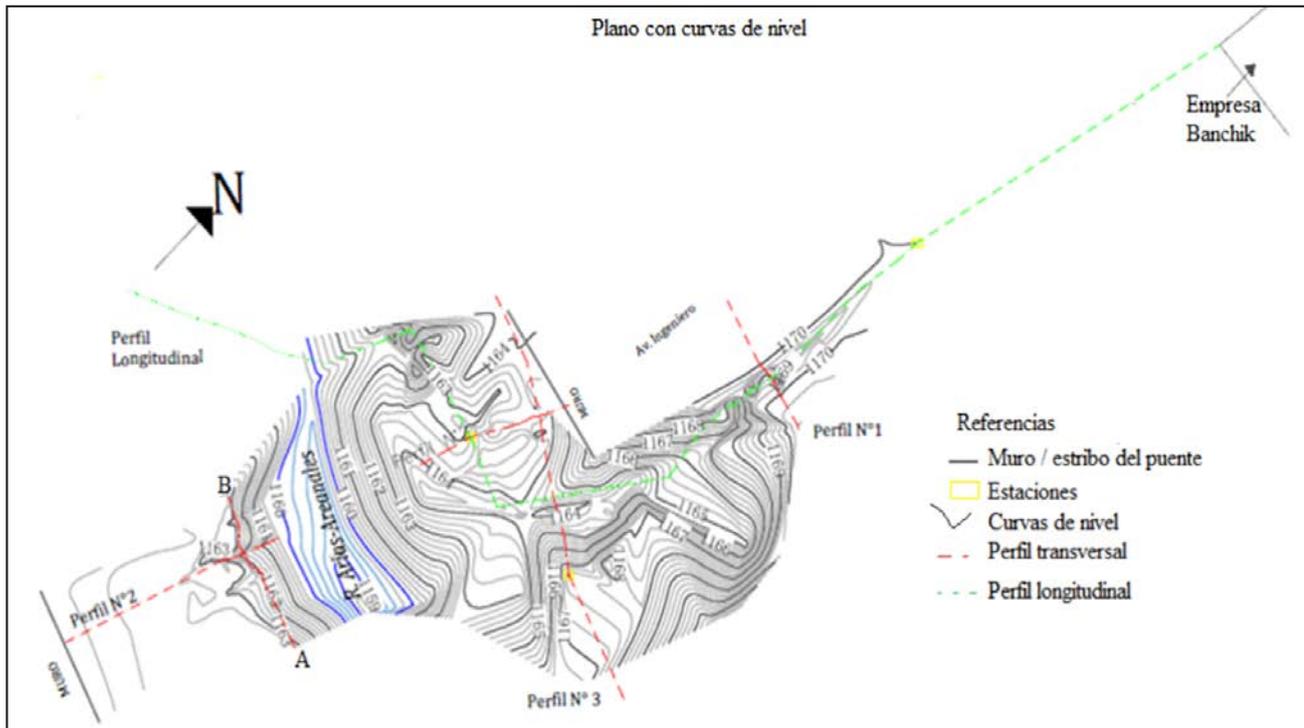


Figura 12. Plano con curvas de nivel de la zona de análisis.

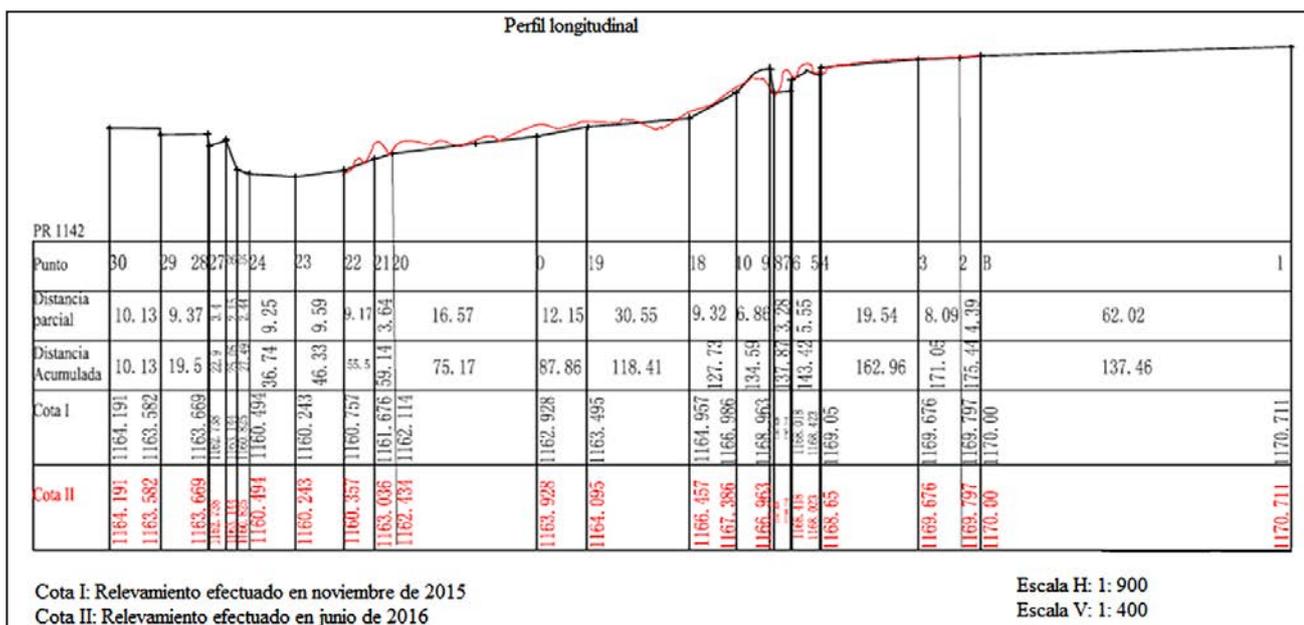


Figura 13. Perfil longitudinal de la zona de análisis.

La expresión empleada para cuantificar la pérdida de suelo va a depender de la forma de la cárcava. En general cada sección contemplada configura una forma de trapecio, lo cual lleva a considerar la amplitud de la parte superior de la cárcava, la amplitud del fondo y la profundidad. Los resultados que se obtienen aplicando este procedimiento son aproximados ya que sólo se miden puntos representativos del perfil. La Figura 14 muestra la forma geométrica en dos secciones consecutivas.

## RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron aplicando estudios topográficos se realizaron sobre la base de la comparación entre las mediciones efectuadas desde noviembre de 2015 hasta diciembre de 2018 en la cárcava de la margen izquierda y en las cárcavas de la margen derecha.

### Margen izquierda del río

Los indicios de la erosión retrocedente, detectados durante el primer reconocimiento efectuado en marzo de 2015, permitieron establecer los sectores donde se eligió el lugar de inicio de las

mediciones planialtimétricas y realización del trazado de perfiles, Figura 15.

Como resultado de los levantamientos efectuados en noviembre de 2015, mayo y junio de 2016 se confeccionó el Perfil Transversal N° 1 (*Paniagua Ortiz, 2016*) que se muestra en la Figura 11. Sobre esta base se compararon los perfiles del 2018.

Las notables modificaciones del terreno observadas durante el relevamiento efectuado en diciembre de 2018 requirieron, en un tramo de 7,80 m, del trazado de tres perfiles transversales. El primero al inicio del carcamaviento, coincidente con la erosión al que se denominó Perfil N° 3a, el segundo, Perfil N° 2a, a 5,26 m del primero y el tercero, Perfil N° 1 (coincidente con el Perfil N°1 del 2015, Figura N° 12) a 2,54 m del segundo. Se describen el Perfil N° 1a y el N° 3a. El N° 1 por la notable variación en amplitud y profundidad y el N° 3a por corresponder al tramo o sector de inicio.

Perfil N° 1: Se ubica entre el talud del ex-vertedero y la traza de circunvalación sureste. Para la comparación entre las mediciones realizadas en noviembre de 2015 y las de diciembre de 2018, se confeccionó el Perfil de la Figura N° 16.

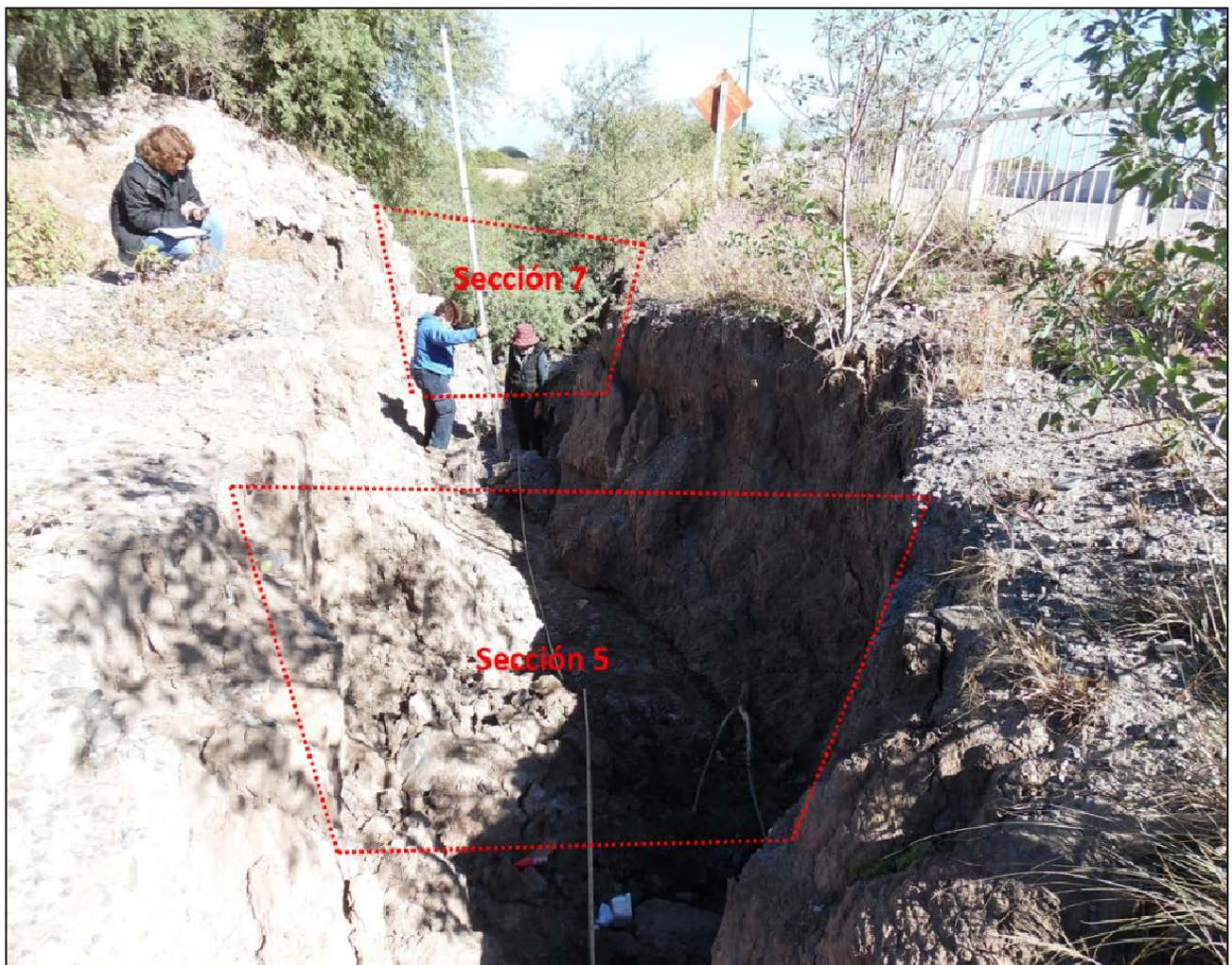


Figura 14. Formas geométricas en dos secciones consecutivas.

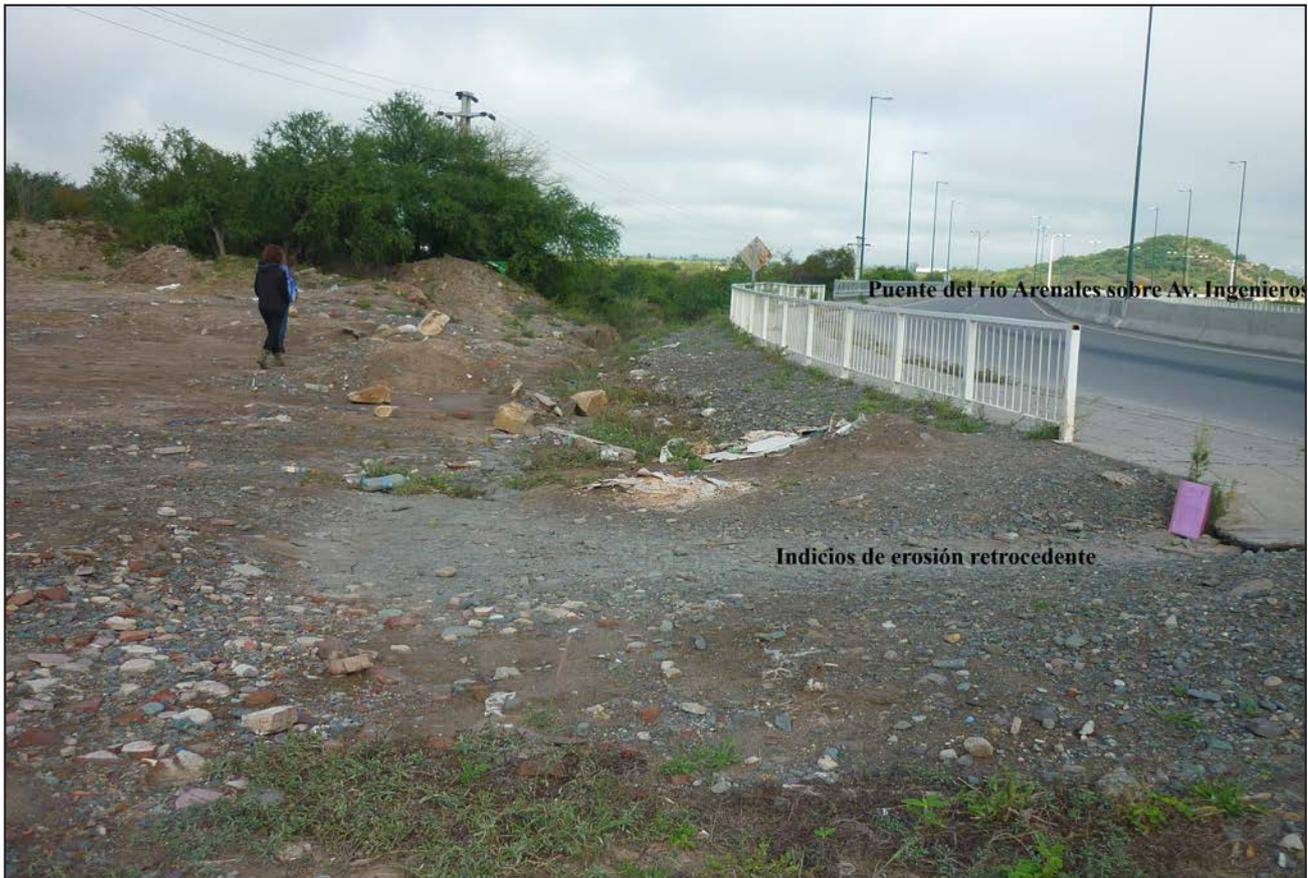


Figura 15. Evidencias de la erosión retrocedente.

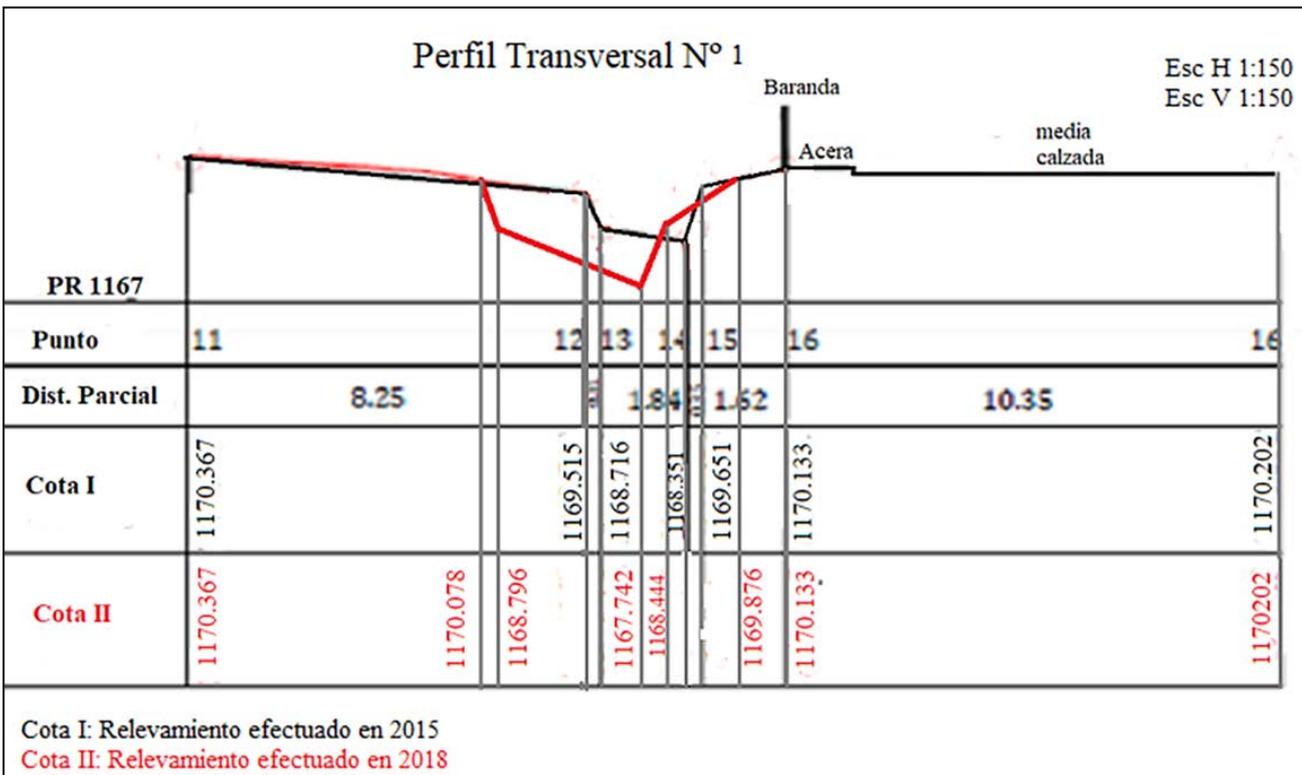


Figura 16. Perfil transversal N° 1. Variación en amplitud y profundidad, entre 2015 y 2018.

