

# 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 46 • 2021

ISSN 2422-5703 (En línea)

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



Editada en la Ciudad de Córdoba - Argentina



**EDITOR JEFE**

*MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman*

UCIS Consultores

editor@editoresasagai.org.ar

**EDITORIA ASOCIADA**

*Dra. Marcela Perez*

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Argentina

maperez@fich.unl.edu.ar

**COMITÉ EDITORIAL**

*Dr. Carlos Costa*

Departamento de Geología

Universidad Nacional de San Luis

Argentina

costa@unsl.edu.ar

*Lic. Luis Mario Giaconi*

Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)

Universidad Nacional de La Plata

Argentina

lmgiaconi@gmail.com

*Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo*

Departamento de Geodinámica

Universidad Complutense de Madrid

España

vallejo@geo.ucm.es

*Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé*

Departamento de Engenharia Geotécnica

Politécnico do Porto

Portugal

hic@isep.ipp.pt

*Dr. Clemente Irigaray Fernández*

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Granada

España

clemente@ugr.es

*Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso*

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental

Universidade Federal de Santa Maria

Brasil

malvamancuso@ufsm.br

*Dra. Ofelia Tujchneider*

Departamento de Hidrología y Ambiente

Universidad Nacional de El Litoral.

Santa Fe

Argentina

pichy@fich1.unl.edu.ar

*Dr. Marcelo E. Zeballos*

Área de Geotecnia

Departamento de Construcciones Civiles

Universidad Nacional de Córdoba

Argentina

marcelo.zeballos@unc.edu.ar

**SECRETARIA**

*Dra. María Paula 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

---

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
Ecuaciones de calibración del sensor DECAGON EC-5 para la estimación de la humedad en suelos de la Pampa Deprimida	<i>Fajardo González, Luisa Fernanda Entraigas, Ilda - Dietrich, Sebastián</i>	1
Factores que determinan la química del agua en manantiales de uso humano del noroeste de Chubut	<i>Kusch, Rodolfo José - Pizzolon, Lino Arturo</i>	7
Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina	<i>Lanzaro, María Verónica - D'Elia, Mónica Patricia</i>	25
Mapa estratigráfico con fines geotécnicos de la ciudad de Córdoba	<i>Clariá, Juan José - Rouzaut, Sabrina Ares, Mauricio - Eveling, Pablo</i>	43
Identificación y cuantificación del índice de carga contaminante al acuífero freático en el balneario Pehuen-có, Buenos Aires, Argentina	<i>Ruffo, Andrés Gabriel - Rey, Matías Albouy, René</i>	57
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.

### Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

### Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista deberán contactarse con la Editorial ([editor@editoresasgai.org.ar](mailto:editor@editoresasgai.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 o let it available to the public in impressed or electronic format only as a part of a teaching context or as a state-of-the art reviewing, for it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.*

## Price of the Journal

*All interested in buying a copy of any Journal issue should be in contact with the Editor ([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.*



# Ecuaciones de calibración del sensor DECAGON EC-5 para la estimación de la humedad en suelos de la Pampa Deprimida

## Calibration equations of DECAGON EC-5 sensor for moisture estimation in soils of the Flooding Pampa

Fajardo González, Luisa Fernanda <sup>1,2</sup> ✉ - Entraigas, Ilda <sup>1,2</sup> - Dietrich, Sebastián <sup>1,3</sup>

Recibido: 14 de noviembre de 2020 • Aceptado: 29 de enero de 2021

### Resumen

*Se presentan los resultados de los experimentos llevados a cabo en laboratorio durante el proceso de calibración del sensor DECAGON EC-5 para 4 tipos de suelos representativos de la Pampa Deprimida. Se realizó el monitoreo diario de la humedad del suelo durante aproximadamente 3 meses, desde el estado de saturación hasta el secado completo. La correspondencia entre las curvas de desecación obtenidas a partir de los valores registrados por el sensor y por el método termo-gravimétrico es muy dispar según el suelo. Los modelos de regresión lineal entre las señales de salida del sensor (mV) y los contenidos volumétricos de humedad determinados en laboratorio, arrojaron coeficientes de determinación que indican un elevado grado de ajuste. La calibración del sensor DECAGON EC-5 provista de fábrica es, probadamente, adecuada para los suelos de textura franca, pero se aconseja la utilización de las ecuaciones aquí desarrolladas para el ajuste de los datos de contenido de humedad que se registren con este instrumental en los suelos de textura franco-limosa.*

**Palabras clave:** DECAGON EC-5, curvas de calibración, Pampa Deprimida.

### Abstract

*Results of calibration process of DECAGON EC-5 sensor for 4 different soils that develop in the Flooding Pampa are exposed. Daily monitoring of soil moisture was carried out for approximately 3 months, from the saturation state to complete drying. The correspondence desiccation curves obtained both by sensor measurement and thermo-gravimetric method varies depending on soil type. On the other hand, linear regression models between sensor output (mV) and volumetric soil contents determined at lab, showed a high degree of adjustment. The factory-supplied calibration curve for DECAGON EC-5 sensor is proper for loamy textured soils, but it is advisable to use the equations developed here to adjust the water content data in soils with silty-loam texture.*

**Keywords:** DECAGON EC-5, calibration equations, Flooding Pampa.

1. Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff", Av. Rep. de Italia N° 780, Azul, Bs. As, Argentina.

2. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

3. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

✉ lfajardo@ihlla.org.ar

## INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es una variable clave que sintetiza la acción del clima, el suelo y la vegetación en el ciclo hidrológico (Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2004), y su medición es fundamental para la estimación de los balances de agua y energía y para la comprensión de los procesos químicos y biológicos que tienen lugar en su interior (Kizito et al., 2008). La humedad de suelo puede medirse mediante métodos directos e indirectos (Topp et al., 2008). El método directo más utilizado es el termo-gravimétrico, y consiste en la toma de una muestra de suelo que posteriormente es secada en laboratorio por técnicas de evaporación (estufa a 105 °C hasta obtener peso constante), con lo que el contenido de humedad queda determinado por la diferencia de masa entre la muestra inicial y la resultante después del proceso de secado. Los métodos indirectos, por su parte, consisten en la medición de alguna propiedad física o físico-química del suelo que sea significativamente dependiente de su contenido de agua. Dentro de ellos, en las últimas décadas se ha vuelto muy popular la técnica de capacitancia aplicada mediante sensores que, en general, son de menor costo y mayor practicidad que las restantes opciones del mercado. Un sensor de capacitancia está compuesto de electrodos, un oscilador electrónico, un frecuencímetro, y cables conectores. Los electrodos y el suelo adyacente forman un condensador cuya capacidad es función de la constante dieléctrica del suelo, que a su vez lo es de su contenido de humedad. La variación de la capacitancia puede medirse por los cambios de frecuencia de la señal electrónica a través del condensador.