La distancia medida entre la margen derecha de la cárcava a la acera fue de 1,62 m. En 2016 se comprobó que la distancia disminuyó a 1,40 m; en mayo de 2018 llegó a 1,20 m y en diciembre del mismo año alcanzó 1,06 m. En el lapso antes y después de la época estival, 2015-2016, la amplitud se modificó de 2,40 m a 3,25 m; en mayo de 2018 alcanzó 4,70 m y en el último levantamiento efectuado en 2018 llegó a 5,83 m. Las profundidades determinadas en los mismos períodos fueron: -1,30m (2015); -1,65 m (2016); -2,50 m (mayo 2018). En diciembre de 2018, se observó la acumulación de sedimentos sobre la margen derecha de la cárcava, alterando el valor de la cota y por consiguiente modificando la profundidad a -2,10 m (Tabla 2).

**Tabla 2. Resultados comparativos del perfil transversal 1.**

Fecha	Distancia a acera (m)	Profundidad (m)	Amplitud (m)
Noviembre 2015	1,62	-1,30	2,40
Junio 2016	1,40	-1,65	3,25
Mayo 2018	1,20	-2,50	4,70
Diciembre 2018	1,06	-2,10	5,83

Perfil N° 3a: Para la confección del plano y análisis de las variaciones en amplitud y profundidad, el Perfil N° 3a que representa la situación en junio de 2016 se dibujó a partir de las curvas de nivel y se comparó con las mediciones realizadas en diciembre de 2018 (Figura 17).

De los resultados obtenidos y comparados se determinó que la distancia desde la cárcava a la acera fue de 1,88 m, la profundidad -0,50 m y la amplitud de 1,66 m. En mayo de 2018 se midió nuevamente este perfil, determinándose que la distancia de la cárcava a la acera de la avenida se modificó alcanzando 1,50 m, la amplitud aumentó a 2,10 m y la profundidad -0,86 m.

En diciembre de 2018, luego de lluvias torrenciales, se detectaron nuevas alteraciones variando la profundidad a -2,30 m (Tabla 3).

**Tabla 3. Resultados obtenidos entre 2016 y 2018, del Perfil Transversal N° 3a.**

Fecha	Distancia a acera (m)	Profundidad (m)	Amplitud (m)
Junio 2016	1,88	-0,50	1,66
Mayo 2018	1,50	-0,86	2,10
Diciembre 2018	1,50	-2,30	2,10

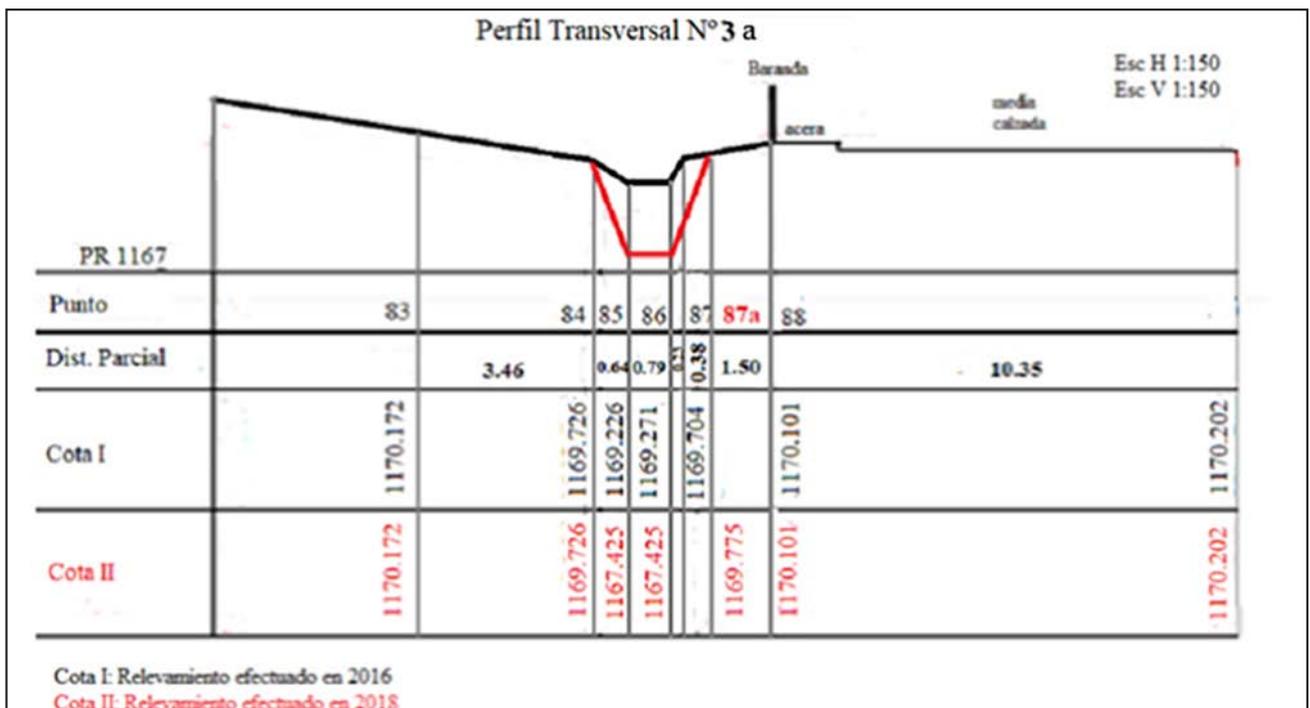
La Figura 18, a y b, muestra la evolución de la cárcava del Perfil N° 3a desde 2016 a mayo 2018. En b, el jalón indica la variación en depresión.

Del análisis de los tres perfiles transversales se determinó que el volumen desplazado en el período 2015- 2018 alcanzó los 13 m<sup>3</sup>, en un tramo de 7,80m, determinándose además una acumulación de sedimentos de 0,50 m<sup>3</sup>.

En el trayecto definido por la cárcava los tubos de subfusión y las cicatrices de desplome indican la potencialidad de futuros desprendimientos, los que modificarían el valor de las cotas y amplitud de la misma.

Además, se detectaron, en esta margen y sobre la llanura de inundación (próximas a las pilas del puente), sectores de acumulación de sedimentos provenientes tanto de la erosión de la cárcava como de la socavación de los taludes del ex-vertedero. En 2015-2016 se midió un desnivel -1,96 m y en 2018 de -1,40 m.

La erosión fluvial amplió, debajo del puente y próximo al canal de estiaje, una cárcava de 1,60 m en 2015 a 2,80 m en 2018, y en profundidad de -0,75 m a -1,40 m en los períodos citados.



**Figura 17. Perfil N° 3a. Variación en amplitud y profundidad, junio de 2016 y diciembre 2018.**



Figura 18. Evolución de la cárcava, periodo mayo 2016- mayo 2018.

### Margen derecha del río

En el período 2015-2016 se observó la formación de tres cárcavas contiguas a las pilas del puente exponiéndolas a la erosión fluvial, con el riesgo de afectar la estabilidad de las cimentaciones (Figura 19). La de mayor relevancia con -0,80 m de profundidad y una amplitud de 6 m. El volumen desplazado en la cárcava N° 1 fue de 4 m<sup>3</sup>; en la cárcava N° 2 de 5 m<sup>3</sup> y en la cárcava N° 3 de 1 m<sup>3</sup>. La Figura 20 corresponde al Perfil A-B ubicado en planta en la Figura 12.

### INTERPRETACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las dos campañas iniciales de reconocimiento, efectuadas en marzo y fines de octubre de 2015, permitieron descubrir una alteración en la forma del terreno en el lapso de tiempo comprendido entre el período de estiaje y el inicio de período de lluvias. Este cambio en la morfología, aunque tenue a simple vista, pero con signos tales como tubos de subfusión y cicatrices, que son indicativos de una alteración mayor, prefijaron la necesidad de efectuar un estudio a los fines de establecer la magnitud de los cambios.

El Método de la Sección Media, elegido para el cálculo de volumen, no requiere de la medición de punto a punto de la forma del terreno ya que para su aplicación se aproximan las formas de las secciones a una figura geométrica. Esto nos indica que para las mediciones se podría haber elegido otro instrumento, por ejemplo un nivel óptico, acorde a la precisión de los resultados. Pero, la disponibilidad, rapidez en la obtención de los resultados

(x, y, z), además del procesamiento, determinaron la elección de los taquímetros electrónicos LEICA y SOKKIA, aun cuando su precisión es milimétrica.

Con relación a los resultados, en la margen izquierda en un lapso de 3 años, en el tramo inicial del cárcavamiento de 7,80 m, el volumen desplazado fue de 13 m<sup>3</sup>. La última medición efectuada en el sector de mayor amplitud de la cárcava se encuentra a aproximadamente a 1 m de la acera. Los rasgos observados que son indicativos de una mayor modificación en un menor intervalo de tiempo predicen una alteración en el trazado de la avenida en este tramo.

En esta misma margen, los sedimentos provenientes de la cárcava y del talud del ex vertedero son desplazados depositándose una parte de ellos debajo del puente y los restantes en el cauce del río. Todos estos sedimentos son transportados por la corriente al Dique Cabra Corral elevando el nivel de base.

En la margen opuesta las pilas del puente son afectadas por cárcavas. La profundidad y amplitud de las cárcavas son variables, siendo las pilas centrales las más expuestas. Se reconocieron surcos y cicatrices que indican una futura extensión en dirección retrocedente hacia el estribo.

La evolución de las cárcavas en ambas márgenes constituye un riesgo para la obra civil, ya que el incremento de éstas expone las pilas y las fundaciones a la acción erosiva de la corriente fluvial. Dicha acción se ve incrementada en la margen izquierda por la proximidad al ex vertedero y por ser continuas en el tiempo requieren de medidas tendientes a protegerlas.



Figura 19. Cárcavas sobre margen derecha del río Arenales que afectan pilas del puente.

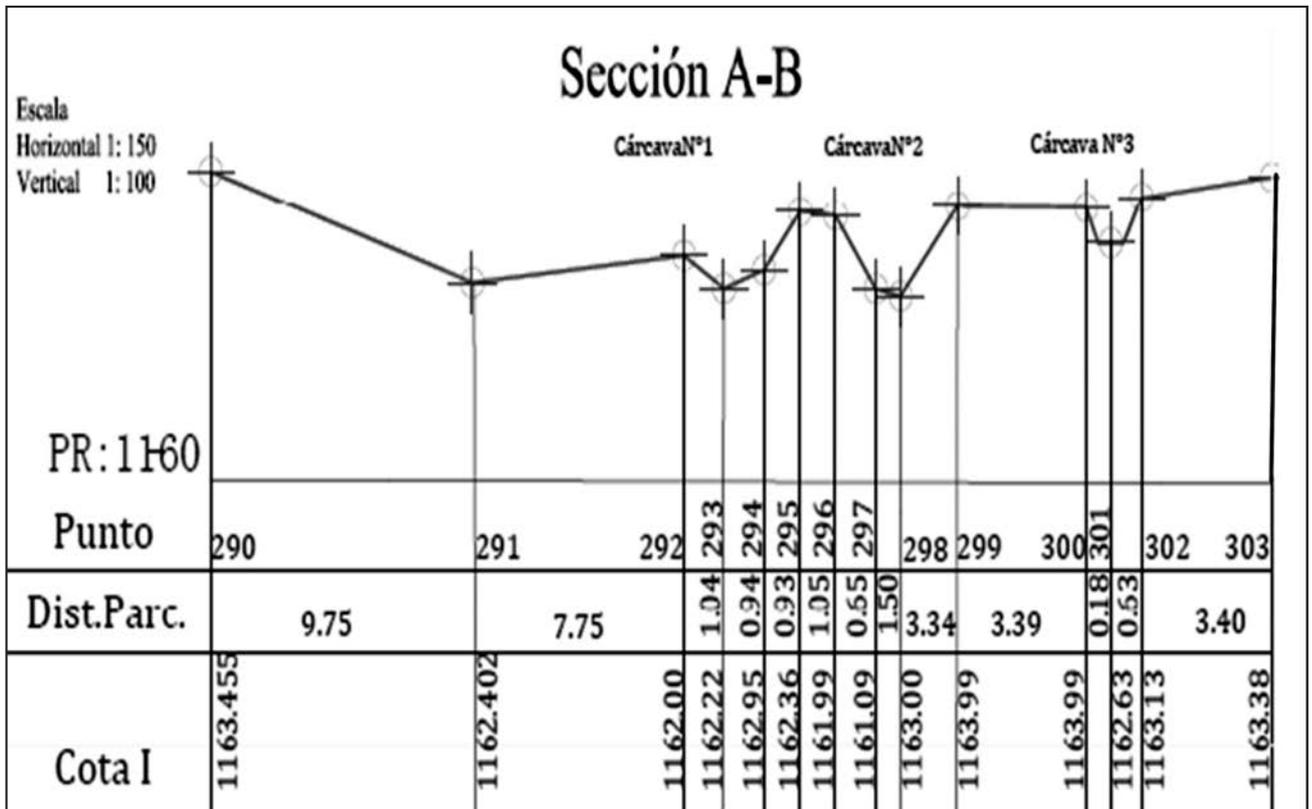


Figura 20. Perfil transversal de las cárcavas ubicadas sobre la margen derecha del río Arenales.

Las características de la zona permiten proponer las siguientes alternativas de mitigación o remediación.

- Para las cárcavas se recomiendan fajinadas y palizadas. En el caso de las cárcavas activas es conveniente desviar el agua que se dirige a ellas mediante un desagüe apropiado (Paniagua, 2016).
- Para estabilizar las laderas del ex basural se podrían utilizar cubiertas vivas y sistemas de confinamiento de suelos. Los riesgos relacionados con la actividad antrópica

en el ex vertedero requieren de controles periódicos o de monitoreos realizados según las normativas vigentes. Esto permitirá evaluar el tiempo de degradación de la materia orgánica y el aprovechamiento de los gases que se generan, además de la colocación de una cubierta vegetal adecuada ya que la cubierta que cubre al ex vertedero es una cubierta natural generada a través del tiempo y no realizada con la finalidad de disminuir el impacto visual y los olores propios de la zona.

## DISCUSIÓN

Si bien existen diferentes trabajos en los que se efectuó la caracterización geológica y geomorfológica de la provincia de Salta (Igarzábal, 1991, 1992; Perucca, 1993; Sastre, 1993; Marcuzzi et al., 1996, 2018), para la individualización del área de trabajo se tuvieron en consideración las unidades morfogénicas que rodean a la ciudad de Salta, Capital, en relación con el río Arenales. Las mediciones topográficas realizadas (Paniagua, 2016, Quispe et al., 2015, 2018), permitieron efectuar comparaciones a través de un período de tiempo de tres años y determinar la progresión de los carcavamientos en un sector de la unidad del este correspondiente al tramo medio de la Sierra de Mojotoro, ubicado en el pie de monte del cerro La Pedrera. Los trabajos específicos (Musso, 2001; Saiquita, 2008; Sastre, 2000) proporcionaron las bases a partir de las cuales se consideraron los riesgos relacionados con la actividad antrópica.

## CONCLUSIONES

En general, desde el punto de vista económico, las alteraciones que afectan a las obras viales, tienen un fuerte impacto en el municipio por las inversiones para reparación, prevención o modificación de las obras.

### Margen izquierda del río

La actividad erosiva incrementó y modificó las dimensiones del carcavamiento medido entre noviembre de 2015 y diciembre de 2018. La profundidad se incrementó en -0.80 m en el sector donde se produjeron las principales variaciones, la amplitud en 3,43 m, la distancia a la avenida se redujo a 1,06 m.

La acumulación de materiales provenientes del carcavamiento y de los taludes del ex vertedero, sobre la llanura de inundación, se incrementó en 0,56 m. Los riesgos que genera esta acumulación son negativos ya que los materiales se incorporan como carga al cauce del río Arenales modificando el nivel de base local (embalse General Manuel Belgrano).

La modificación de la topografía favorece la erosión retrocedente provocando la evolución de un carcavamiento en el estribo de la margen izquierda del río y alrededor de las pilas del puente comprometiendo la estabilidad de la obra civil.

La acción antrópica que generó el inadecuado tratamiento y cobertura de los residuos y la falta de conservación del ex vertedero ubicado a 3 m del terraplén de la Avenida Ingenieros impactan negativamente en el paisaje.

La modificación antrópica del terreno, para la construcción de la obra vial con sus respectivas obras complementarias, provoca alteraciones en el talud norte.

### Margen derecha del río

Los principales riesgos están vinculados con la dinámica fluvial erosiva en la parte media del cauce y en las terrazas. Las pilas y estribos del puente son afectados por el desarrollo de distintos carcavamientos.