La medición de humedad del suelo mediante sensores de capacitancia es sumamente ventajosa debido a que es un método que provoca mínimos disturbios, permite una lectura instantánea, no requiere mantenimiento, y admite monitoreos continuos durante largos periodos (Stacheder et al., 2009; Silva et al., 2012). Al mismo tiempo, a fin de obtener mediciones precisas, se requiere de una calibración para cada tipo de suelo debido a la gran heterogeneidad de los mismos en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Loiskandl et al., 2010). Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objetivo de la presente nota técnica es presentar los resultados de los experimentos llevados a cabo en el Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" durante el proceso de calibración del sensor DECAGON EC-5 para suelos representativos de la Pampa Deprimida.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La Pampa Deprimida cubre una extensa región de la provincia de Buenos Aires (aproximadamente seis millones de hectáreas) cuya actividad principal es la cría de ganado vacuno, con más del 60 % de su superficie afectada por anegamientos permanentes, junto con exceso de sales y sodio intercambiable en sus suelos. El sector llano de la cuenca del arroyo del Azul es un área representativa de esta región, con limitaciones por condiciones de anegabilidad, alcalinidad, salinidad, muy baja permeabilidad, niveles freáticos someros y escasa profundidad de los suelos (Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989; Lavado, 1992). Los suelos considerados para el experimento fueron aquellos correspondientes a sitios donde se expresan las diferentes comunidades vegetales de la zona: 1. Estepas de halófitas (horizonte superficial muy somero, con alta concentración de sales en superficie), 2. Praderas húmedas de mesófitas (horizonte superficial poco profundo, ácidos y no salinos en superficie pero salinos y alcalinos en profundidad), 3. Praderas de mesófitas (horizonte

superficial profundo, bien drenados, ácidos y no salinos en todo el perfil), y 4. Praderas húmedas (horizonte superficial poco profundo, ácidos y no salinos en superficie, pero frecuentemente alcalinos en profundidad). Los parámetros físico-químicos de muestras representativas de los suelos utilizados en el experimento (Tabla 1) fueron obtenidos en laboratorio mediante los métodos estándares prescritos por la *Soil Science Society of America* y la *American Society of Agronomy* (1996).

**Tabla 1. Características de los suelos analizados (CE: conductividad eléctrica, MO: contenido de materia orgánica, DA: densidad aparente).**

Suelo	Textura	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE (µs/cm)	MO (%)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
1	Franco-limosa	13,9	52,9	33,3	10,2	1214,8	1,7	1,46
2	Franca	10,7	49,1	40,2	6,1	174,8	3,5	1,32
3	Franca	9,5	43,0	47,5	5,5	164,4	1,6	1,28
4	Franco-limosa	14,3	60,4	25,4	7,6	653,5	5,7	1,32

### Descripción del experimento

En primer lugar, se llevó a cabo la recolección de las muestras de suelo a partir del hincado en el terreno (previamente desprovisto de los primeros 5 cm superficiales) de cilindros metálicos de 12,2 cm de altura y 9,4 cm de diámetro interno. Las mismas fueron llevadas al laboratorio donde se pesaron, y se les adosó un paño permeable en la base para evitar la pérdida de suelo y facilitar la posterior entrada de agua por capilaridad. Luego, fueron colocadas en una bandeja con agua hasta 2/3 de la altura de los cilindros, al mismo tiempo que se les agregaba agua sobre la superficie de la muestra. Después de 24 horas, las muestras se retiraron de las bandejas y fueron colocadas sobre una rejilla para eliminar el exceso de agua. Con las muestras en su punto de saturación, se hincaron los sensores en cada una de ellas a través de una ranura ubicada a 2 cm de la base del cilindro. El experimento duró aproximadamente 3 meses, a lo largo de los cuales se registró el contenido de humedad mediante el sensor DECAGON EC-5 (dichas lecturas se almacenaron en el *datalogger* Em5b) y, al mismo tiempo, se pesaron las muestras diariamente. Finalmente, una vez alcanzado el peso constante de las muestras, las mismas fueron secadas en estufa eléctrica a 105 °C para determinar su peso seco. Así, al concluir el período de registros, los diferentes valores de peso obtenidos a lo largo del experimento fueron convertidos a contenido volumétrico de humedad (teniendo en cuenta la densidad aparente y el peso seco de las muestras) a fin de tornarlos en equivalentes a los valores de humedad registrados por el sensor y proceder a la construcción de las curvas de desecación. Posteriormente se aplicó un modelo de regresión lineal a fin de obtener las ecuaciones de calibración directa, relacionando las señales de salida del sensor (expresadas en mV) con los datos de humedad obtenidos por el método termo-gravimétrico (Czarnomski et al., 2005).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La correspondencia entre las curvas de desecación obtenidas a partir de los valores registrados por el sensor DECAGON EC-5 y por el método termo-gravimétrico es muy dispar según el suelo del que se trate. El instrumento sobreestima el contenido de humedad en el suelo 1 (diferencias de 0,12 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de humedad para los valores mayores a 0,25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, y de 0,19 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> en promedio para aquellos menores a dicho valor), exponiendo

una baja sensibilidad del sensor a este tipo de sustrato. Por el contrario, subestima los valores en el suelo 4 (diferencias de  $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para valores superiores a  $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , y adoptando una diferencia constante del orden del  $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para los menores a dicho valor). Cabe señalar que para este suelo en particular no se obtuvo la desecación completa de manera natural en el laboratorio a pesar de haber extendido las observaciones hasta el día 85. Esto se debe al gran contenido inicial de agua (porosidad total cercana al 90%) y a la mayor retención producto del elevado contenido de materia orgánica (Libohova et al., 2018). En el caso del suelo 2, la respuesta del sensor es semejante a las determinaciones realizadas por el método termo-gravimétrico,