Los niveles inferiores de las terrazas de la margen derecha se ven afectados por la erosión en las épocas de crecidas del río, los residuos arrancados de los taludes de la margen izquierda son depositados en la vegetación existente en la ribera y el material erosionado incrementa la carga transportada.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- GALLARDO, E.F. (1985).  
Estratigrafía y tectónica del Cuaternario en la cordillera Oriental de Salta y Jujuy.  
*Beca de Iniciación. Informe Final. Inédito. Salta. CONICET., 90 pp.*
- IGARZABAL, A. (1991).  
Morfología de las Provincias de Salta y Jujuy.  
*Revista del Instituto de Geología y Minería N° 8. pp.97 – 121. UNJu.*
- IGARZABAL, A. (1992).  
Expansión urbana de la ciudad de Salta, riesgos geológicos e impacto ambiental.  
*II Congreso Regional del N.O.A. y su medio ambiente. Salta. UNSa. Consejo de Investigación.*
- MARCUZZI, J.; NADIR, A.; ALONSO, R.; PERALTA, M. Y ARGANARAZ, R. (1996).  
Riesgos Geoambientales y Ordenamiento Territorial del Gran Salta.  
*XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV:463-479.*
- MARCUZZI J, VISICH M, QUISPE C. (2018).  
Análisis del geoambiente e identificación de riesgos en las serranías del este, entre el C° San Bernardo y el C° La Pedrera, ciudad de Salta, Argentina.  
*VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Puerto Madryn. Argentina. ISSN 2591- 6653. Pág. 272.*
- MUSSO, H. E. (2001).  
Contaminación en el río Arenales, su origen y tipo.  
*Universidad Nacional de Salta. Tesis de grado. Inédita.*
- PANIAGUA ORTIZ, M.R. (2016).  
Influencia Geoambiental del cauce del río Arenales en las laderas del Parque Industrial al SE del departamento Capital- Salta.  
*Tesis de grado. Inédita. Facultad de Ciencias Naturales.*
- PERUCCA, L.P. (1993).  
Estudios geomorfológicos y neotectónicos en los abanicos aluviales y bajada piedemonte en el flanco occidental del valle de Lerma.  
*Informe de Pasantía. Inédito. Facultad de Ciencias Naturales. UNSa.*

- QUISPE, C. Y VISICH, M. C. (2015).  
Aplicación de un método topográfico convencional y taquimetría electrónica para el análisis de procesos de remoción en masa.  
*VI Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Ushuaia. Argentina. ISBN 978-987-3767-34-0.*
- QUISPE C, VISICH M, MARCUZZI J. (2018).  
Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales, acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta.  
*VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Puerto Madryn. Argentina. ISSN 2591- 6653. Pág. 289.*
- SAIQUITA, A. M. (2008).  
Ex basural La Pedrera, ciudad de Salta. Situación actual, consecuencias ambientales y su recuperación.  
*Tesis de grado. Inédita. Facultad de Humanidades. UNSa.*
- TURNER, J. C. M. (1972).  
Cordillera Oriental. Geología regional Argentina.  
*Academia Nacional de Ciencias, 117- 142. Córdoba. Argentina. Ed. A. F. Leanza.*
- TURNER, J. C. M., MON, R. (1979).  
Cordillera Oriental. Geología Regional Argentina, Tomo 1: 57-94.  
*Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Argentina. Ed. A. F. Leanza.*





## Estimación del campo de conductividades hidráulicas en pilas de lixiviación

### Estimation of field of hydraulic conductivities in heap leaching

Delahaye, Carlos H.<sup>1</sup> ✉ - Berenguer, Tadeo A.<sup>1</sup> - Bilbao, M. Alejandra<sup>1</sup> - Gatica, Graciela<sup>1</sup>

Recibido: 23 de noviembre de 2019 • Aceptado: 21 de abril de 2020

#### Resumen

*La distribución espacial de la conductividad hidráulica es una de las propiedades que más influye sobre el flujo de líquido de solución extractiva, a través de una pila de lixiviación de minerales. En este trabajo se presenta una metodología basada en técnicas geoestadísticas y geofísicas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en una pila de lixiviación de minerales. El estudio se realiza con la información proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación de minerales del Proyecto Minero Gualcamayo, ubicado en el departamento Jáchal de la provincia de San Juan. La variable proporcionada por la geofísica es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad permite tanto estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, como la varianza del error, que da una idea de la precisión y el grado de incertidumbre en la estimación. De esta forma, se obtiene un modelo matemático de distribución de resistividades, a partir del cual se estiman contenidos de humedad, porosidades y conductividades hidráulicas en el interior de la pila. Los resultados del modelo permiten identificar sectores de la pila de lixiviación con distintas permeabilidades, lo que condiciona el riego del mineral, conduciendo al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos que condicionan el rendimiento en la extracción del mineral.*

**Palabras Claves:** lixiviación en pilas, conductividad hidráulica, resistividad eléctrica, método geoestadístico.

#### Abstract

*Hydraulic conductivity is one of the properties that most influences the leaching solution flow through a mineral heap leach. This paper presents a methodology based on geostatistical and geophysical techniques in order to determine the spatial distribution of hydraulic conductivity in a mineral heap leach. The study is carried out with specific information provided by geophysical profiles carried out in the mineral heap leach of the Gualcamayo Mining Project, located in the Jáchal department of the San Juan province. The variable provided by the geophysical study is electrical resistivity. The statistical and geostatistical analysis of this property makes it possible to estimate values of electrical resistivity in volumetric units, as well as enabling the variance of the error, which gives an idea of the accuracy and degree of uncertainty in the estimation.*

1. Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín 1109 oeste, San Juan, Argentina.

✉ delahaye@unsj.edu.ar

*Thus, a mathematical model of resistivities distribution is obtained, from which moisture contents, porosities and hydraulic conductivities inside the heap are estimated.*

*The modeling results makes it possible to identify areas of the heap with different permeabilities, under different conditions of mineral irrigation, which lead to the development of heterogeneous liquid flows that condition the performance in the mineral extraction.*

**Keywords:** *heap leaching, hydraulic conductivity, electric resistivity, geostatistical methods.*

## INTRODUCCIÓN

El proceso de lixiviación en pilas permite utilizar yacimientos de baja ley siempre que la operación minera involucre una actividad a gran escala. La mena en bruto proveniente de la mina, o bien fragmentada mediante trituración (y eventualmente molienda), es conducida al área de lixiviación y ubicada en capas, formando grandes pilas, las cuales son regadas superficialmente con soluciones químicas para extraer los minerales valiosos.

Durante el apilamiento del mineral es inevitable el desarrollo de capas y regiones en su interior con zonas de material de estructura distinta. Ello es debido al proceso natural de segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. Por lo tanto, la conductividad hidráulica del material de la pila resulta en general heterogénea, provocando que el flujo de la solución lixivante en su interior no sea uniforme y se lleve a cabo a través de vías preferenciales de circulación, dejando áreas de la pila sin lixiviar, lo cual disminuye el rendimiento de la operación y, en algunos casos, conduce a afloramientos de líquido por la superficie de los taludes, afectando las condiciones de estabilidad y aumentando las posibilidades de contaminación del medioambiente (*Thiel and Smith, 2004*).

En este trabajo se aplican técnicas geoestadísticas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en el interior de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo, ya que estas técnicas constituyen un procedimiento válido y confiable para la categorización y clasificación de variables regionalizadas, puesto que refleja la cantidad y calidad de la información empleada.

El proyecto Gualcamayo está ubicado en el ámbito geológico de la Precordillera Centro-Oeste de Argentina, a 270km al norte de la ciudad de San Juan, en el departamento Jáchal. El acceso a la mina se realiza a la altura del kilómetro 3700 de la Ruta Nacional N° 40. La mina posee dos pilas de lixiviación denominadas Pila Sur cuya explotación finalizó en el 2013 y Pila Norte actualmente en explotación. La Figura 1 muestra la ubicación del proyecto Gualcamayo (A), una vista general de las pilas de lixiviación (B) y la ubicación de los perfiles del estudio geofísico realizado en la pila Norte (C).

El estudio se realiza con la información puntual proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación Norte por *Rodríguez y Mazuelos (2015)*. La variable proporcionada por el estudio es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad física permite estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, así como la varianza del error que da una idea de la precisión, y el grado de incertidumbre en la estimación a partir del análisis y caracterización de los datos. Se obtiene así un modelo matemático de distribución

de resistividades específicas a partir del cual se estiman contenidos de humedad, porosidades y conductividades hidráulicas en el interior de la pila.

La observación de los perfiles de resistividad eléctrica en secciones de la pila sugiere una estructura heterogénea y flujo concentrado sobre caminos preferenciales. La Figura 2 muestra la distribución de resistividades eléctricas en el Perfil PE5 de la Pila de Lixiviación Norte de la Mina Gualcamayo, obtenido mediante tomografía eléctrica, en el cual puede observarse la disposición de las diferentes capas de resistividad del terreno, diferenciadas en colores, cada una de ellas identificando a un rango de resistividad determinado, el cual está graficado en la escala ubicada debajo del perfil.

En base al análisis e interpretación geotécnica se han identificado zonas con distinto contenido de humedad asociadas al estado de riego de la pila separadas por una línea de color negro. En superficie se pueden observar zonas saturadas por el riego desde la progresiva 0 a la 192 m, pero luego a los 5 m de profundidad y hasta los 20 m se encuentra una zona semisaturada con apariencia estratificada, lo que sugiere la existencia de un material de mayor permeabilidad en los primeros 15 a 20 metros de la pila. A mayor profundidad la permeabilidad disminuye debido a la mayor compactación de la zona inferior del apilamiento, saturando la zona central de la pila, en un espesor superior a 40 m.

Los resultados del estudio permiten zonificar, con un alto grado de seguridad, sectores de la pila de lixiviación bajo distintas condiciones de riego de la solución lixivante, las cuales conducen al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos que inciden desfavorablemente sobre el rendimiento de la operación de la pila. El estudio se ha llevado a cabo utilizando el programa WinGSLIB, el cual es una actualización del programa original GSLIB, acrónimo de Geostatistical Software LIBrary (*Deutsch and Journal, 1992, 2011*).

## MÉTODO GEOESTADÍSTICO

El estudio de fenómenos con correlación espacial por medio de métodos geoestadísticos surgió a partir de los años sesenta, especialmente con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados (*David, 1977; Journal and Huijbregts, 1978*).

La columna vertebral del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de autocorrelación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como kriging y cokriging. Otros temas importantes dentro del estudio de información georreferenciada son el diseño de redes de muestreo (*Mcbratney et al., 1981*), la geoestadística multivariada (*Wackernage, 1995*) y la simulación (*Deutsch and Journal, 2011*).

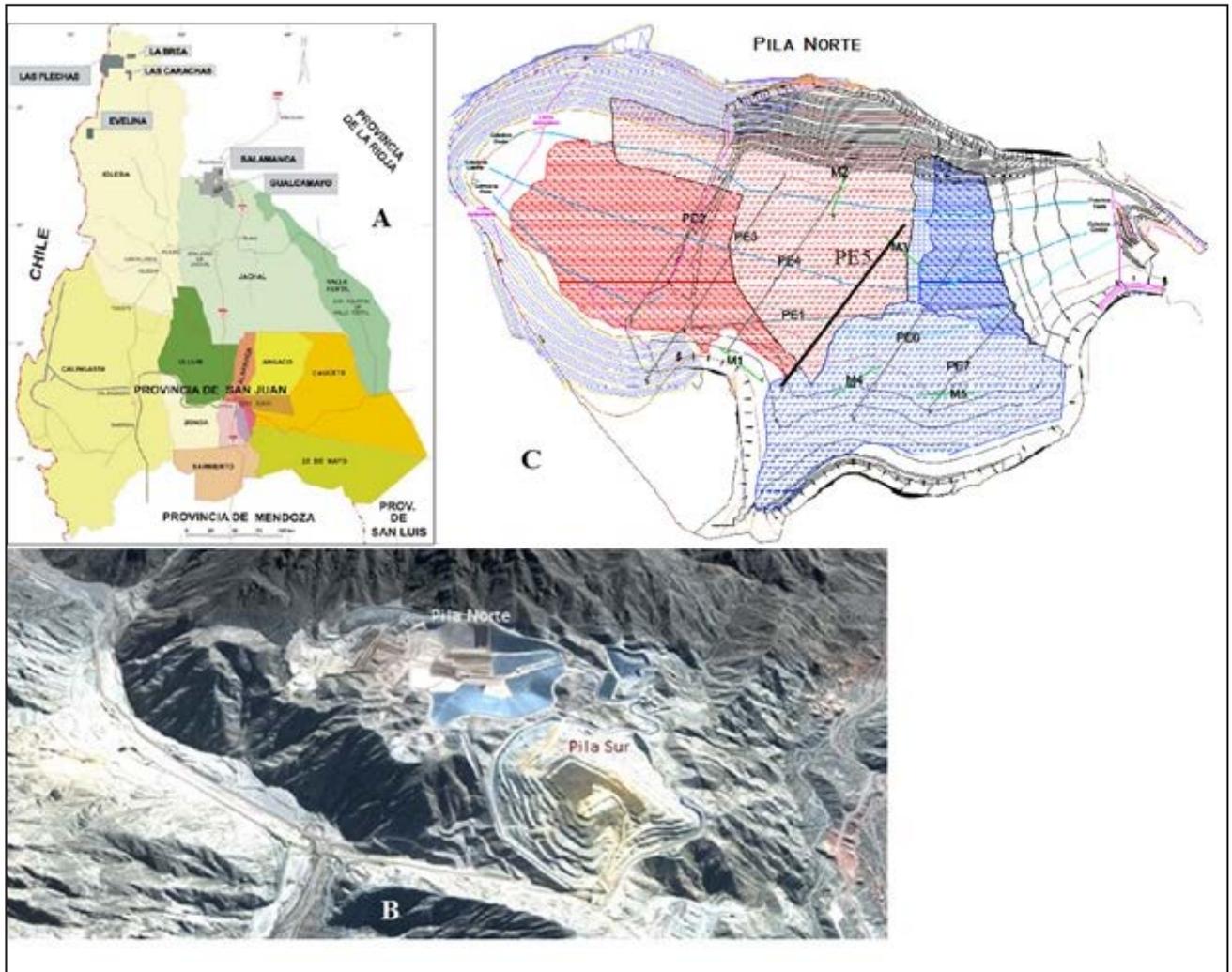


Figura 1. A-Ubicación del proyecto Gualcamayo; B - Vista general de las pilas de lixiviación Norte y Sur; C - Ubicación del perfil PE5 en la pila Norte.

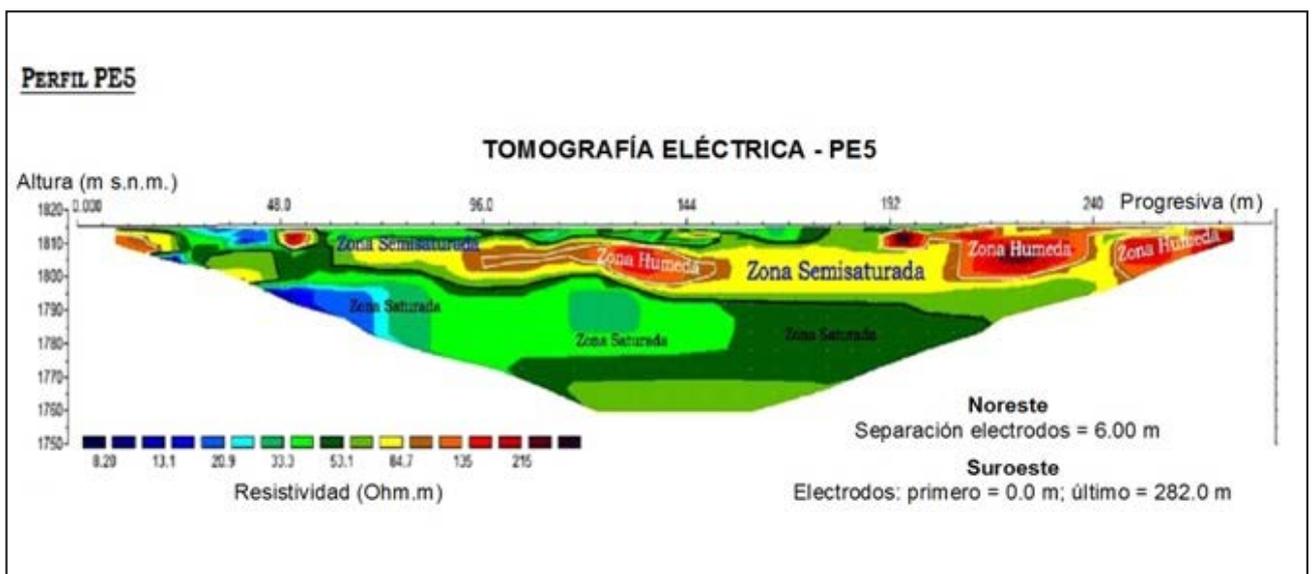


Figura 2. Resistividades eléctricas. Perfil PE5. Pila de Lixiviación Norte. Mina Gualcamayo.

En el método geoestadístico se aplican técnicas a fin de analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en el espacio o el tiempo, los cuales no se consideran independientes sino correlacionados unos con otros, de forma tal que mientras más cercanos estén situados dos puntos estarán más correlacionados y viceversa (Deutsch and Journel, 1992, 2011).

El método geoestadístico está compuesto básicamente por tres etapas (Figura 3):

1. Análisis exploratorio de los datos: se busca identificar localización, variabilidad, forma y observaciones extremas.
2. Análisis estructural: consiste en identificar de manera experimental (con base en datos muestrales) la estructura de autocorrelación espacial, para algunas distancias dadas, de un conjunto de datos de una variable, generalizando luego dicha estructura para cualquier distancia entre los sitios de observación.
3. Estimación (kriging): una vez detectada la autocorrelación espacial, el siguiente paso es la predicción en sitios de la región de estudio donde no se ha hecho medición de la variable de interés.

### ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE RESISTIVIDADES EN EL PERFIL PES

Los estudios geofísicos realizados en la Pila de Lixiviación Norte (Rodríguez y Mazuelos, 2015) abarcaron 7 perfiles de tomografía geoelectrica (PE1, PE2,..., PE7) y 5 perfiles sísmicos MASW- Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (M1, M2,..., M5). En la Figura 4 se muestra la ubicación de los perfiles, la cota nivel y el estado del riego de las celdas correspondiente al 16/06/2014.

Los resultados del estudio muestran que el mineral apilado posee una litología granular arenosa uniforme en su mayor parte, indicando que el mineral en estado seco posee una resistividad similar en todo el volumen con valores comprendidos entre los 100 y 400 Ohm.m.

El riego de la pila provoca cambios de resistividad en función del estado de humedad existente, indicando zonas de mayor o menor permeabilidad del apilamiento. Así se pueden distinguir sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco riego y valores de resistividad bajos correspondiente a sectores con mayor riego.

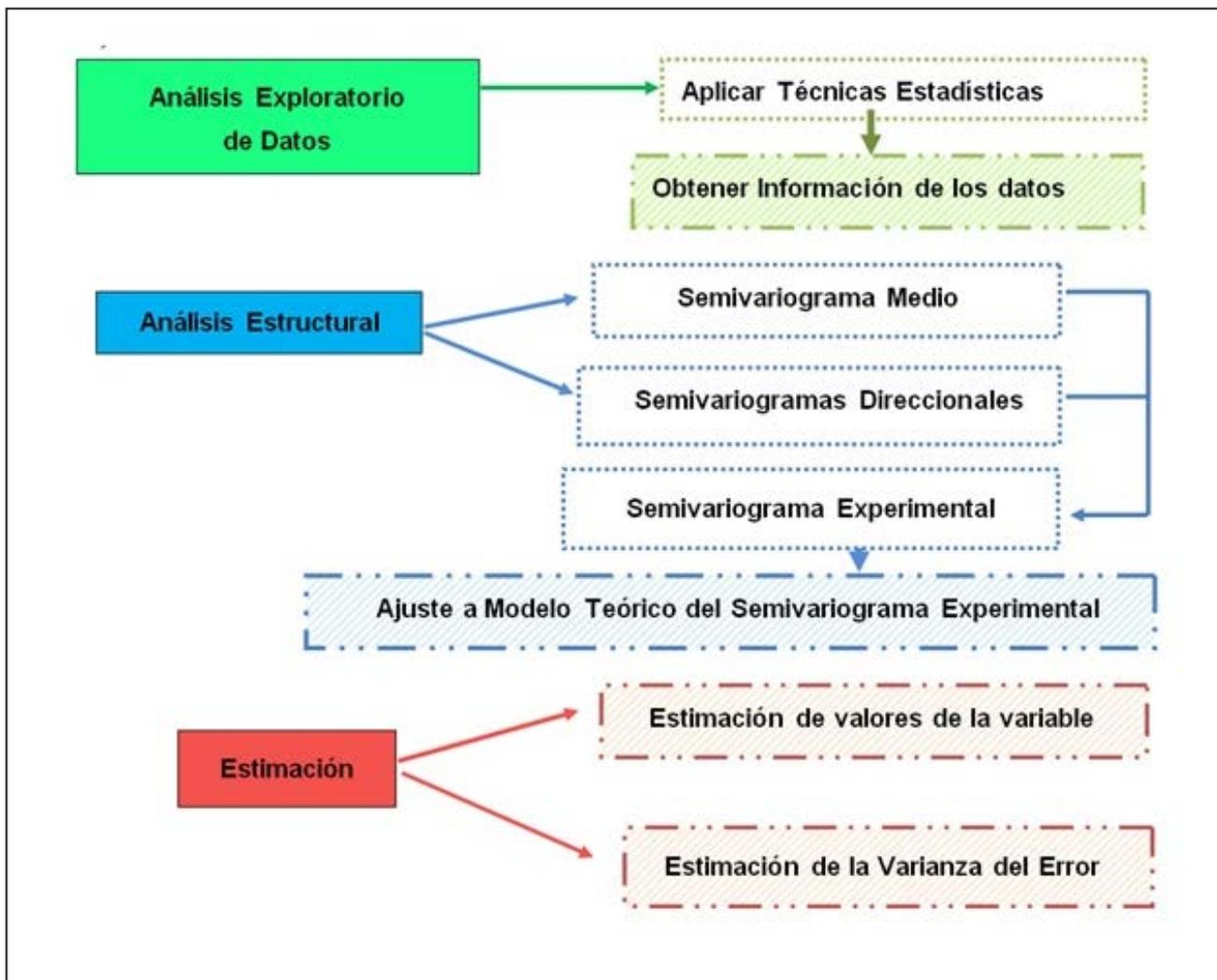


Figura 3. Método Geoestadístico.

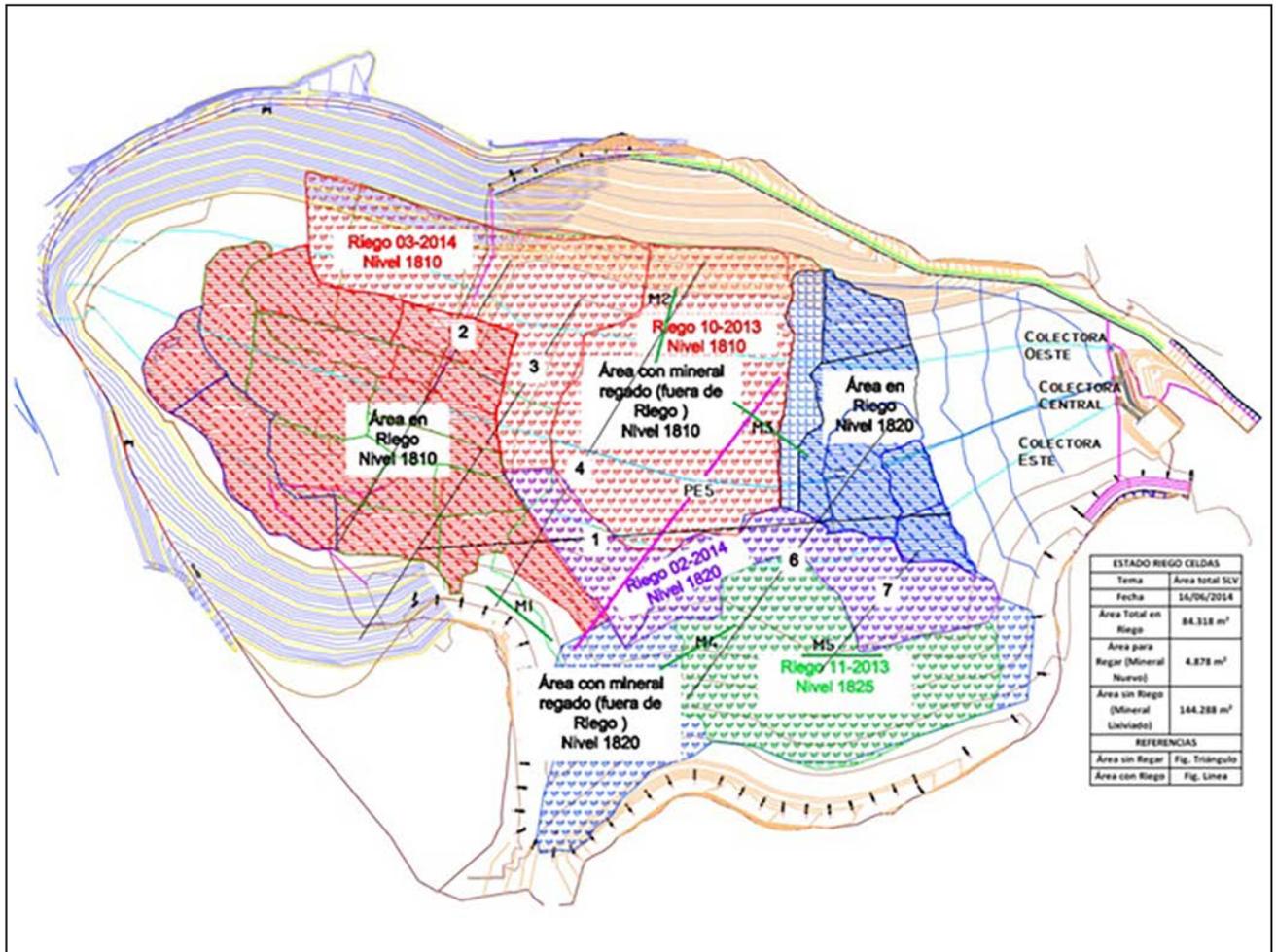


Figura 4. Perfiles geofísicos y MASW. Pila de lixiviación Norte. Mina Gualcamayo.

La mayoría de los perfiles muestran en superficie y hasta 5 a 7 m de profundidad la presencia de zonas con resistividades inferiores a 50 Ohm. m, que corresponden a estratos con alto contenido de humedad debido a que la mayor parte de las celdas estaban siendo regadas en el momento de realizar la geoelectrónica. A partir de los 5 a 7 m y hasta los 25 metros de profundidad la mayoría de los perfiles muestran valores de resistividad superiores a 50 Ohm.m, correspondiente a un material con menor contenido de humedad. Por debajo de la zona antes nombrada se observan zonas saturadas en la mayoría de los perfiles, debido a la disminución de la porosidad por el peso del material suprayacente y al equilibrio establecido entre el sistema de drenaje y la permeabilidad del material apilado.

En este trabajo se ha utilizado la información puntual correspondiente al perfil geofísico PE5. La variable proporcionada para el estudio es la resistividad eléctrica.

La base de datos del PE5 contiene 450 valores de resistividad, los cuales se distribuyen cada 6 m en horizontal y en 14 capas en profundidad, abarcando una longitud total aproximada de 280 m en superficie y extendiéndose hasta una profundidad de 60 m aproximadamente, siguiendo el perfil de forma trapezoidal invertido típico del ensayo geofísico (Figura 2).

### Análisis exploratorio de datos

La geoestadística busca estudiar una o varias variables regionalizadas con valores obtenidos de una muestra. Previo al uso de métodos geoestadísticos propiamente dichos, conviene realizar un estudio exploratorio de los datos disponibles, el cual tiene tres objetivos:

1. Analizar mediante herramientas estadísticas simples la cantidad, calidad y ubicación de los datos disponibles.
2. Definir la(s) zona(s) de estudio. Una división del campo en varias sub-zonas puede ser relevante si uno observa cambios abruptos en la distribución espacial de valores, o si la geología del fenómeno lo indica.
3. Anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local (por ejemplo, presencia de valores atípicos que se destacan de aquellos de los datos vecinos).

En la Figura 5 se muestran los valores puntuales de resistividad medidos en el perfil PE5. El mapa da una primera idea de la distribución de los valores en la zona de estudio. Se puede apreciar tanto en vertical como en horizontal los cambios de resistividad en el terreno.

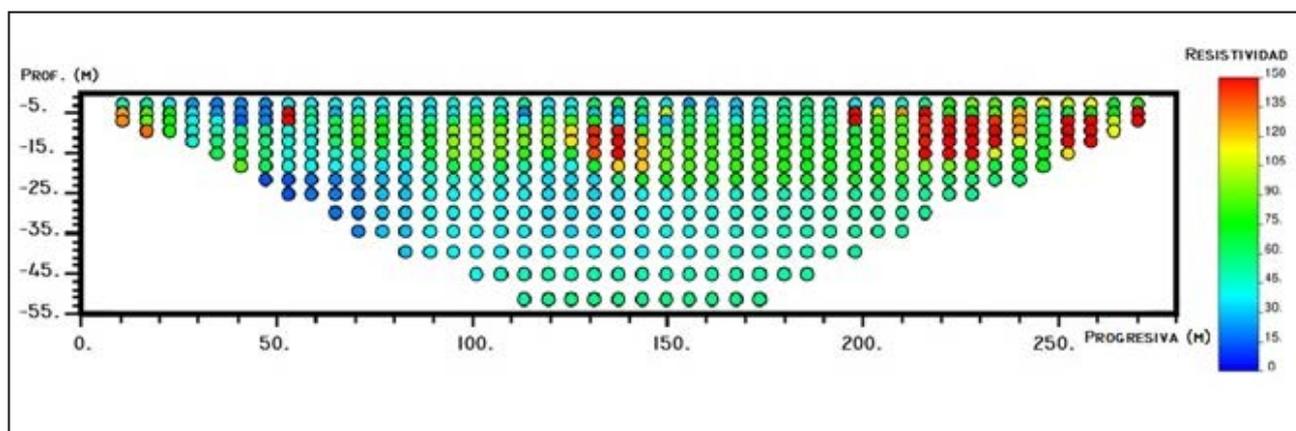


Figura 5. Mapa de ubicación de los datos de resistividad eléctrica medidos en el perfil PE5.

El análisis estadístico descriptivo de los datos de resistividad eléctrica puede observarse en las Figuras 6 y 7, las cuales muestran el histograma y la distribución de frecuencias acumuladas de la resistividad eléctrica.

El histograma del perfil PE5 resulta con asimetría a la derecha. Los datos medidos se ubican en el rango de resistividades esperadas para el tipo de material apilado (12,05 -250,4 Ohm.m) indicando zonas con distintos contenidos de humedad asociados al estado de riego y zonas con mayor o menor permeabilidad a lo largo del perfil.

No se detectan valores atípicos. Las intercalaciones de zonas de alta resistividad en estratos de resistividad media o baja analizados en un contexto con criterio físico sugieren zonas de material de diferente permeabilidad, debido a la mayor compactación que sufren las capas de mineral ubicadas a mayor profundidad y a la humedad existente en el material por el estado de riego durante el estudio. Esto está también de acuerdo con lo observado en el ensayo M3 (MASW3) realizado en el último tramo de este perfil, el cual muestra que a partir de los 20 m de profundidad la densidad del material aumenta notablemente.

La función de distribución acumulada  $F(x)$  indica el comportamiento de la muestra y permite observar que la distribución de la resistividad no tiende a la normalidad.

Del análisis de la distribución de frecuencias en el perfil PE5 se puede inferir que valores de resistividad eléctrica entre 0 y 50 Ohm.m representan el 42% de los datos, entre 50 y 100 Ohm.m representan el 46% de los datos y que el 12% restante ocupa un rango más amplio, entre los 100 y los 250 Ohm.m.

### Análisis estructural

El análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad. La función básica en geostatística que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés se conoce como semivariograma o variograma.

La construcción del semivariograma a partir de los datos permitirá analizar el comportamiento espacial de la resistividad específica en el perfil a los efectos de detectar:

- Direcciones de anisotropía.
- Zonas de influencia y su extensión (correlación espacial).

c) Variabilidad con la distancia.

Con los datos del perfil PE5 se construyeron los variogramas experimentales omnidireccional, en dirección vertical y en dirección horizontal, observando su comportamiento y la tendencia que muestran. Por medio de éstos se caracterizó la dependencia espacial de las variables analizadas según dichas direcciones. Luego se realizó el ajuste utilizando un modelo teórico de variograma tipo esférico omnidireccional y en dirección vertical y horizontal. Las Figuras 8, 9 y 10 muestran los variogramas experimentales y los modelos teóricos de ajuste del variograma omnidireccional y para las direcciones horizontal y vertical respectivamente. También se han indicado en las figuras los datos GSLIB para el modelo experimental y de ajuste en cada caso.

El variograma teórico de ajuste del variograma omnidireccional indicado en la Figura 8 resulta de tipo esférico, con efecto pepita de  $90 \text{ (Ohm.m)}^2$ , meseta (varianza) de  $1300 \text{ (Ohm.m)}^2$  y alcance de 12 m.

El variograma teórico de ajuste en dirección vertical indicado en la Figura 9 resulta de tipo esférico, con efecto pepita de  $90 \text{ (Ohm.m)}^2$ , meseta (varianza) de  $1350 \text{ (Ohm.m)}^2$  y alcance de 13 m. En la dirección horizontal (Figura 10) el variograma de ajuste también resulta de tipo esférico, con meseta de  $1100 \text{ (Ohm.m)}^2$ , alcance de 19 m y efecto pepita de  $250 \text{ (Ohm.m)}^2$ .

El estudio variográfico indica la existencia de una anisotropía geométrica dado que los variogramas presentan aproximadamente la misma meseta (varianza) pero alcance distinto. El alcance del variograma representa la distancia a partir de la cual no hay correlación. El alcance en dirección horizontal resulta mayor que en dirección vertical, indicando una mayor continuidad espacial en horizontal que en vertical, lo que da idea de una estructura heterogénea del material, con una disposición en capas horizontales, lo que está de acuerdo con lo observado en la realidad (Figura 2).

El efecto pepita en la dirección horizontal indica una discontinuidad del variograma en el origen. Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre los datos y puede deberse a errores de medición o a la escala de la misma (la distancia entre electrodos en el ensayo geofísico fue de 6 m). También podría indicar que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

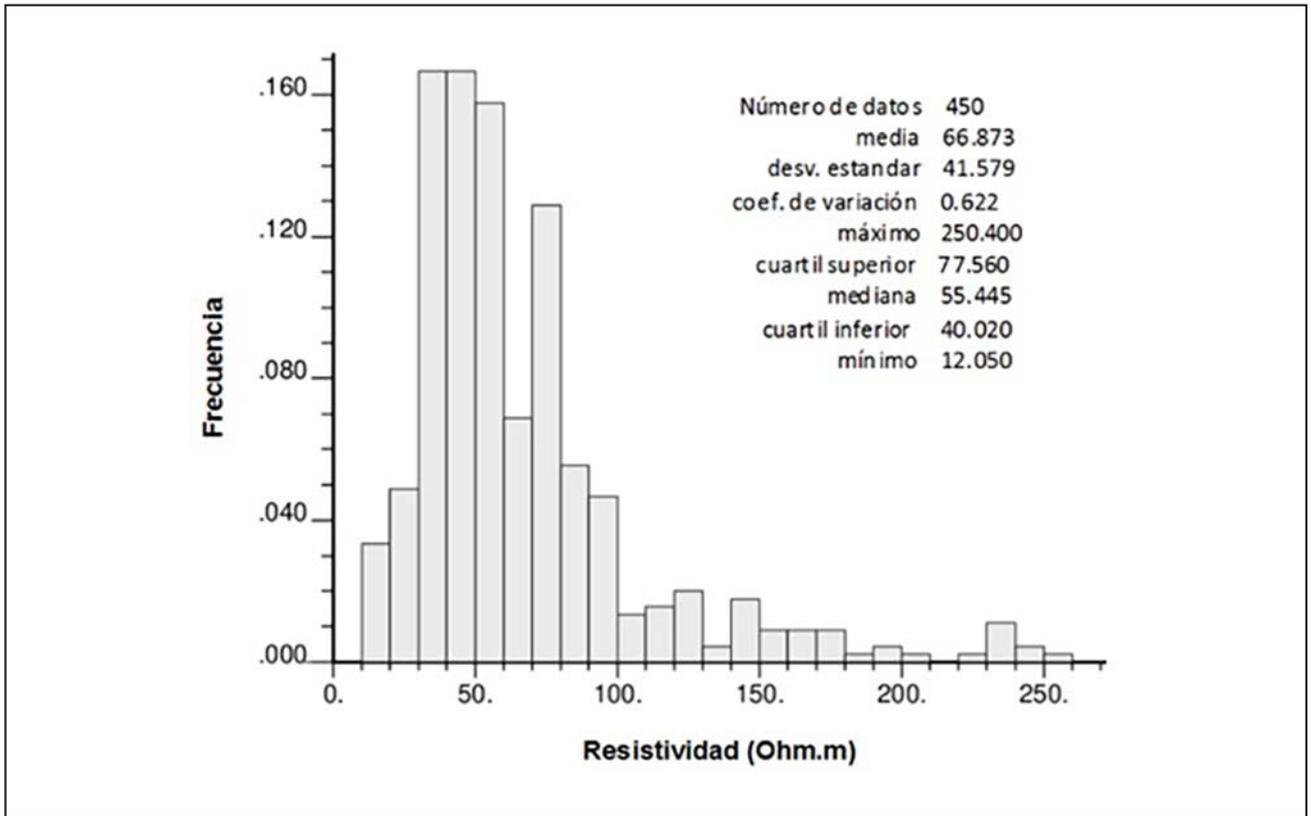


Figura 6. Histograma de la resistividad eléctrica medida en el perfil PE5.

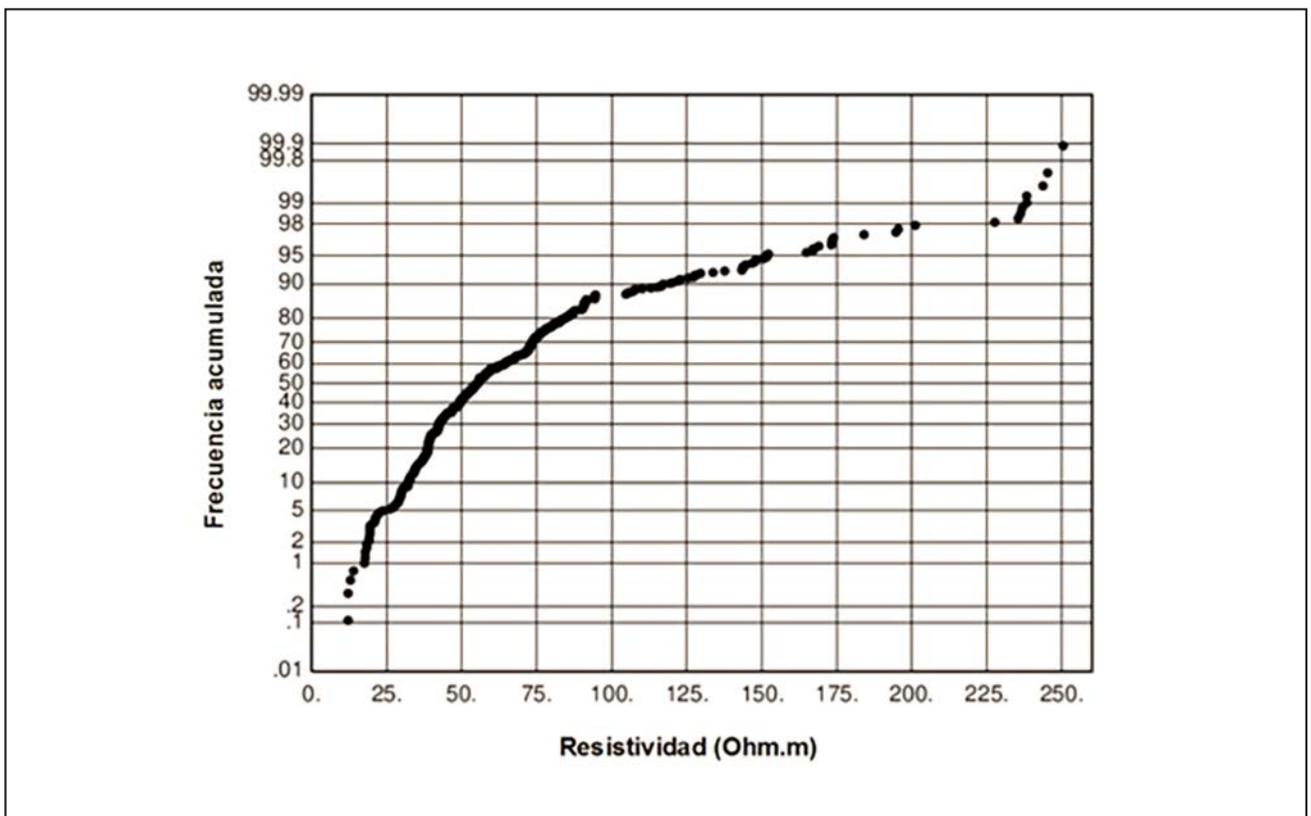


Figura 7. Diagrama de frecuencias acumuladas de resistividad eléctrica.