aunque con tramos de subestimación ( $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de humedad entre  $0,25$  y  $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) y sobrestimación ( $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para los valores entre  $0,25$  y  $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , y  $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para los mínimos valores de la curva). En el suelo 3, el sensor copió casi fielmente la tendencia de la curva del método termo-gravimétrico, con diferencias promedio inferiores al  $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$  de humedad para todo el espectro de variación (Figura 1). En concordancia con lo planteado por numerosos trabajos antecedentes (Kisito et al., 2008, por ejemplo), a partir de lo observado en los cuatro experimentos se comprobó la fuerte dependencia de la calidad de la respuesta obtenida con las sondas de capacitancia con respecto a la textura de los suelos.

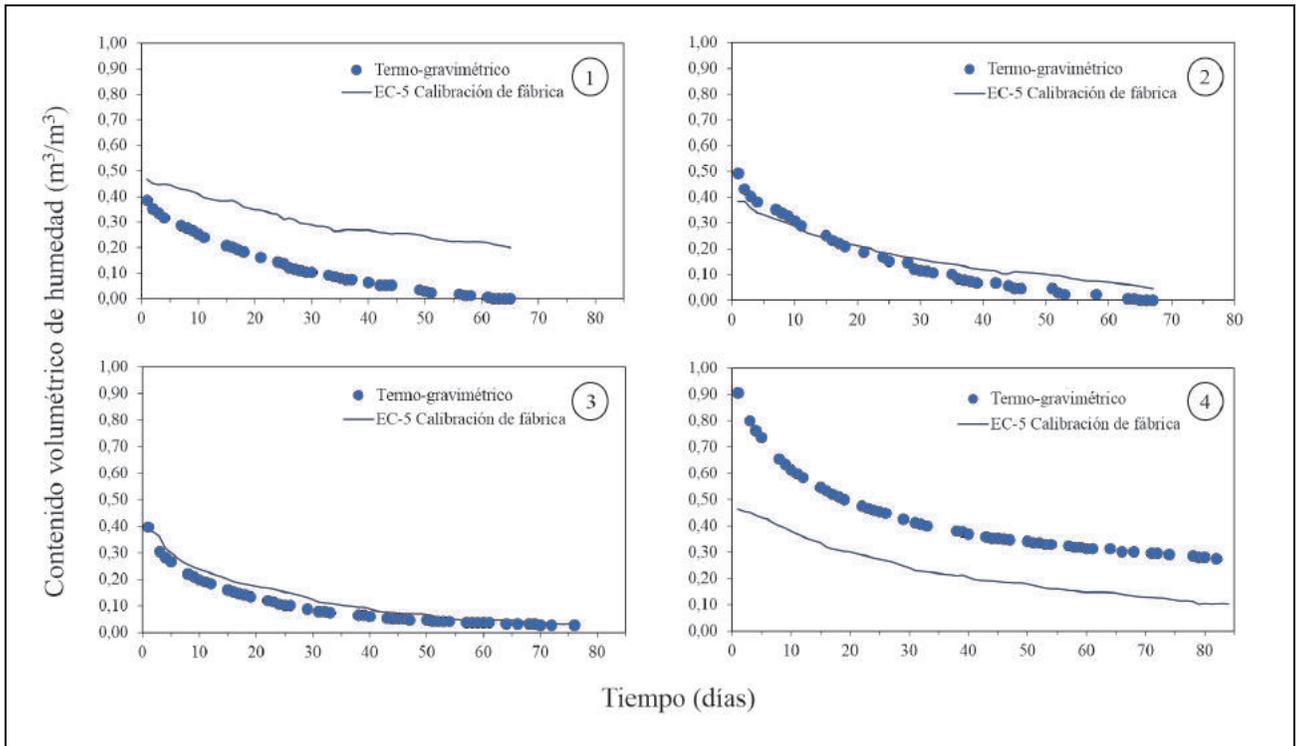


Figura 1. Curvas de desecación obtenidas para cada tipo de suelo.

Los modelos de regresión lineal entre las señales de salida del sensor (RAW) y los contenidos volumétricos de humedad determinados en laboratorio, arrojaron coeficientes de determinación que indican un elevado grado de ajuste de la recta, es decir que un gran porcentaje de la variabilidad total que presenta la humedad del suelo es contemplado por los valores “crudos” de salida del sensor (Figura 2). En la Tabla 2 se detallan los errores estimados según se contemple la calibración de fábrica del sensor o la ex-

perimental, expresados en términos de diferencias mínimas y máximas con respecto al contenido de humedad obtenido por el método termo-gravimétrico. También se adjuntan los errores cuadráticos medios (RMSE), los cuales indican que el modelo del suelo 3 es el más exacto ( $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) y el del suelo 4 el menos exacto ( $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) en la predicción de la respuesta. Asimismo se observa que la calibración experimental reduce notablemente los errores respecto a la calibración de fábrica.

Tabla 2. Ecuaciones de calibración y errores estimados (entre paréntesis se detallan los valores de humedad correspondientes expresados en  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). RAW: salida del sensor en mV.