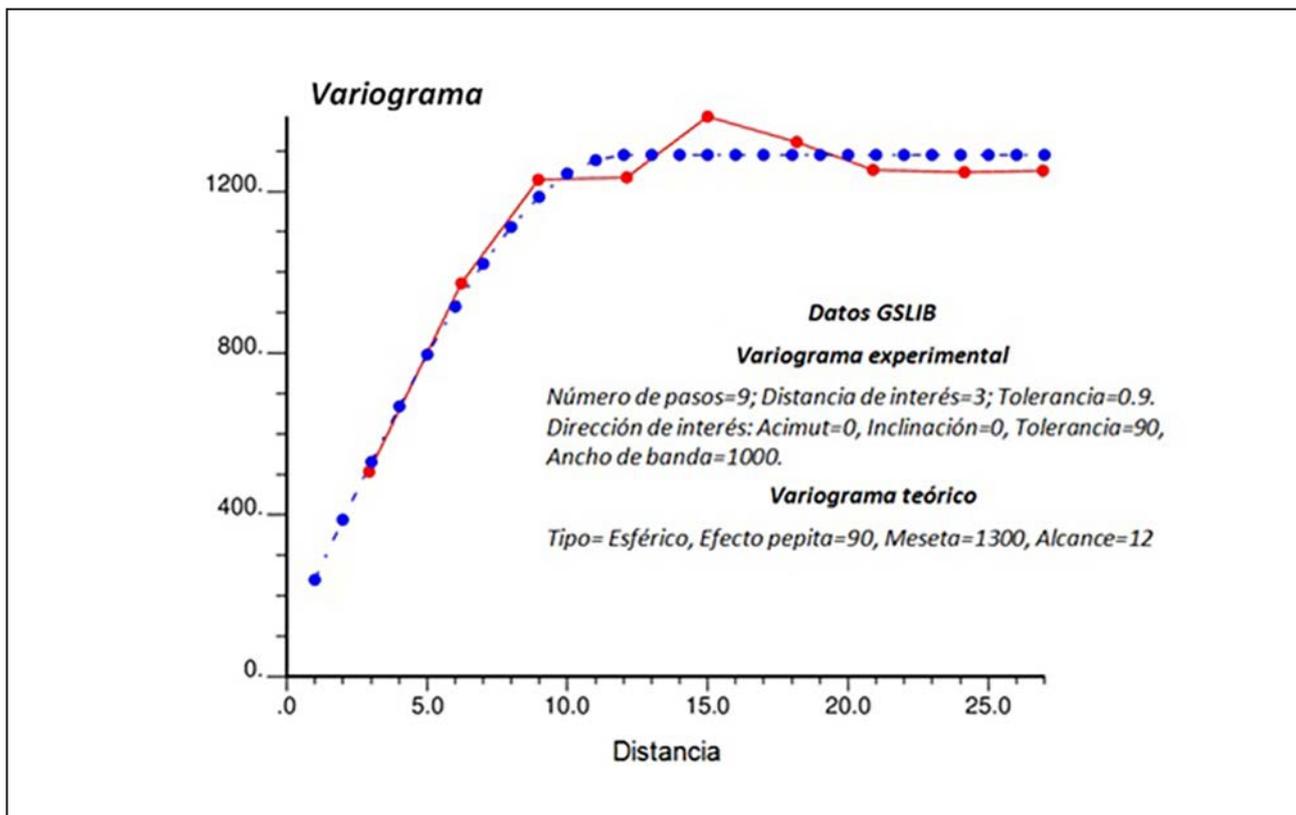


Figura 8. Variograma omnidireccional experimental y teórico.

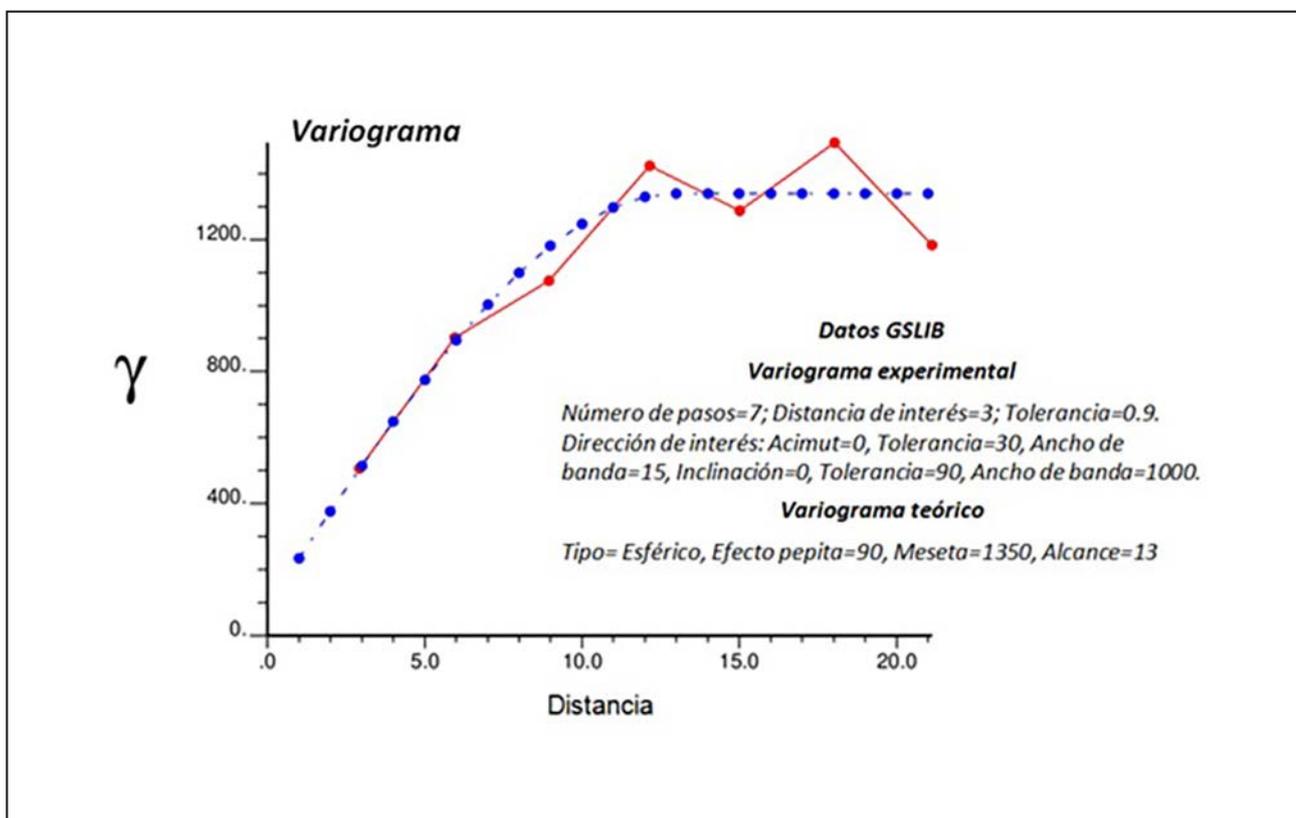


Figura 9. Variograma experimental y teórico en dirección vertical.

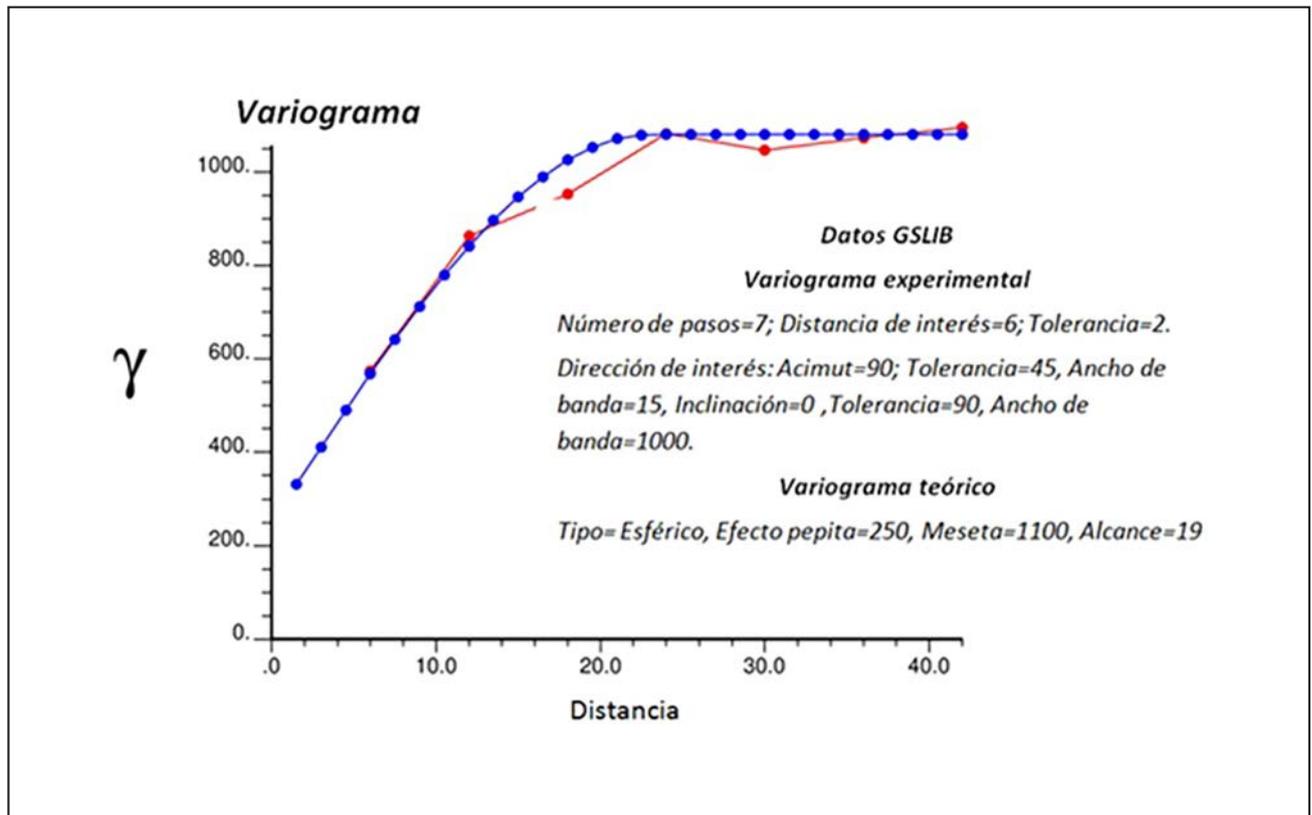


Figura 10. Variograma experimental y teórico en dirección horizontal.

### Estimación (kriging)

El kriging es un método de estimación lineal de la variable regionalizada en puntos de un área o volumen, que utiliza un criterio de minimización de la varianza de estimación. Los valores estimados mediante kriging pueden ser utilizados para dibujar mapas de contorno cuando estos son calculados en los nodos de una malla regular. Existen varios algoritmos de kriging que pueden ser usados dependiendo de la información que se tiene en el momento de comenzar con el análisis geoestadístico.

En este trabajo se ha utilizado el método de kriging ordinario, definido como el mejor estimador lineal no sesgado. Es lineal porque los estimados que resultan son combinaciones lineales de los datos disponibles y es no sesgado porque usa un modelo de probabilidad en donde se escogen pesos para los datos cercanos que aseguren que el error sea igual a cero y que la varianza sea minimizada. Este método de estimación se aplicó a la información de los datos de resistividades medidas en el perfil PE5, considerando los parámetros de variabilidad proporcionados por el estudio variográfico (alcances, variabilidades mínima y máxima). De esta forma se obtuvieron valores estimados de resistividad eléctrica en celdas de 2 m x 2 m abarcando toda el área de datos del perfil mencionado. Se utilizó como radio de búsqueda el valor del alcance (12 m) del variograma utilizado.

En la Figura 11 el gráfico A muestra el perfil de resistividades estimadas con kriging ordinario, utilizando el variograma omnidireccional, debido que resulta más conservador en sus parámetros y no hay grandes diferencias con los direccionales. En la misma figura se muestra también el mapa de variancia del kriging (gráfico B) que da una idea de la distribución de la variancia del error de estimación y el gráfico Cuantil-Cuantil

que compara las distribuciones resistividad estimada - resistividad medida (gráfico C) que muestra el alejamiento de la normalidad a partir de valores de resistividad superiores a 100 Ohm.m, límite entre zonas parcialmente saturadas y zonas de baja humedad a seca establecidas por Rodríguez y Mazuelos (2015), compatible con el estado de riego de celdas en la pila.

En la Figura 12 se comparan el perfil de resistividades estimadas en celdas de 2 m x 2 m y medidas con tomografía eléctrica en el perfil PE5 para los valores de referencia límites entre zonas saturadas, parcialmente saturadas y secas.

Los resultados muestran que el modelo obtenido mediante el método geoestadístico ajusta adecuadamente los valores obtenidos por el ensayo geofísico.

### ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL PERFIL PE5

A partir del modelo matemático de distribución de resistividades eléctricas se ha procedido a estimar la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el perfil PE5 de la pila de lixiviación.

La relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica puede derivarse por analogía entre el flujo de agua y el flujo de corriente eléctrica en un medio poroso. Existen relaciones empíricas o semi-empíricas publicadas para diferentes acuíferos, establecidas a partir de mediciones con geofísica en superficie, en sondeos o en testigos de perforación. Sin embargo, hoy en día no existe una ley física que controle esta relación, ya que en determinados sitios las relaciones resultan con correlación positiva y en otros muestran una correlación negativa, por lo que no termina de entenderse.

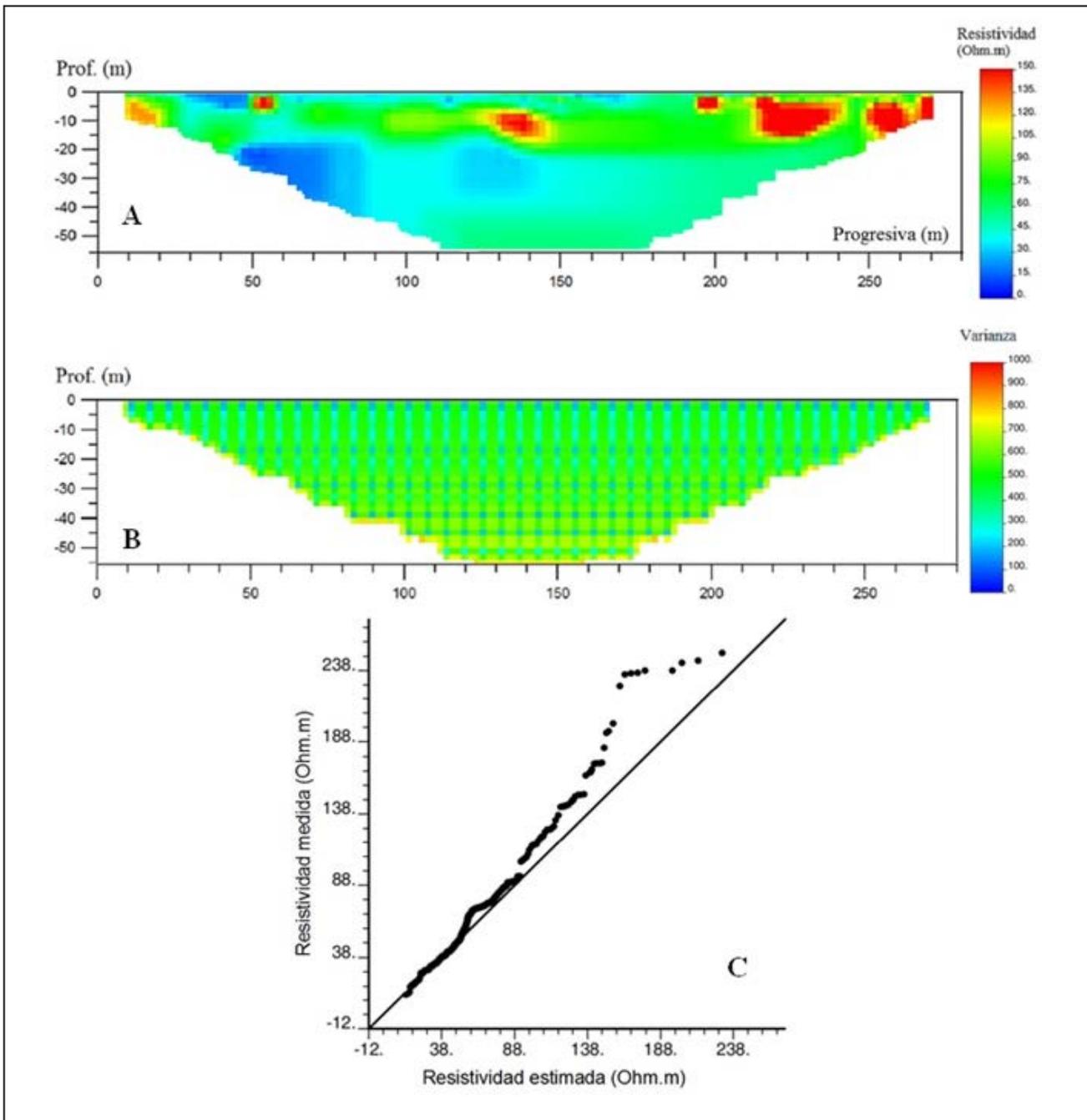


Figura 11. A- Perfil de resistividades estimadas (celdas 2m x 2m); y B- Varianza de la estimación (celdas 2m x 2m); C- Gráfico Cuantil - Cuantil (resistividad estimada - resistividad medida) obtenidos con el método geoestadístico.

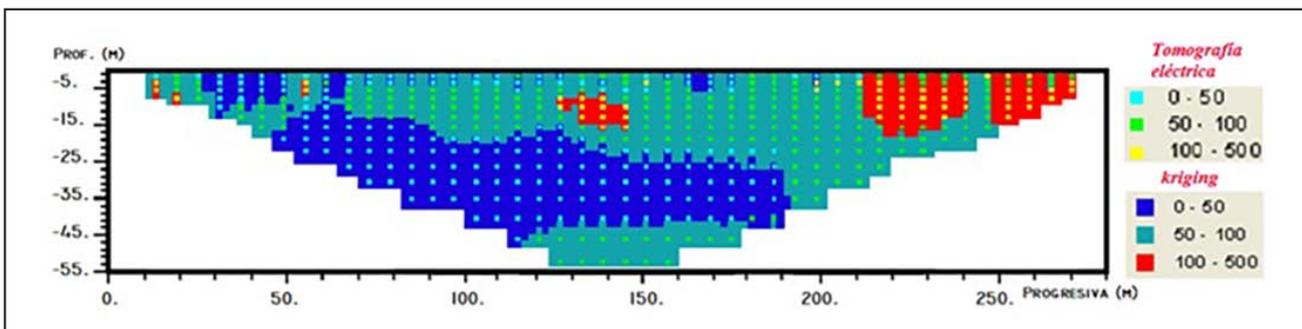


Figura 12. Comparación del perfil de resistividades estimadas en celdas de 2 m x 2 m y medidas con tomografía eléctrica en el perfil PE5 para valores de referencia.

En este trabajo la estimación de la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el medio poroso se ha basado en las leyes de Archie (*Archie, 1942*) y en los conceptos generales de la mecánica de suelos no saturados (*Fredlund y Rahardjo, 1993*).

### Leyes de Archie

En la mayoría de los minerales, excepto en arcilla saturada, minerales metálicos y grafito, la resistividad eléctrica es alta, y por lo tanto, la corriente eléctrica fluye principalmente a través del agua intersticial contenida en los poros del mineral. De acuerdo con *Archie (1942)*, la resistividad de un material (roca o suelo) saturado con agua salada, sin contenido de arcilla, puede describirse por:

$$R_o = R_w F_i \quad (1)$$

Dónde,

$R_o$  = resistividad de la roca o suelo saturada de agua,

$R_w$  = resistividad del agua intersticial,

$F_i$  = factor de formación intrínseco.

El factor de formación intrínseco ( $F_i$ ) combina todas las propiedades del material que influyen sobre el flujo de corriente eléctrica: porosidad, estructura porosa y cementación diagenética. Se utiliza para la evaluación petrofísica de depósitos, acuíferos y sitios de ingeniería (*Salem, 2012*), y se puede expresar por:

$$F_i = a \phi^{-m} \quad (2)$$

Dónde,

$\phi$  = porosidad,

$a$  = parámetro asociado al medio.

$m$  = exponente de la porosidad, factor de forma o grado de cementación,

La ecuación 2 se conoce como primera ley de Archie, es válida en formaciones completamente saturadas y sin contenido de arcillas, donde los granos del material son aislantes perfectos.

El factor asociado con el medio  $a$ , es un indicador de la geometría de los poros en un medio poroso. Este factor generalmente disminuye al aumentar la compactación, consolidación y edad de los sedimentos o rocas. Desde el punto de vista físico, a debería ser igual a 1 ya que cuando  $\phi = 1$  resulta  $F_i = 1$  en la ecuación 1. Sin embargo, su valor en muchos casos se aparta del valor comúnmente asumido de uno.

El factor de cementación  $m$  exhibe amplias variaciones en función de la geometría de los poros, compactación, composición mineral y propiedades aislantes de la cementación. El aumento en el área superficial específica del material por mayor contenido de finos (arenas, limo, arcillas) o la mayor angularidad (menos esfericidad) de los granos resulta en valores más altos de  $m$ . *Archie (1942)* indica valores de  $m$  entre 1,3 y 3. El rango general de  $m$  dado en la literatura varía generalmente entre 1 para rocas fracturadas y 5 para rocas bien consolidadas y altamente compactadas.

En la Tabla 1 se han indicado rangos para los parámetros  $a$  y  $m$  reportados por diversos autores (*Khalil y Monterio Santos, 2009*).

**Tabla 1. Rango de los parámetros  $a$  y  $m$  de la primera Ley de Archie.**

Litología	$a$	$m$	Autor
Areniscas	0,47 - 1,8	1,64 - 2,23	Hill and Milburn (1956)
	0,62 - 1,65	1,3 - 2,15	Carothers (1968)
	1,0 - 4,0	0,57 - 1,85	Porte and Carothers (1970)
	0,48 - 4,31	1,2 - 2,21	Timur et al. (1972)
	0,004 - 17,7	0,02 - 5,67	Gomez-Rivero (1977)
Carbonatos	0,73 - 2,30	1,64 - 2,1	Hill and Milburn (1956)
	0,45 - 1,25	1,78 - 2,38	Carothers (1968)
	0,33 - 78,0	0,39 - 2,63	Gomez-Rivero (1977)
	0,35 - 0,8	1,7 - 2,3	Schon (1983)

En medios parcialmente saturados el grado de saturación  $S_w$  incide fuertemente sobre la conductividad hidráulica del material, ya que los cambios de  $S_w$  producen cambios en la permeabilidad relativa del material, y éste a su vez sobre la conductividad hidráulica (*Delahaye et al., 2016*). La consideración del grado de saturación para medios parcialmente saturados se expresa por la segunda ley de Archie:

$$F_a = \frac{R_t}{R_w} = a \phi^{-m} S_w^{-n} \quad (3)$$

Donde,  $F_a$  es el factor de formación aparente,  $R_t$  es la resistividad de la formación,  $R_w$  es la resistividad del agua de poro,  $\phi$  es la porosidad,  $S_w$  es el grado de saturación,  $a$  y  $m$  son parámetros relacionados con el tipo de roca, y  $n$  es el índice de saturación (generalmente  $n$  varía entre 1,8 a 2). En condiciones de Archie, arena limpia y completamente saturada de agua salada,  $F_a = F_i$ .

La aplicación de la ecuación 3 en el perfil PE5, para los valores de resistividad ( $R_t$ ) estimados con el método geostatístico y parámetros  $R_w = 1,19$  Ohm.m (resistividad de la solución de cianuro utilizada en el riego de la pila),  $a = 1$  y  $m = n = 2$  (valores adoptados para el mineral triturado de la pila), han permitido estimar en dicho perfil la distribución del contenido volumétrico de líquido ( $\theta_w = \phi \cdot S_w$ ), la porosidad ( $\phi$ ), el grado de saturación ( $S_w$ ) y la permeabilidad saturada ( $K_{ws}$ ).

En la derivación de la porosidad  $\phi$  y del grado de saturación  $S_w$  se ha considerado que dichas variables cambian inversamente (*Khalil y Monterio Santos, 2009*). Además, considerando que la tasa de riego de la pila es pequeña ( $q = 12$  l/(h.m<sup>2</sup>) =  $3,33 \cdot 10^{-6}$  m/s) y mucho menor que la permeabilidad saturada del mineral (valores de referencia:  $K_{ws0} = 2,7 \cdot 10^{-3}$  m/s para  $\phi = 0,38$ , se ha considerado válida la hipótesis de que en estas condiciones el flujo de líquido se realiza principalmente por la fracción fina del mineral, es decir, por las zonas con mayor contenido de humedad  $\theta_w$  (*Delahaye et al., 2016*).

### Mecánica de suelos no saturados

Conocido el campo de permeabilidades saturadas se puede determinar el movimiento del flujo de solución de riego en el

interior de la pila de lixiviación utilizando el marco teórico que provee la mecánica de suelos no saturados (*Fredlund and Rahardjo, 1993*).

El líquido se mueve a través del medio poroso de acuerdo con la ley de Darcy:

$$v_l = - (K_l / \gamma_l) (\nabla P_l - \rho_l g) \quad (4)$$

$\gamma_l$  es el peso específico del líquido.  $K_l = K k_{rl} (\rho_l g / \mu_l)$  es el tensor permeabilidad al líquido.  $\mu_l$  es la viscosidad dinámica del líquido.  $g$  es la aceleración de la gravedad. El tensor permeabilidad intrínseca,  $K$ , depende de la estructura porosa del terreno y está dado por:

$$K = K_0 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad (5)$$

donde  $K_0$  es la permeabilidad intrínseca correspondiente a  $\phi_0$  (porosidad de referencia).  $k_{rl}$  es la permeabilidad relativa al líquido, la cual controla la variación de la permeabilidad en régimen no saturado. En condiciones saturadas, la permeabilidad al líquido alcanza el valor de la permeabilidad saturada,  $K_l = K_{ws}$ .

**Estimación de la distribución del contenido volumétrico de líquido ( $\theta_w = \phi S_w$ ), porosidad ( $\phi$ ), grado de saturación ( $S_w$ ) y permeabilidad saturada ( $K_{ws}$ ) en el perfil PE5**

La relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad medida con métodos geofísicos en distintos tipos de acuíferos resulta generalmente empírica o semi-empírica. En algunos casos esta relación tiene una correlación positiva y negativa en otros, no existiendo en la actualidad una ley potencialmente física que controle dicha relación, la que tampoco alcanza a comprenderse en forma completa.

*Khalil y Monterio Santos (2009)* analizan el efecto del grado de saturación en la relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad aparente del acuífero mediante un análisis numérico de la segunda ley de Archie y la ecuación de Kozeny-Carman. En el estudio establecen tres relaciones no lineales características entre la conductividad hidráulica y la resistividad global dependiendo del grado de saturación:

1. Relación potencial inversa en acuíferos completamente saturados y cuando la porosidad es igual al grado de saturación.
2. Relación potencial inversa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es superior al 50% y superior a la porosidad.
3. Relación potencial directa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad.

Estos resultados son compatibles con algunas relaciones de escala de campo. La coincidencia entre estudios de casos y modelos analíticos muestra buenos resultados, dependiendo de la calidad de los datos y las técnicas de medición.

Para la pila de Gualcamayo se ha considerado la semejanza con el tercer caso dada las condiciones de saturación de la pila, estableciendo la siguiente relación potencial directa entre la porosidad ( $\phi$ ) y la resistividad eléctrica medida  $R_t$  en el perfil PE5:

$$Rt = 1083.94 \phi^{1/0.312} \quad (6)$$

Esta relación fue obtenida a partir de:

- a) Las propiedades de referencia del material apilado,  $\phi_0 = 0,38$ ,  $\rho_s = 2,5 \text{ t/m}^3$ ,  $w = 9,8\%$ ,  $K_{ws} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  y las mediciones de conductividad - humedad realizadas en una celda piloto de la pila utilizando sensores de conductividad eléctrica, bajo condiciones normales de operación. (*Onorato, 2019*).
- b) Los ensayos geofísicos: considerando valores de resistividad límite entre zona saturada y zona muy húmeda (0 a 50 Ohm.m), zona muy húmeda y zona de baja humedad (50 a 100 Ohm.m) y de zona de baja humedad a zona seca (100 y 500 Ohm.m) (*Rodríguez y Mazuelos, 2015*).
- c) Relación potencial directa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad (*Khalil y Monterio Santos, 2009*).

De la segunda ley de Archie (ecuación 3):

$$\phi^{-m} S_w^{-n} = \frac{R_t}{R_w a} \quad (7)$$

Para  $a = 1$ ,  $m = n = 2$  y  $\theta_w = \phi S_w$  resulta:

$$\theta_w = \phi S_w = \left( \frac{R_w a}{R_t} \right)^{1/n} = \left( \frac{1.19}{R_t} \right)^{1/2} \quad (8)$$

De la ecuación (6) y (8):

$$S_w = \theta_w / \phi (R_t) \quad (9)$$

De la ecuación 5 (modelo de Kozeny) y los valores de referencia ( $K_{ws0} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  para  $\phi_0 = 0,38$ ), resulta la relación permeabilidad saturada vs. resistividad.

$$K_{ws} = K_{ws0} \frac{\phi(Rt)^3}{(1-\phi(Rt))^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (10)$$

En la Figura 13 se muestra la relación adoptada para el perfil PE5 y la relación propuesta por *Khalil y Monterio Santos (2009)* para acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad (tercer caso).

En la Figura 14 se han representado las relaciones de  $\phi$ ,  $\theta_w$ ,  $S_w$  y  $K_{ws}$  vs.  $R_t$  resultantes para el perfil PE5.

**Análisis de resultados**

Los resultados para el contenido volumétrico de líquido ( $\theta_w = \phi S_w$ ), porosidad ( $\phi$ ), grado de saturación ( $S_w$ ) y conductividad eléctrica saturada ( $K_{ws} \cdot 10^{-3}$ ) se muestran en las Figuras 15, 16, 17 y 18, respectivamente. La Figura 15 muestra que los contenidos de humedad  $\theta_w$  mayores se corresponden con valores menores de resistividades  $R_t$  estimadas con kriging (Figura 11).

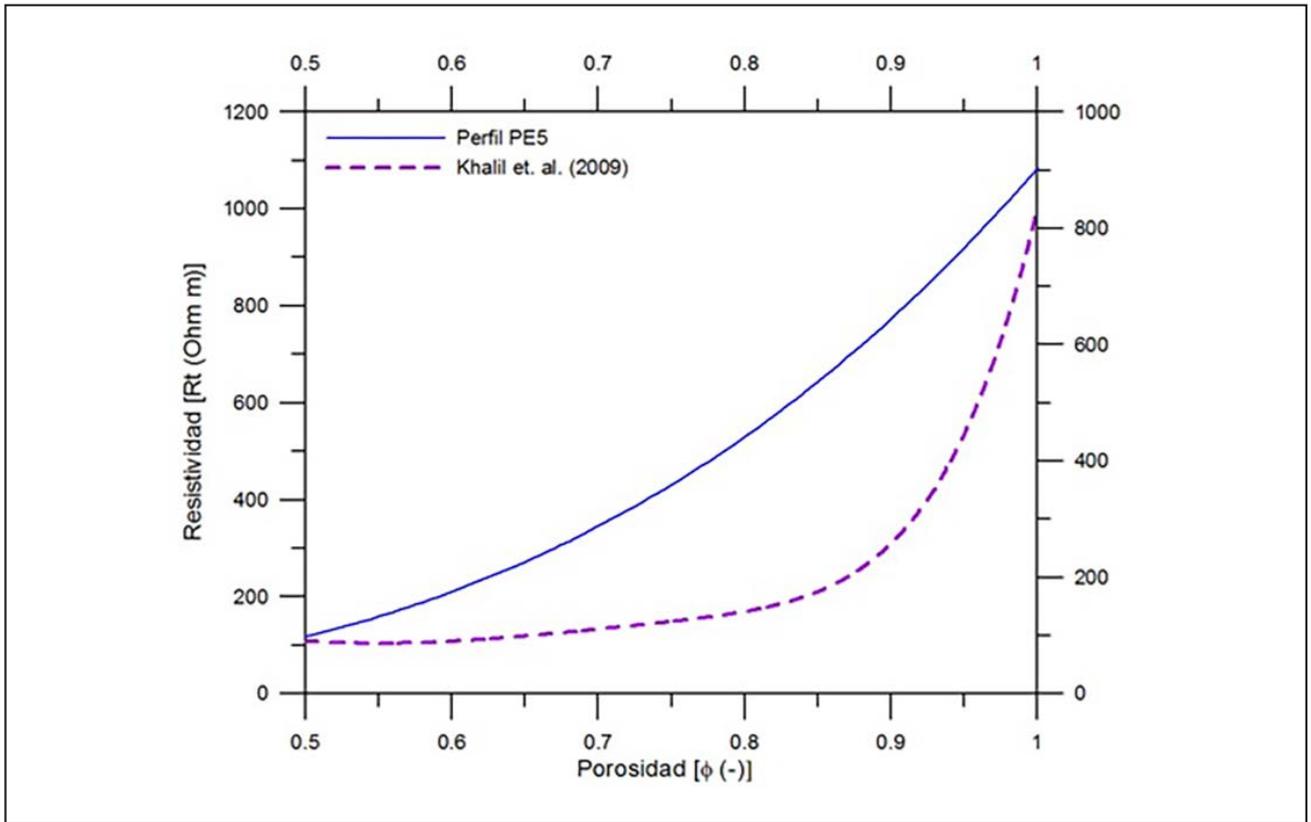


Figura 13. Relación resistividad vs. porosidad para el perfil PE5.

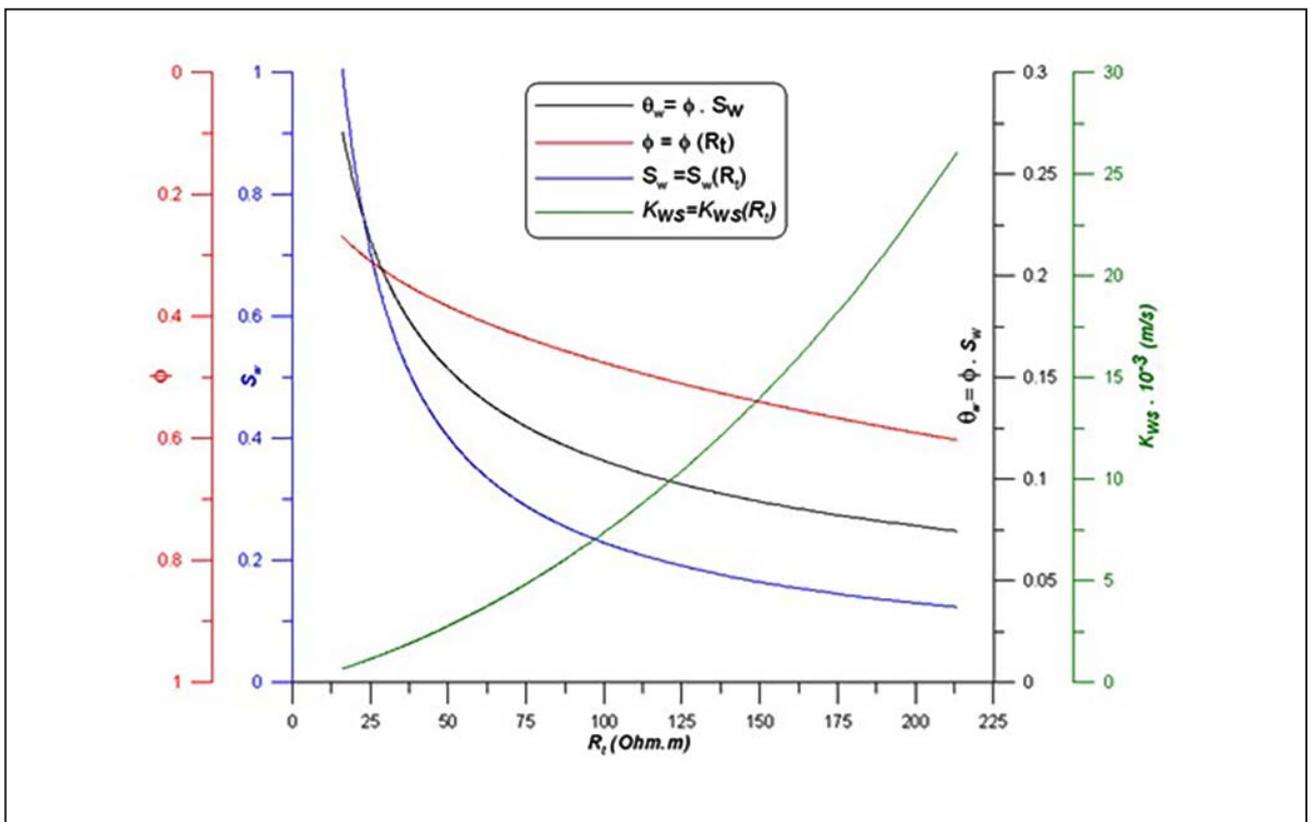


Figura 14. Relaciones  $\phi$ ,  $\theta_w$ ,  $S_w$  y  $K_{ws}$  vs.  $R_t$  para el perfil PE5.