Suelo	Ecuación de calibración	EC-5 calibración de fábrica			EC-5 calibración experimental		
		Error Mín.	Error Máx.	RMSE	Error Mín.	Error Máx.	RMSE
1	$y = 0,0011 * \text{RAW} - 0,93$	0,08 (0,39)	0,22 (0,03)	0,18	0,02 (0,20)	0,09 (0,39)	0,04
2	$y = 0,0012 * \text{RAW} - 0,76$	0,01 (0,25)	0,11 (0,49)	0,05	0,00 (0,06)	0,04 (0,49)	0,02
3	$y = 0,0008 * \text{RAW} - 0,45$	0,00 (0,03)	0,06 (0,30)	0,03	0,00 (0,03)	0,04 (0,11)	0,03
4	$y = 0,0012 * \text{RAW} - 0,58$	0,16 (0,00)	0,44 (0,91)	0,20	0,01 (0,46)	0,20 (0,00)	0,05

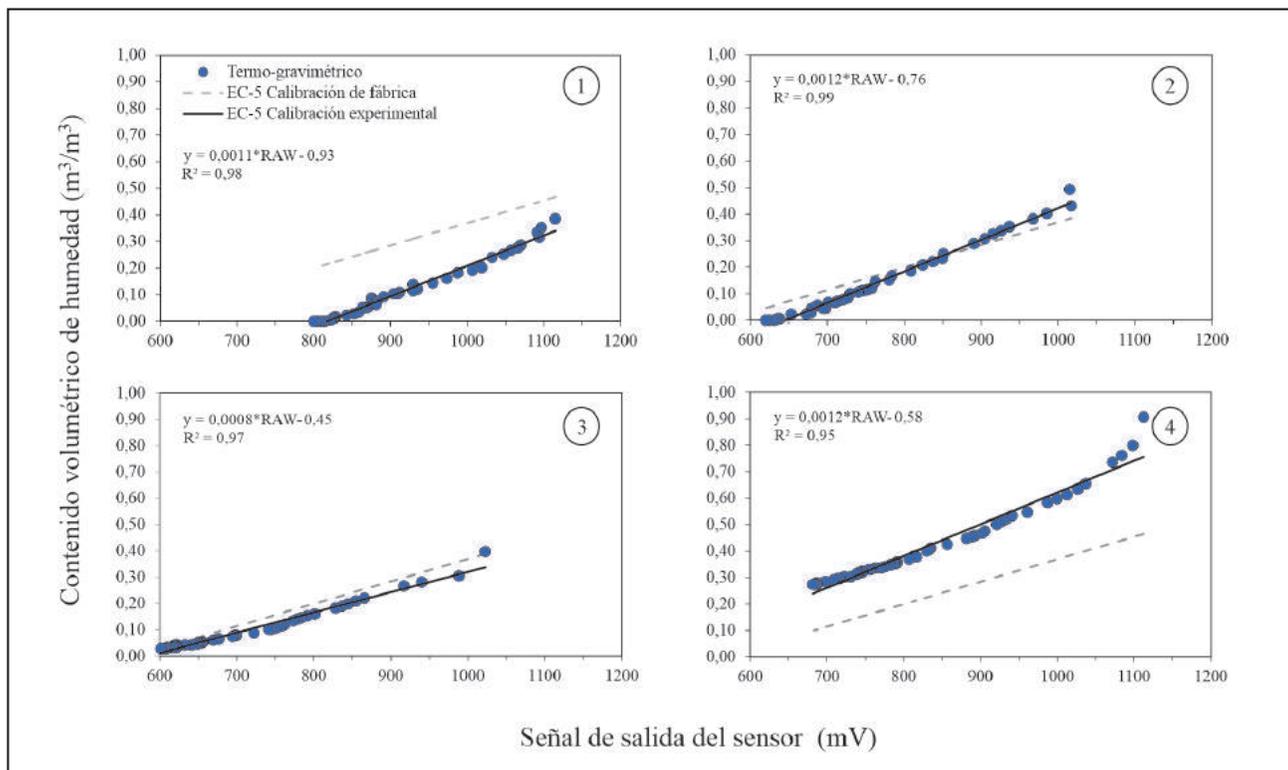


Figura 2: Curvas de calibración (de fábrica y experimental) para cada tipo de suelo.

## CONCLUSIONES

La calibración del sensor DECAGON EC-5 provista de fábrica es, probadamente, adecuada para los suelos de textura franca presentes en las praderas húmedas de mesófitas y las praderas de mesófitas de la Pampa Deprimida, ya que la calibración de fábrica es muy similar al ajuste experimental obtenido. Sin embargo, para los suelos de textura franco-limosa aquí ensayados, es necesario realizar una calibración experimental. Al respecto, se brindan ecuaciones para los suelos de textura franco-limosa,

que en este caso se corresponden con ambientes de estepas de halófitas (fuertemente alcalinos) y praderas húmedas (alta porosidad y alto contenido de materia orgánica). Este aporte surge del hecho de que las sondas de capacitancia son, en principio, fuertemente dependientes de la textura y, por lo tanto, las calibraciones de fábrica responden diferencialmente a esa propiedad; pero al momento de implementar su uso es necesario considerar ciertas particularidades físicas y químicas que presentan suelos de la misma clase textural a fin de obtener una respuesta instrumental más confiable.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CZARNOMSKI, N.M., MOORE, G.W., PYPKER, T.G., LICATA, J. Y BOND, B.J. (2005). Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(8):1867-1876.
- KIZITO, F., CAMPBELL, C.S., CAMPBELL, G.S., COBOS, D.R., TEARE, B.L., CARTER, B. Y HOPMANS, J.W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352(3-4):367-378.
- LAVADO, R.S. (1992). Río de la Plata grasslands. Soils. En: Coupland, R.T. (ed.) *Ecosystems of the World 8A: Natural Grasslands*, Elsevier: Amsterdam.
- LIBOHOVA, Z., SEYBOLD, C., WYSOCKI, D., WILLS, S., SCHOENEBERGER, P., WILLIAMS, C., LINDBO, D., STOTT, D. Y OWENS, P. R. (2018). Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4):411-421.

- LOISKANDL, W., BUCHAN, G., SOKOL, W., NOVAK, V. Y HIMMELBAUER, M. (2010).  
Calibración de sensores de agua de suelo cortos electromagnéticos.  
*Revista de hidrología e hidromecánica*, 58(2):114-125.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I. Y PORPORATO, M. (2004).  
Ecohydrology of Water - Controlled Ecosystems.  
*SoilMoisture and Plant Dynamics*. Cambridge University Press: New York.
- SILVA, B.M., OLIVEIRA, G.C., SERAFIM, M.E., SILVA JÚNIOR, J.J., COLOMBO, A. Y LIMA, J.M. (2012).  
Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro.  
*Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(2):277-286.
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C. Y MOSCATELLI, G. (1989).  
Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires.  
*SAGyP - INTA: Buenos Aires*.
- SSSA, ASA. (1996).  
Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical Methods.  
*Soil Science Society of America Book Series N° 5*. D.L. Sparks: Madison.
- STACHEDER, M., KOENIGER, F. Y SCHUHMAN, R. (2009).  
New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements.  
*Sensors*, 9(4):2951-2967.
- TOPP, G.C., DAVIS, J. L. Y ANNAN, A.P. (1980).  
Electromagnetic determination of soil water content: application of TDR to field measurements.  
*Water Resources Research*, 16(3):574-582.