La distribución de porosidades de la Figura 16 muestra que valores mayores de  $\phi$  se corresponden con valores mayores de resistividades  $R_t$  estimadas con kriging (relación directa). La distribución del grado de saturación  $S_w$  de la Figura 17 muestra correspondencia directa entre valores mayores de  $S_w$  con valores mayores del contenido volumétrico de agua  $\theta_w$  y a

su vez con valores menores de resistividades  $R_t$  estimadas con kriging. Finalmente, la Figura 18 muestra la distribución de la permeabilidad saturada  $K_{ws}$  en el perfil PE5, donde se aprecia una correspondencia directa entre valores  $K_{ws}$  con valores de porosidad  $\phi$  y de resistividad  $R_t$  así como una correspondencia inversa entre valores de  $K_{ws}$  con valores de bajos de  $\theta_w$  y  $S_w$ .

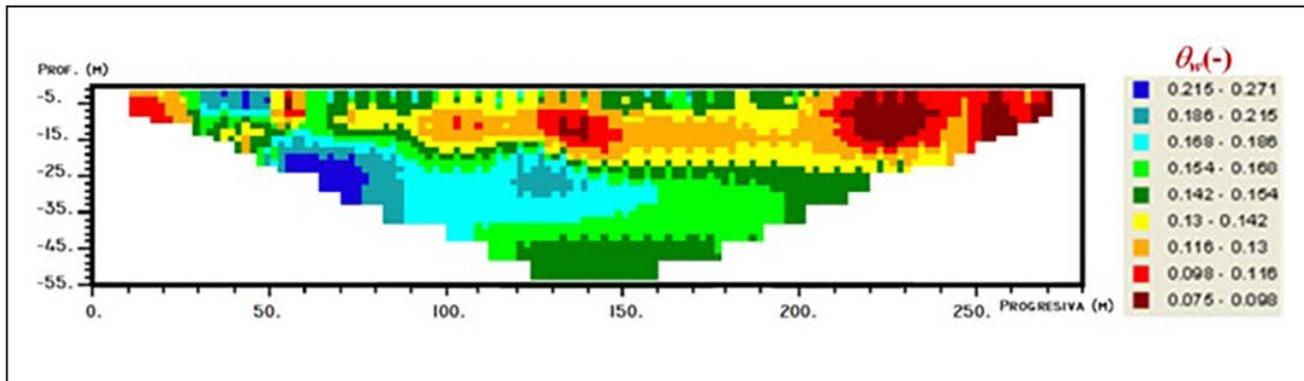


Figura 15. Distribución del contenido volumétrico de líquido en el perfil PE5.

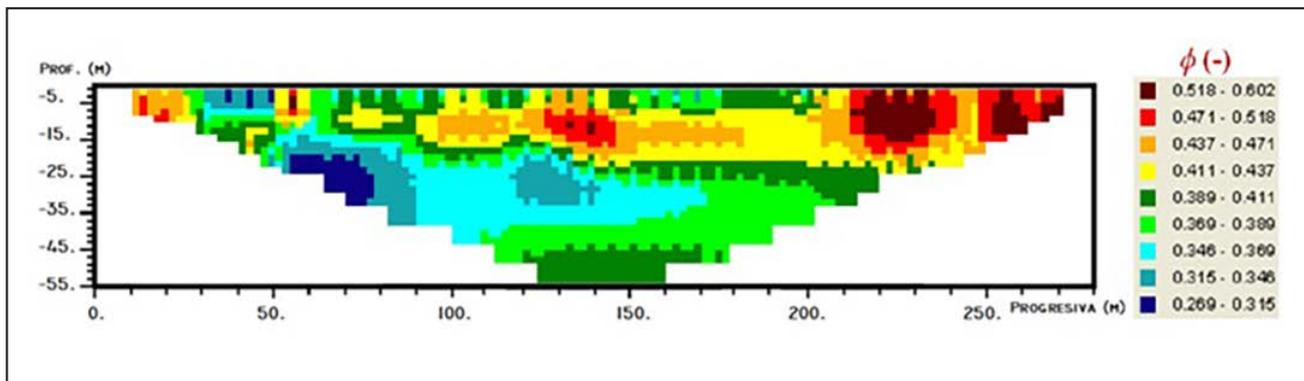


Figura 16. Distribución de la porosidad en el perfil PE5.

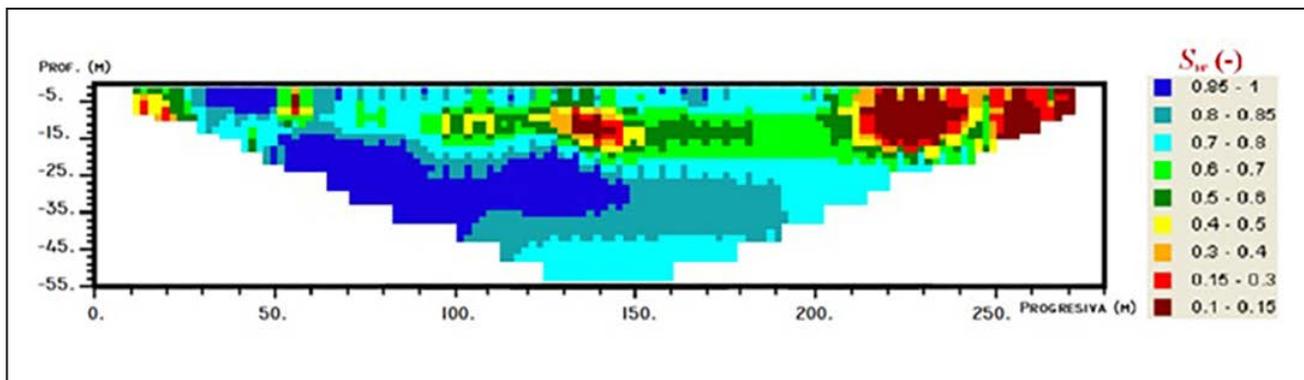


Figura 17. Distribución del grado de saturación en el Perfil PE5.

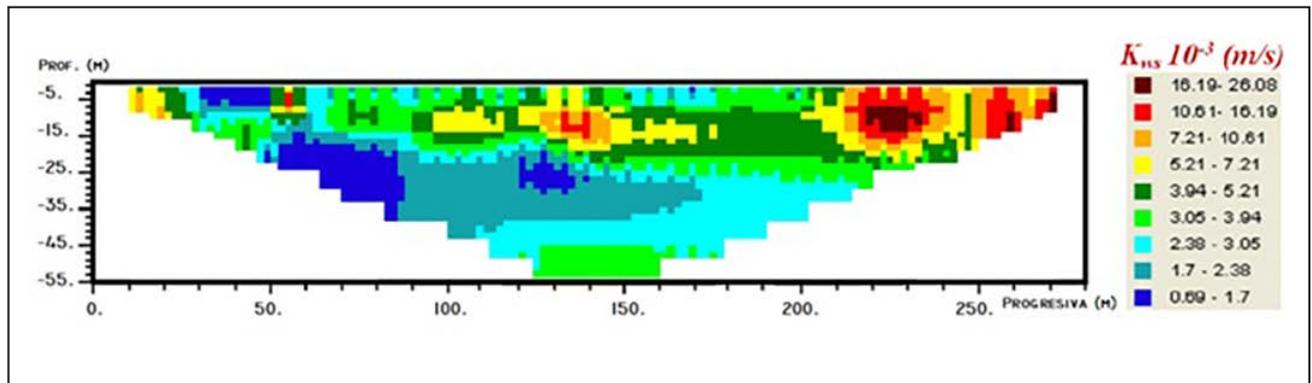


Figura 18. Distribución de la conductividad hidráulica saturada en el perfil PE5.

### CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas geoestadísticas sobre la base de mediciones de resistividades realizadas en el terreno con tomografía eléctrica abre las puertas para abordar problemas de drenaje en pilas de lixiviación, ya que permite realizar estudios con un carácter más cuantitativo, lo que ayuda a reducir la incertidumbre. El método geoestadístico aplicado a perfiles geofísicos de la pila de lixiviación de Gualcamayo muestra que los esquemas de clasificación de variables basados en mediciones de la dispersión son más confiables, pues reflejan la cantidad y calidad de la información empleada en la evaluación. Los resultados muestran sectores con diferentes condiciones de riego en la pila con un alto grado de seguridad. Este estudio refuerza la opinión de muchos autores que recomiendan a la Geoestadística como procedimiento válido y confiable en el proceso de categorización y clasificación de variables regionalizadas.

Los gráficos resultantes dan una idea de la distribución de los valores del contenido volumétrico de líquido, porosidad, grado de saturación y de la conductividad hidráulica en la zona de estudio. La obtención de la distribución de conductividades hidráulicas en el perfil PE5, derivada a partir del modelo de resistividades obtenido aplicando el método geoestadístico, las leyes de Archie y conceptos de la mecánica de los suelos no

saturados, conduce a una mejor comprensión del flujo de líquido en el interior de la pila de Gualcamayo. Extendiendo el estudio a los otros perfiles geofísicos es posible abarcar todo el volumen de la pila. Así se puede distinguir sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco o riego nulo, y sectores con valores de resistividad bajos correspondiente a sectores con mayor riego.

La existencia de sectores de la pila bajo diferentes condiciones de riego del mineral puede conducir al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos en el interior de la pila. Las fluctuaciones de la estructura espacial de la permeabilidad del mineral controlan las vías de circulación del líquido y la magnitud de los flujos. Este aspecto resulta de suma importancia ya que utilizando el marco de la mecánica de suelos no saturados se pueden determinar las condiciones de flujo en el interior de la pila y derivar el rendimiento de la operación extractiva.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Mineras, al Departamento de Ingeniería de Minas y al CICITCA de la Universidad Nacional de San Juan, el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARCHIE G.E. 1942.  
The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.  
*American Institute of Mineral and Metal Engineering. Technical publication, 1442, Petroleum Technology, pp. 8-13.*
- CAROTHERS J.E. 1968.  
A statistical study of the formation factor relation.  
*Log Anal 9(5):13-20.*
- DAVID, MICHEL.1977.  
Geoestatistical Ore Reserve Estimation (Developments in Geomathematics 2).  
*Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.*
- DELAHAYE, C.H., BERENQUER, T.A, GATICA, G. Y BILBAO, M.A. 2016.  
Efecto de la permeabilidad del mineral sobre las condiciones de flujo no saturado en pilas de lixiviación.  
*Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. XXIII CAMSIG, 9-11 noviembre 2016, Santa Fe, Argentina. 504-521.*
- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A. G.1992.  
Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide.  
*Oxford University Press, New York.*

- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A. G. 2011.  
Geostatistical Software LIBrary "WinGSLIB".  
*Versión 1.5.8. Statios LLC - Software and Services, www.statios.com.*
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H.1993.  
Soil Mechanics for Unsaturated Soils.  
*John Wiley & Sons, Inc.*
- GOMEZ-RIVERO O. 1977.  
Some considerations about the possible use of the parameters  $\alpha$  and  $m$  as a formation evaluation tool through well logs.  
*Trans SPWLA 18th Ann Logging Symp: J 1-24.*
- HILL, H.J. AND MILBURN, J.D. 1956.  
Effect of clay and water salinity on electrochemical behaviour of reservoir rocks.  
*Trans. AIME, 207: 65-72.*
- JOURNAL, A.G. Y C.H. J. HUIJBREGTS. 1978.  
Mining Geostatistics.  
*Academics Press, New York.*
- KHALIL, M.A. & MONTERIO SANTOS, F. A.2009.  
Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity-Hydraulic Conductivity Relationship.  
*Chapter 2.Earth and Planetary Sciences, Geology and Geophysics, Developments in Hydraulic Conductivity Research, Book edited by Oagile Dikinya, ISBN 978-953-307-470-2, www.intechopen.com.*
- MCBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. AND BURGESS, T.M. 1981.  
The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I.  
*Computers and Geosciences. 7(4): 331-334.*
- ONORATO, M. 2019.  
Comportamiento THM y metalúrgico de pilas de lixiviación de minerales auríferos.  
*Tesis de Maestría. Maestría en Metalurgia Extractiva. Versión en evaluación. Universidad Nacional de San Juan.*
- PORTER, C.R. AND CAROTHERS, J.E. 1970.  
Formation factor-porosity relation derived from well log data.  
*Trans. SPWLA 11th Ann. Logging Symp: 1-19.*
- RODRÍGUEZ, A. Y MAZUELOS, O. 2015.  
Geofísica geotécnica a partir de tomografías eléctricas y MASW.  
*Empresa Minas Argentinas - Yamana Gold. Mina Gualcamayo. San Juan. Argentina. Informe Técnico - Estudios Geofísicos GEOAR S.R.L., Rev. 0.*
- SALEM, H.S. 2001.  
Determination of Porosity, Formation Resistivity Factor, Archie Cementation Factor, and Pore Geometry Factor for a Glacial Aquifer.  
*Energy Sources, 23:6, 589-596. DOI: 10.1080/00908310152125238.*
- SCHON, J. 1983.  
Petrophysik.  
*Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen: Akademie-Verlag, Berlin, 405 pp.*
- THIEL, R. & SMITH, M. 2004.  
State of the practice review of heap leach pad design issues.  
*Geotextiles and Geomembranes, 22(6), 555 - 568.*
- TIMUR, A., HEMKINS, W.B. AND WORTHINGTON, A.E. 1972.  
Porosity and pressure dependence of formation resistivity factor for sandstones.  
*Trans. CWLS 4th Formation Evaluation Symp., 30pp.*
- WACKERNAGEL. H. 1995.  
Multivariate Geostatistics.  
*An Introduction with Applications. Springer-Verlag, Berlin.*

# 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, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.*

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

## a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado con anterioridad, total o parcialmente.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o *copyright*), que los derechos de terceros (*terceras partes*) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se admitirán trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y el Editor de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico.
- Todos los trabajos serán evaluados preliminarmente por el Editor y serán enviados a revisión por pares en carácter doble ciego según los pasos indicados en ítem e) de las instrucciones para autores.
- La presentación de un nuevo trabajo debe ser acompañada de una carta 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 trámite editorial en la Revista. La misma encabezará el PDF generado por el sistema OJS, antes de llenar los archivos complementarios en formato original. Debe mencionar los posibles revisores con los que existan conflictos de intereses.
- Los artículos que no cumplan las normas serán devueltos sin arbitrar.
- En el caso que el número de autores no socios de ASAGAI supere el 50% de la totalidad de los mismos, se deberá proceder al pago, en concepto de derecho de publicación, de un monto equivalente al 40% del monto de la cuota anual de la Asociación.

## b) Sobre el formato y la extensión del texto, tipos de letra, páginas, párrafos y leyendas:

- Los artículos originales deberán tener una extensión que no supere las 20 (veinte) páginas y deberá ajustarse a las normas indicadas a continuación.
- En las notas técnicas la extensión total del manuscrito no debe superar las 3 (tres) páginas, debe incluir Resumen, Abstract, Palabras clave, Keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla.
- En el caso de Artículos Invitados y Artículos Especiales 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. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.

- El texto debe prepararse en el procesador de texto de uso corriente Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra 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 en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.
- Debajo del título, en texto centrado, en letra 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.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. En el caso de que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras, las "Palabras clave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords". A continuación se inicia 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. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso de que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "Resumo" de hasta 200 palabras, seguido de las "Palavras chave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords" en inglés. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman tamaño 12, ainterlineado sencillo, con sangría de un centímetro y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.
- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297mm). El área de trabajo será de 170mm de ancho y 247mm de altura. Es decir, 20mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superior e inferior de 25mm. Se debe usar justificación completa.
- 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. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser legibles.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra

- "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use 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,  $Ca^{2+}$  y  $CO_3^{2-}$ , no como  $Ca^{++}$  o  $CO^{-3}$ .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo:  $^{18}O$
- Donde sea posible 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  $P_2O_5$ ).

### c) Sobre el formato de figuras y tablas:

- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja. Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de calidad. Deben tener una resolución mínima de 300 dpi.
- Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.
- 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 letra Times New Roman tamaño 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda preparar leyendas sean 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, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). El tamaño se deberá limitar, como máximo, a una caja de 15 x23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como **archivos individuales** en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Microsoft Word o PowerPoint, por ejemplo. 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 ser contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg o pdf. Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Las fotografías o figuras podrán ser enviadas a color (preferentemente).
- 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.
- Las tablas 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. Se usará letra Times New Roman tamaño 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda.

### d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores.

- 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 o los autores. 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 se adhiere a las normas internacionales de citación bibliográfica de la **American Psychological Association (APA)**, siendo ésta uno de los estándares más reconocidos para la transmisión del conocimiento científico y académico desde su primera edición en 1929. 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 al 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 y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm. Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980): Casio, M.; Marcinus, F.; Salina, R y Hubbard, R.T. (1980). La caída del imperio romano. *Revista de Occidente*, Vol. 180: 224-234.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:
  - 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 dife-rente 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:

- 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.
- 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 & Á.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 al 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.

#### e) Arbitraje

Los artículos son inicialmente revisados por el Comité Editorial y/o Editor en Jefe, el cual revisa que satisfaga los requisitos formales y la presente política editorial.

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 doble 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 rechazado. El proceso de evaluación, entre el momento en que es recibido y posee un dictamen de revisión, tiene un tiempo estimado de hasta 3 (tres) meses.

#### f) Envíos

El único medio de presentación de manuscritos es a través de la página web

<http://www.editoriasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia>

Para proceder al envío de su MS el autor deberá registrarse en el mencionado sitio siguiendo las instrucciones que allí se detallan. 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.

Al momento de preparar el MS se solicita cumplimentar las normas que son indispensables para proceder a la evaluación del mismo. Es motivo de devolución el incumplimiento de las normas editoriales.

La versión del manuscrito a ser enviada debe consistir de un único archivo PDF (Portable Document Format). El texto, las figuras y los epígrafes (realizados según las instrucciones) deberán ser subidas como "archivos complementarios". 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. Cargarlas "reemplazando" las originales y no como nuevos archivos, pero con las modificaciones requeridas.