## Factores que determinan la química del agua en manantiales de uso humano del noroeste de Chubut

### Factors that determine the chemistry of water in springs for human use in northwestern Chubut

Kusch, Rodolfo José ✉ - Pizzolon, Lino Arturo

Recibido: 20 de octubre de 2020 • Aceptado: 18 de octubre de 2021

#### Resumen

*Se investigó la calidad del agua de 12 manantiales de uso antrópico actual o potencial en el NO del Chubut (Patagonia, Argentina), ubicados entre 400 y 1500 metros de altura snm y entre los 150 y 1200 mm de precipitación media anual. Se registraron aspectos paisajísticos, estado de preservación e impactos en la zona de emergencia; durante el período de estiaje se midió temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto in situ y se analizaron aniones y cationes mayoritarios, nutrientes y bacteriología sanitaria. El espectro de iones mayoritarios se visibilizó mediante diagramas de Piper y de Stiff. El espectro iónico predominante fue de tipo bicarbonatado cálcico, salvo dos sulfatado-cálcicos y uno, sulfatado-sódico. Los dos primeros componentes del análisis de componentes principales (ACP) asociaron las variables y ordenaron los manantiales en relación con el gradiente de precipitaciones E-O y con la altura sobre el nivel del mar. La ubicación discordante de dos de ellos se explicó por la presencia de depósitos metalíferos epitermales intruídos en la litología silícica, dominante en la región. Los nutrientes en general se encontraron en concentración baja o indetectable. Tanto por su contenido de iones mayoritarios, nutrientes como bacteriológico, en todos los casos las aguas analizadas fueron aptas para consumo humano. Sin embargo, se detectaron impactos incipientes y situaciones de riesgo por contaminación séptica, que no pueden ser soslayadas. Por su extremada complejidad, estos microambientes requieren de una aproximación multilateral, tal que no se invisibilicen y se mutilen sus funciones ecológicas y sociales.*

**Palabras clave:** crenología, hidroquímica, meteorización, drenaje ácido.

#### Abstract

*The water quality of 12 springs of current or potential anthropic use in the NW of Chubut (Patagonia, Argentina), located between 400 and 1500 meters above sea level and between 150 and 1200 mm of average annual rainfall were investigated. Landscape aspects, state of preservation and impacts in the emergency zone were recorded; During the dry period, temperature, pH, electrical conductivity and dissolved oxygen were measured in situ and major anions and cations,*

Laboratorio de Ecología Acuática - Facultad de Ciencias Naturales,  
UNPSJB - Universidad Nacional Patagonia, Km 4, Esquel, Chubut  
✉ rodolfojosek@gmail.com

*nutrients and sanitary bacteriology were analyzed. Stiff and Piper diagrams were used to visualize the main ions and types of waters found. The predominant ionic spectrum was of the calcium bicarbonate type, except in two, which were calcium sulphated and one was sodium sulphated. The first two components of the principal component analysis (PCA) associated the variables and ordered the springs in relation to the precipitation gradient E-W and altitude above sea level. The discordant location of two of them was explained by the presence of epithermal metalliferous deposits intruded into the silicic lithology, dominant in the region. The nutrients in general were found in low or undetectable concentration. Taking account, the major ions, nutrients and bacteriology, in all cases the analyzed waters were suitable for human consumption. However, incipient impacts and risk situations due to septic contamination were detected, which cannot be neglected. Due to their extreme complexity, these microenvironments require a multilateral approach, such that their various ecological and social functions do not be invisibilized or mutilated.*

**Keywords:** *crenology, hydrochemistry, weathering, acid drainage.*

## INTRODUCCIÓN

Los manantiales son ecotonos que vinculan tres ecosistemas diferentes: las aguas subterráneas, las aguas superficiales y la superficie terrestre, con propiedades fisicoquímicas y flujos de energía y materia específicos (Barquín 2007). Si bien este trabajo se enfoca sobre hidroquímica es importante notar que el estudio de los manantiales involucra múltiples dimensiones y disciplinas. Por una parte, permiten conocer las aguas subterráneas de una región por lo que su estudio forma parte de la hidrogeología (Beltrán et al. 1979). Pero, además, por su gran estabilidad térmica, de caudal y de composición química, dan lugar a una biota particular tanto en el acuífero y como en la zona de emergencia (Beltrán et al. 1979; Cantonati et al. 2006) objeto de estudio de la crenología o crenobiología (Maleck y Jasik 2011; Cantonati et al. 2012), disciplina fuertemente ligada a la crenoterapia (Fagundo et al. 2001, Castillo y Hernández 2015 y otros). Las aguas surgentes generan un microclima cuya vegetación es fuente de medicina y lugar de cura en muchos pueblos originarios del mundo. Ocupan un lugar muy especial en la cosmovisión y prácticas del Walmapu -territorio mapuche (Ñanculef Huaiquinao 2016; Morales et al. 2020).

En ausencia de impactos antrópicos, la composición química de las aguas naturales proviene de los aportes atmosféricos, de la meteorización de las rocas de la corteza terrestre y de eventuales procesos de evaporación además de procesos de intercambio iónico (Gibbs 1970, Stumm y Morgan 1970). Los aportes atmosféricos en la región andina de Patagonia son insignificantes (Pedrozo et al. 1993), por lo que el tipo y la cantidad de iones mayoritarios en aguas superficiales, proviene principalmente de la meteorización de las rocas dominantes (Pedrozo et al. 1993, Drago y Quirós 1995); la evaporación cobra importancia hacia la Patagonia extra-andina (Scappini y Orfila 1981, Chimer et al. 2011; Epele et al. 2018). Consideraciones similares valen para la hidroquímica de manantiales (Cantonati y Ortler 1998).

El conocimiento de los procesos que controlan la dinámica espacial y temporal de la química de las aguas surgentes es importante para la creación de medidas efectivas para su protección (Merk et al. 2020). El agua de un manantial está expuesta a diversos riesgos de contaminación en sus áreas de recarga y/o tránsito (Auge 2004), sea por la actividad industrial, la explotación minera. La infiltración desde de áreas ganaderas o agrícolas con uso de fertilizantes, incrementa el contenido de N y P. El crecimiento urbano sobre áreas de tránsito del acuífero constituye

un factor de riesgo a tener en cuenta; la percolación de nutrientes desde fuentes difusas y puntuales afecta la calidad del agua del acuífero (Fernández y Taset 2006, Auge et al. 2010, Auge 2020).

Las aguas surgentes se pueden clasificar en reocrenos, helocrenos y limnocrenos (Steinman 1915) según originen un arroyo, un humedal (mallín) o una laguna, respectivamente, aunque existan una amplia diversidad de formas intermedias (Cantonati et al. 2006). Por su importancia forrajera los mallines de Patagonia han sido profusamente estudiados (Chimer et al. 2011; Mazzoni y Rabasa 2013, Epele et al. 2018 por mencionar algunos). En cambio, existen muy pocos trabajos sobre manantiales, excepto algunos estudios puntuales, referidos principalmente a surgentes termales (Monasterio et al. 2017, Villalba et al. 2020), o como parte de estudios particulares de aguas subterráneas, generalmente no publicados. En el Noroeste de Chubut se han realizado muestreos ocasionales (Pizzolon 2003, datos no publicados).

Este trabajo se ocupa en particular de reocrenos, o wufko, en mapuzungún, lengua originaria de la región y se realizó con el propósito de caracterizar la composición química (iones principales, nutrientes) y bacteriológica de doce manantiales permanentes con aprovechamiento humano actual o potencial en el noroeste de Chubut. Los resultados obtenidos se analizaron en relación con las precipitaciones y la altura sobre el nivel del mar, considerada como indicadora de la distancia al área de recarga y del tiempo de contacto del agua con la roca portadora. En particular se utilizaron los iones principales para inferir la litología y procesos de meteorización predominantes en el acuífero y los nutrientes como indicadores de eventuales procesos de eutrofización antrópica (Van der Weijden y Pacheco 2007, Belkhiry et al. 2011), teniendo en cuenta que algunas variables pueden estar influidas por ambos tipos de procesos.

## ÁREA DE ESTUDIO

Los doce manantiales están ubicados entre la región andina y la extrandina del noroeste de Chubut, entre 42°43'48" y 43°33'21" S y entre 70°50'7" y 71°29'31" O (Figura 1), en un gradiente altimétrico que va de 400 a 1500 m snm y en un gradiente de precipitaciones de 100 a 1200 mm anuales; diez de ellos están vinculados a cuencas de vertiente al Pacífico, mientras que los dos restantes a la cuenca atlántica del río Chubut.

Los Andes patagónicos, en la región, presentan cordones montañosos dispuestos de norte a sur con alturas entre los 300 a 2300 m snm. Los manantiales estudiados emergen al pie de

depósitos glaciares y/o fluviales, en áreas dominadas, en general, por rocas ígneas de naturaleza fundamentalmente andesítica, en algunos casos con signatura calcoalcalinas. Hacia el este predominan rocas más básicas como gabros y basaltos (Haller et al. 2010, Lizuáin y Viera 2010). Ocasionalmente se pueden encontrar anomalías, tal como áreas de alteración hidrotermal con depósitos metalíferos (Haller et al. 2010, Lizuáin y Viera 2010).

El clima de la región es templado frío. El área de estudio está comprendida entre las isohietas de 100 y 1200 mm (Figura 1), en uno de los gradientes pluviales más abruptos del mundo (Seibert 1976; INTA 2011), producido por el efecto de sombra pluvial que ejerce la cordillera con respecto a los vientos dominantes del Pacífico. Este gradiente determina las biozonas del bosque andino-patagónico en la cordillera y de la estepa, en la meseta, así como el ecotono intermedio (Del Valle et al. 1995).