Vea un instructivo para autores que lo ayudará en esta etapa Aquí.

Las figuras pueden ser enviadas en color. En la versión impresa serán publicadas en blanco y negro, mientras que en la plataforma electrónica irán en color (gratuitamente). El costo de impresión de ilustraciones en color correrá por cuenta de los autores.

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

#### 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 sospecha de que un artículo es sustancialmente copia de otro trabajo, por favor indíquelo 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](http://www.plagium.com)) para la verificación de textos breves de hasta 5000 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](mailto: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 01-04-2020):**

**Para Argentina:**

- Compra de número vigente: **1200** Pesos
- Compra de número atrasado: **1600** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **400** Pesos por artículo

**Para el exterior:**

- Compra de número vigente: **14** Dólares
- Compra de número atrasado: **18** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **4** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-04-2020):**

**Para Argentina:**

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **2400** Pesos
- Suscripción Instituciones: **9600** Pesos
- Compra de número atrasado: **1600** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **400** Pesos por artículo

**Para el exterior:**

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **28** Dólares
- Suscripción Instituciones: **108** Dólares
- Compra de número atrasado: **18** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **4** 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](http://www.asagai.org.ar)*

**Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la Revista.**



INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR  
**ENGINEERING GEOLOGY**  
AND THE **ENVIRONMENT**



**ASAGAI**  
ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

**1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y**

**2º Congreso Argentino de Geología  
Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**

**1st IAEG South American Regional Conference and**

**2nd Argentine Congress of Geology  
Applied to Engineering and the Environment**

**Geología aplicada al desarrollo de la sociedad**  
*Geology applied to society development*

**Córdoba, 6 al 10 de septiembre de 2021**

*Córdoba, September 6-10, 2021*

**Contacto académico / Academic contact: [congreso@asagai.org.ar](mailto:congreso@asagai.org.ar)**  
**Contacto comercial / Commercial contact: [aw@tradeshowsa.com.ar](mailto:aw@tradeshowsa.com.ar)**

## 1<sup>o</sup> Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2<sup>o</sup> Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

El evento marca el regreso integral de la International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) a la región tras 35 años, por cuanto el antecedente es el V<sup>o</sup> Congreso llevado a cabo en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires en 1986.

Los días 4 y 5 de septiembre se desarrollarán las **reuniones del Comité Ejecutivo y del Consejo**, respectivamente. Esto, junto a las **sesiones técnicas, cursos cortos y salidas de campo**, dará lugar a una **semana plena de actividades académicas y sociales** que harán de Córdoba 2021 una marca en la vida institucional y en la región.

**Esperamos que este evento cautive el interés de profesionales de distintas disciplinas de la geología aplicada, jóvenes científicos y estudiantes**, y que puedan participar y exponer sus resultados y avances en la investigación aplicada a la ingeniería, al ambiente y al desarrollo de la sociedad.

*The event marks the integral return of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) to the region after 35 years, since the antecedent is the V Congress held in the Autonomous City of Buenos Aires in 1986.*

*On September 4 and 5, the meetings of the Executive Committee and the Council will be held, respectively. This, together with the technical sessions, short courses and field trips, will lead to a full week of academic and social activities that will make Córdoba 2021 a mark in institutional life and in the region.*

*We hope that this event captivates the interest of professionals from different disciplines of applied geology, young scientists and students, and that they can participate and present their results and advances in research applied to engineering, the environment and the development of society.*

### Objetivos / Objectives

El objetivo principal de la Conferencia es compartir el conocimiento y la experiencia práctica en el tratamiento de cuestiones vinculadas con la **Geología Aplicada al desarrollo de la sociedad**.

*The conference's main goal is to share knowledge and practical experience in dealing with issues on **Geology Applied to society development**.*

### IAEG - International Association for Engineering Geology and the Environment

IAEG (<https://www.iaeg.info/>) fue creada en 1964 y está afiliada a la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS). Es una sociedad internacional con más de 4.400 miembros y 61 grupos nacionales. Los idiomas oficiales son inglés y francés.

Los objetivos de IAEG son: promover y fomentar el avance de la Geología aplicada a la Ingeniería por medio de actividades tecnológicas e investigación; mejorar la enseñanza y la formación en Geología aplicada a la Ingeniería; recopilar, evaluar y difundir los resultados de actividades promoviendo la formación de Grupos Nacionales de Geología aplicada a la Ingeniería y su afiliación a la Asociación; la organización de congresos, simposios y otras reuniones; la creación y funcionamiento de comisiones especializadas y otras unidades organizacionales para el estudio de asuntos de interés para la Asociación; la publicación de los logros científicos y técnicos de los miembros del IAEG en los boletines periódicos y en la publicación técnica e interactuar con otras asociaciones científicas y técnicas.

*The IAEG (<https://www.iaeg.info/>) was founded in 1964 and is affiliated to the International Union of Geological Sciences (IUGS). IAEG is a worldwide scientific society with more than 4,400 members and 61 national groups. The official languages of the IAEG are English and French.*

*The aims of the International Association for Engineering Geology and the Environment are:*

*to promote and encourage the advancement of Engineering Geology through technological activities and research; to improve teaching and training in Engineering Geology; and to collect, evaluate and disseminate the results of engineering geological activities on a worldwide basis by encouraging the formation of National Groups of Engineering Geology and their affiliation with the Association; the organization of Congresses, Symposia and other meetings; the creation and operation of specialist commissions and other organizational units for the study of matters of interest to the Association; the publication of the scientific and technical achievements of members of the IAEG in the IAEG's own periodical and relevant news in the IAEG newsletter ; and interacting with other scientific and technical associations as may be appropriate.*

### **ASAGAI – Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería**

ASAGAI (<https://asagai.org.ar>) es una entidad civil sin fines de lucro constituida el 29 de diciembre de 1975. Es el Grupo Nacional argentino de la International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG).

Son sus fines: a) Promover la colaboración entre los profesionales y científicos interesados en el campo de la Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente; b) Estimular y extender la aplicación e investigación de la Geología y disciplinas afines, con relación a la Ingeniería y el Ambiente, para la mejor solución técnica y económica de problemas de interés tanto general como local. c) Vincular a los profesionales que se interesen por la Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente en la República Argentina y en el exterior. d) Facilitar el intercambio nacional e internacional de información relativa a sus actividades especializadas. e) Mantener vinculación permanente con IAEG. f) Estimular la cooperación entre la Geología y disciplinas afines, y la ingeniería.

Desde su primer Simposio, en 1981, la Asociación ha organizado periódicamente reuniones, dictado cursos y generado publicaciones especiales relacionadas a la geología aplicada y el riesgo geológico. Publica desde 1998, semestralmente, la Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.

*ASAGAI (<https://asagai.org.ar>) is a non-profit civil entity incorporated on December 29, 1975. It is the Argentine National Group on the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG).*

*Its purposes are: a) To promote collaboration between professionals and scientists interested in the field of Geology Applied to the Engineering and the Environment; b) Stimulate and extend the application and research of Geology and related disciplines, in relation to Engineering and the Environment, for the best technical and economic solution of problems of both general and local interests; c) Link professionals who are interested in Geology Applied to Engineering and the Environment in the Argentine Republic and abroad; d) Facilitate the national and international exchange of information related to its specialized activities; e) Maintain permanent links with IAEG; f) Stimulate cooperation between Geology and related disciplines, and engineering.*

*Since its first Symposium, in 1981, the Association has periodically organized meetings, taught courses and generated special publications related to applied geology and geological risk. It publishes, since 1998, every six months, the Journal of Geology Applied to the Engineering and the Environment.*

### **Temas / Themes**

- Aspectos geológico-ingenieriles en la construcción y patología de obras / *Geological-engineering aspects in the construction and building pathology*
- Cartografía temática / *Thematic cartography*
- Geología ambiental / *Environmental geology*
- Geología Urbana y el Ordenamiento Territorial / *Urban Geology and Territorial Planning*
- Geología costera / *Coastal geology*
- Geología médica / *Medical geology*
- Geomecánica / *Geomechanics*
- Gestión integrada de recursos hídricos / *Integrated management of water resources*
- Parques Geológicos y Geoturismo / *Geological Parks and Geotourism*
- Riesgo geológico / *Geological Risk*
- Rocas ornamentales / *Ornamental rocks*
- Rocas de aplicación y otros materiales de uso ingenieril / *Industrial rocks and other materials for engineering use*

**1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**
**Comité Organizador / Organizing Committee**
**Presidente / President**

**MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman**  
UCIS Consultores

**Secretaria / Secretary**

**Dra. María Paula Bunicontro**  
CONICET - Universidad de Buenos Aires (UBA) -  
Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires

**Tesorero / Treasurer**

**Lic. Alejandro E. Celli**  
Organismo Regulador de Seguridad de Presas.  
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires

**Miembros / Members**

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

**Dra. María Victoria Altinier**  
Comisión Nacional de Energía Atómica -  
Programa Nacional de Gestión de Residuos Radioactivos

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

**Dra. Ana Cecilia Dufilho**  
Facultad de Ingeniería (FAIN) y Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud (FACIAS) de la Universidad Nacional del Comahue -  
CONICET-UNCo - Centro de Investigaciones en Toxicología Ambiental y Agrobiotecnología del Comahue (CITAAC) Centro de Investigación en Geociencias de la Patagonia (CIGPat) de la Facultad de Ingeniería (FAIN)

**MSc Lic. Mirian G. Viqueira Palazzo**  
UCIS Consultores

**Dr. Ing. Marcelo E. Zeballos**  
Universidad Nacional de Córdoba.  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.  
Departamento de Construcciones Civiles. Área de Geotecnia.

**1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**

**Programa**

SÁBADO 4/09	DOMINGO 5/09	LUNES 6/09	MARTES 7/09	MIÉRCOLES 8/09	JUEVES 9/09	VIERNES 10/09
Comité Ejecutivo de IAEG	Consejo de IAEG	Viaje del Comité Ejecutivo y asistentes a reunión del Consejo. . Reunión de sociedades de la región. . Curso	Excursión pre-congreso. . Curso . Viaje de acompañantes	Ceremonia de Apertura . Conferencias . Sesiones Técnicas . Jóvenes . Sesión de póster	Conferencias . Sesiones Técnicas . Sesión de póster . Cena	Sesiones Técnicas . Ceremonia de cierre

**Program**

9/04 (SATURDAY)	9/05 (SUNDAY)	9/06 (MONDAY)	9/07 (TUESDAY)	9/08 (WEDNESDAY)	9/09 (THURSDAY)	9/10 (FRIDAY)
IAEG Executive Committee Meeting	IAEG Council Meeting	IAEG Executive Committee and IAEG Council participants. Field trip . Regional members meeting . Course	Pre-event field trip . Course . Companion Tour	Opening Ceremony . Conferences . Concurrent Session . YEG Session . Poster Session	Conferences . Concurrent Session . Poster Session . Banquet	Concurrent Session . Closing Ceremony



**1st IAEG South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress Of Geology Applied To Engineering And The Environment**

## Presentación de Trabajos / *Works Submissions*

Se convoca a la comunidad científica y técnica a participar y enviar trabajos originales e inéditos, los cuales serán sometidos a consideración del Comité Científico y evaluadores para su aprobación. Las modalidades de presentación serán resúmenes y trabajos completos, en ponencias orales y posters.

En la Segunda Circular se incluirán los detalles del formato requerido para cada uno.

Los idiomas oficiales del evento son español, inglés y portugués.

*The scientific and technical community is invited to participate and send original and unpublished works, which will be submitted for consideration by the Scientific Committee and reviewers for approval. The types of submission will be abstracts and complete works, in oral presentations and posters.*

*The Second Circular will include the format details required for each submission.*

*The official languages of the event are Spanish, English and Portuguese.*

## Cursos y Excursiones Técnicas / *Courses And Field Trips*

Los días 6 y 7 de septiembre se desarrollarán **cursos cortos**, los que se anunciarán en la Segunda Circular.

El día 7 tendrá lugar una **excursión técnica**, la que será anunciada en la Segunda Circular.

*On September 6 and 7, **short courses** will be developed, which will be announced in the Second Circular.*

*On day 7 a technical **field trip** will take place, which will be announced in the Second Circular.*





### Fechas Importantes / Important Dates

- Recepción de resúmenes / *Abstract Submission*: **1 al 23 de noviembre de 2020 / November, 1st to 23th 2020**
- Recepción de trabajos completos / *Full Articles Submission*: **3 de mayo de 2021 / May, 3rd 2021**
- Segunda Circular / *Second Circular*: **09/2020 / 2020/09**
- Tercera Circular / *Third Circular*: **04/2021 / 2021/04**



### Sede del Evento / Venue

El evento tendrá lugar en La Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional, situada en Maestro M. López esquina Cruz Roja (<https://www.frc.utn.edu.ar/>) en Ciudad Universitaria de la ciudad de Córdoba.

*The event will be held on Regional Córdoba Faculty of the National Technology University, located in Maestro M. López and Cruz Roja (<https://www.frc.utn.edu.ar/>) in University City of Córdoba city.*



**1ª Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**

**Ciudad de Córdoba / Cordoba City**

Situada en el centro geográfico de Argentina, la Ciudad de Córdoba es la capital de la provincia del mismo nombre. Dista 680 km de Buenos Aires y cuenta con el Aeropuerto Internacional "Ambrosio Taravella" y usualmente hay arribos directos desde Buenos Aires, Europa, Estados Unidos, Perú, Brasil y Panamá (<https://www.aa2000.com.ar/>).

Córdoba posee diferentes e importantes sitios históricos, turísticos y culturales para visitar. La ciudad ofrece distintas opciones para alojamientos como hoteles de 2 a 5 estrellas, departamentos, apart hoteles y hostels económicos. A su vez, ofrece una gran variedad de comida y bebidas locales, comidas caseras, restaurantes italianos, cocina árabe, comida oriental y buena panadería. La sede del evento se encuentra en el centro de la ciudad, por lo que todo lo que el visitante necesite se encuentra a mano, con muchas facilidades.

El clima es templado húmedo con una temperatura media de 18°C. Durante septiembre la temperatura varía entre los 9° y 23°C y es frecuente el viento desde el norte y noreste.

*Sited in the geographical center of Argentina, Córdoba city is the capital of the province of the same name. It is 680 km from Buenos Aires city and it count with the International Airport "Ambrosio Taravella" and usually there are direct arrivals from Buenos Aires, Europe, USA, Chile, Perú, Brazil and Panamá (<https://www.aa2000.com.ar/>).*

*Córdoba has different important historic, touristic and cultural places to visit. The city offers different options for accommodation such as hotels of 2 to 5 stars, apartments, apart hotels and economic hostels. It also offers a great variety of native food and drinks, home cooking, Italian restaurants, Arabian cuisine, oriental food and good bakery. The venue of the event is in the center of the city, so everything the visitor needs is handy, with lots of facilities.*

*The climate is humid temperate with a mean temperature of 18°C. During September, the temperature varies from 9° to 23°C and the winds from the north and northeast are common.*

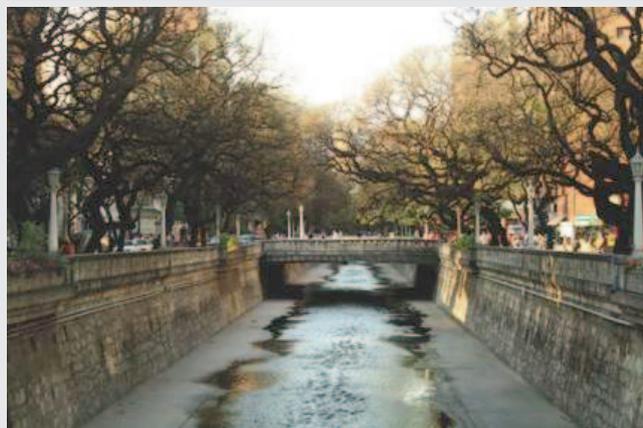
**1st Iaeg South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress Of Geology Applied To Engineering And The Environment**



Córdoba es una ciudad con identidad propia, con un gran valor patrimonial, histórico y cultural. Es una ciudad con más de cuatro siglos de historia, atravesada por grandes avenidas y el hogar de modernos edificios, importantes centros comerciales, una destacada oferta hotelera-gastronómica y una intensa vida nocturna. ¡Así es Córdoba! Ubicada en el centro del país y conectada con todos, Córdoba es una ciudad vibrante, alegre y divertida. La hospitalidad, la simpatía y el buen humor son sellos de distinción de los cordobeses, que harán de su visita una estadía inolvidable.



*Córdoba Córdoba is a city with its own identity, with a great heritage, historical and cultural value. It's a city with more than four centuries of history, crossed by large avenues and home of moderns buildings, important shopping centers, an outstanding hotel-gastronomic offer and an intense nightlife. This is Córdoba! Sited in the center of the country and connected with everyone, Córdoba is a brisk, happy and funny city. The hospitality, sympathetic and good humor are hallmarks of Córdoba people, which make your visit an unforgettable stay.*



**1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**
**Oportunidades de Patrocinio**

Se invita a participar a toda aquella empresa proveedora de servicios, productos, equipamiento geológico e ingenieril, o afines, a patrocinar el evento. Las mismas son un valioso apoyo al éxito de esta reunión, obteniendo a su vez la oportunidad de presenciar el evento y exhibir sus productos. Los interesados pueden contactarse enviando un email a: [aw@tradeshowsa.com.ar](mailto:aw@tradeshowsa.com.ar)

*All companies that provide services, products, geological and engineering equipment or develop similar activities are invited to participate to sponsor the event. They are a valuable support to the success of the meeting, obtaining at the same time, the opportunity to witness the event and display their products. Those interested in participate can contact us sending an email to: [aw@tradeshowsa.com.ar](mailto:aw@tradeshowsa.com.ar)*


**Contacto académico / Academic Contact:**
[congreso@asagai.org.ar](mailto:congreso@asagai.org.ar)
**Contacto comercial / Comercial Contact:**
[aw@tradeshowsa.com.ar](mailto:aw@tradeshowsa.com.ar)

**Página Web / Web Page:**
<https://iaegsa2021.org/>

**1st iaeg South American Regional Conference and**
**2nd Argentine Congress Of Geology Applied To Engineering And The Environment**

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2020  
Editada en Argentina

Se terminó de editar en Junio de 2020



# ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Mapas de susceptibilidad de licuefacción potencial ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia  
*Sadud, Faisal*

---

Estimación de curvas IDF para tormentas de larga duración en la cuenca del río Gualeguay  
en la provincia de Entre Ríos

*Margasin, Andrea - Bruno, Sabina - Gimenez, Vanesa - Mastaglia, María Inés - Sato, Rodolfo*

---

Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales,  
acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta. Argentina

*Quispe, Carmen - Visich, María*

---

Estimación del campo de conductividades hidráulicas en pilas de lixiviación

*Delahaye, Carlos H. - Berenguer, Tadeo A. - Bilbao, M. Alejandra - Gatica, Graciela*

---

Portada: Dique Chico - ciudad de San Luis. *Fotografía: Daniel A. Sales*

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