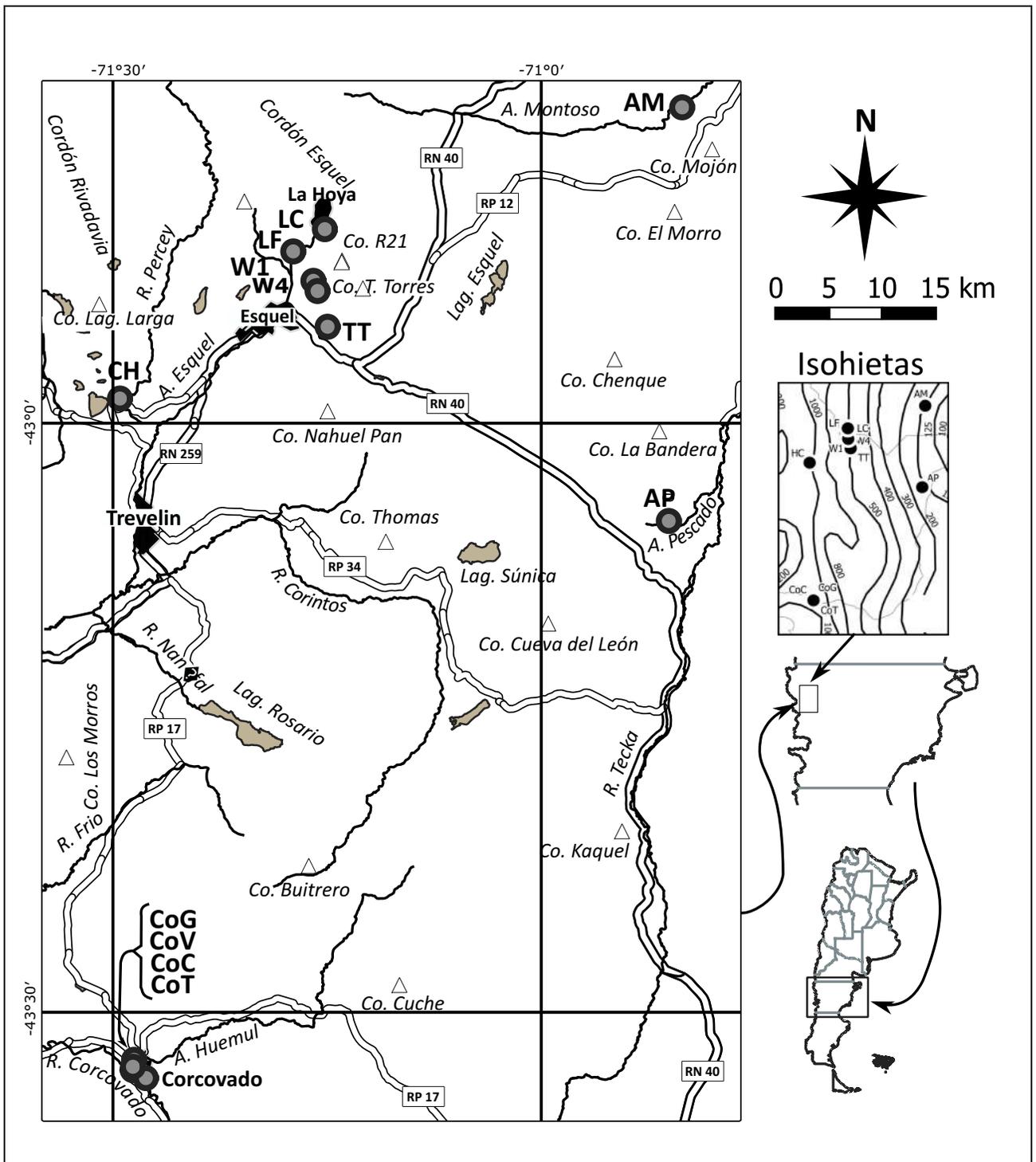


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo. Isohietas tomadas del SIPAS (2010).

## Materiales y métodos

Los doce manantiales seleccionados son del tipo reocreno y fueron elegidos teniendo en cuenta la estabilidad en los caudales y el aprovechamiento humano actual o un potencial uso futuro. Todos fueron visitados en dos ocasiones, ambas en los meses más secos del año (marzo-junio de 2016 y 2017).

## Registros y mediciones *in situ*

En cada manantial se describió el paisaje en el área de la surgencia; se tomó nota del uso, ganadero o consumo humano y se registró el estado de conservación, tanto del área de emergencia como de influencia, como asimismo la existencia de asentamientos humanos, o de otros factores de riesgo en el área de tránsito/influencia y la distancia de los mismos al área de emergencia.

Se midieron el pH y la temperatura (Temp) del agua en la surgencia con un pH-metro Adwa AD12; la conductividad eléctrica (CE) se midió sin compensación por temperatura, con un conductímetro WTW LF 320, con celda TetraCon. El oxígeno disuelto (OD) se fijó *in situ* en frascos de DBO (método de Winkler). Las muestras para análisis químicos se conservaron a 4°C hasta su procesamiento en laboratorio al día siguiente.

## Procesamiento de muestras en laboratorio

La conductividad eléctrica, pH y la alcalinidad total, se determinaron en el lapso de 24 horas de extraída la muestra. Los análisis restantes (Tabla 1) se hicieron sobre submuestras filtradas con filtro de membrana de 0,45 micras. Las submuestras para nutrientes (nitratos, nitritos, amonio y fosfatos solubles) se conservaron en envases plásticos de 250 ml, a -18°C. Las submuestras para aniones principales (bicarbonatos, sulfato y cloro) y silicatos se conservaron en frascos de 250 ml a 4°C en oscuridad. Las submuestras para cationes mayoritarios se conservaron a 4°C en botella plástica de 100 ml, previamente enjuagada con HCl al 10 %, acidificadas con ácido nítrico ultrapuro Merck a pH < 2 y se analizaron en conjunto al final del período de muestreo.

## Variables químicas analizadas en laboratorio

Las variables analizadas y métodos analíticos se informan en la Tabla 1.

Equipamiento utilizado: pHmetro ORION 720 SA, con electrodo de Ross; conductímetro WTW modelo LF 320, con celda TetraCon; espectrofotómetro Shimadzu UV-visible 160 A, con celdas de vidrio de 5 cm de paso óptico y de cuarzo de 1 cm para nitratos. Los cationes mayoritarios ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) se analizaron con un equipo Agilent 7500cx (Becker, 2008) en el Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Gral. San Martín - Comisión Nacional de Energía Atómica.

Los análisis bacteriológicos se realizaron en el Departamento Zonal de Salud Ambiental de Esquel, SIPROSALUD: bacterias aerobias mesófilas (BAM) -tubos múltiples incubados a 37°C, y expresados como unidades formadoras de colonias (u.f.c./ml); bacterias coliformes totales (BCT), bacterias coliformes fecales (BCF) y *Escherichia coli* (Ec), expresados como nmp/100 ml.

El límite de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) para las técnicas espectrofotométricas se estimó multiplicando por 3 y por 10 respectivamente, el desvío estándar de los blancos (Long y Winefordner 1983). Los compuestos de nitrógeno y sulfatos se expresaron en el texto y gráficas como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{SiO}_4$  pero indican N- $\text{NO}_3^-$ , N- $\text{NO}_2^-$ , N- $\text{NH}_4^+$ , S- $\text{SO}_4^{2-}$  y Si- $\text{H}_2\text{SiO}_4$ , respectivamente. AT fue en todos los casos alcalinidad de  $\text{HCO}_3^-$ .

## Control de datos

La confiabilidad de los resultados analíticos se verificó mediante el balance de cargas según Murray y Wade (1996) y mediante la confrontación entre la CE medida vs CE equivalente s/Clarke *et al.* (2008) utilizando el software Diagrammes (Simler 2009). El máximo desbalance iónico fue del 12 y 14 %, en CH y LC respectivamente, atribuible en parte a que algunos valores

**Tabla 1. Método, límite de cuantificación (LOQ) y de detección (LOD) de las variables analizadas. [1] Tartari y Mosello (1998); [2] Norma: UNE-EN 27888 (1994); [3] A.P.H.A. (1992); [4] Wiener lab. (2000) [5] Becker (2008); \*análisis en Laboratorio Área Medio Ambiente, SIPROSALUD, Chubut; \*\*en Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental - Universidad Nacional de Gral. San Martín - Comisión Nacional de Energía Atómica.**

	Sigla	Ref.	Método	Unidad	Rango	LOD	LOQ
pH	pH	[1]	4500 H-B.	log	1-14	±0,1	
alcalinidad total	AT	[1]	3.5 doble p.f.	meq L <sup>-1</sup>	0,03-10	0,01	
conductiv. eléct. 20°C	CE	[2]	Norma EN 27888	µS cm <sup>-1</sup>	1 - 2000	0,2	
oxígeno disuelto	OD	[1] y [3]	4500-O.C.	mg L <sup>-1</sup>	0,08-22	0,04	
N-nitrato	$\text{NO}_3^-$	[3]	4500-NO3.B.	µg N L <sup>-1</sup>	10-200	0,1	0,2
N-nitrito	$\text{NO}_2^-$	[3]	4500-NO2.B.	µg N L <sup>-1</sup>	3-200	1,1	3,6
N-amonio	$\text{NH}_4^+$	[1] y [4]	4500-NH3.D.	µg N L <sup>-1</sup>	5-200	9,7	32,4
fósforo react. soluble	PRS	[1];	4500 P-E	µg P L <sup>-1</sup>	1,4-1000	5,1	16,8
S-Sulfato	$\text{SO}_4^{2-}$	[3]	4500-SO4.E.	mg $\text{SO}_4$ L <sup>-1</sup>	1,2-15	7,6	25,4
cloruro	Cl <sup>-</sup>	[1] y [3]	4500-Cl.E.	mg Cl L <sup>-1</sup>	1,0-10	1,8	6,1
Si-Silicato	$\text{H}_2\text{SiO}_4$	[1]	4500-Si.D.	mg Si L <sup>-1</sup>	0.014-10	1,6	5,4
Flúor*	F		Electrodo Ión-select.				
Cationes** principales**		[5]	ICP-MS	mg L <sup>-1</sup>			0,1
Elementos Traza**		[5]	ICP-MS	µg L <sup>-1</sup>	0,1-75	0,03	0,1

fueron inferiores al límite de cuantificación (LOQ) y aún del límite de detección (LOD).

Los datos de nitratos al UV (A.P.H.A. 4500-NO<sub>3</sub>.B) correlacionaron en forma altamente significativa ( $R^2 = 0,92$ ;  $n = 5$ ) con datos previos obtenidos con el método de reducción a nitrito en columna de cadmio (A.P.H.A. 4500-NO<sub>3</sub>.D).

### Información complementaria

La cartografía se analizó utilizando el software QGIS Ver. 2.18.13 "Las Palmas" de código abierto, y tomando como base los mapas e información geográfica de OpenStreetMap, IGN (Instituto Geográfico Nacional); INTA (2011); SIG-Sistema de Información Geográfica On-line del Servicio Geológico Minero Argentino (SegemAR); SIPAS (Sistema de Información de la Patagonia Sur).

La precipitación media anual (ppa) se estimó según Jobbágy et al. (1995), en función de la distancia a una línea imaginaria que une las altas cumbres de los cordones montañosos más importantes previos a la estepa, Cdón. Esquel, Co. Nahuel Pan, Sa. Colorada, Cdón. Kaqué, incluyendo una corrección altimétrica (Tabla 2).

**Tabla 2. Precipitación media anual estimada según Jobbágy et al. (1995).**

Sitio	Altura s.n.m.		Precipitación media anual (en mm)	
	m	SMN/INTA	Emergencia (Modelo)	Área de influencia (Modelo)
LC	1513	579	799	799
LF	840	579	577	799
W1	711	579	534	799
W4	704	579	534	799
TT	742	579	534	799
CoC	395	1038	1303	834
CoG	397	1038	1303	834
CoT	398	1038	1303	834
COV	395	1038	1303	834
CH	582		834	834
AP	591	147	250	534
AM	729			245

### Procesamiento de la información

Los valores inferiores al límite de detección fueron reemplazados por valores no cualificados igualándolos al  $\frac{3}{4}$  del límite de detección de la técnica respectiva (Güler et al. 2002). El espectro iónico y tipología de las aguas analizadas se visualizó mediante diagramas de Stiff y de Piper utilizando el software Diagrammes (Simler 2009). En particular se utilizaron los nutrientes como indicadores de eventuales impactos (eutrofización) y los iones principales para inferir la litología y procesos de meteorización predominantes en el acuífero (Van der Weijden y Pacheco 2007, Belkhiry et al. 2011), considerando que alguna variables pueden estar influenciadas por tanto por procesos naturales como antrópicos. Con el objeto de reducir la variabilidad de la base de datos se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el software Statistica (Stat Soft 2010). Las variables hidroquímicas se configuraron como variables activas y las

ambientales (precipitación anual en el área del acuífero (ppa) y altura sobre el nivel del mar (Hsnm)), como suplementarias (Güler et al. 2002, Belkhiry et al. 2011). Excepto pH, todos los datos fueron previamente log (natural)-transformados y luego estandarizados. El posible origen de las sales disueltas se analizó a partir de relaciones iónicas (Baca y Threlkeld 2000, Depetris et al. 2014) y se discutió en relación con la información litológica disponible (Camino 1999, Haller et al. 2010, Lizuain y Viera 2010). La aptitud para consumo humano se estimó según el CAA (2019).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los manantiales LC, LF, W1, W4 y TT se encuentran en la vertiente occidental del extremo sur del cordón Esquel (Figura 1) y contribuyen a la provisión de agua para la ciudad del mismo nombre; sea a través del sistema hídrico o de una fuente de libre acceso construida por un grupo de vecinos (LF). Todos ellos se encuentran en áreas despobladas, pero tres de ellos, W1, W4 y TT, surgen en zona de pastoreo intenso. Una situación similar ocurre con CH, ubicado al sur del cordón Rivadavia. AP aflora en el tramo medio de un extenso pedemonte, en un paleocauce originado en la laguna Súnica, al pie del cerro Thomas y da origen al arroyo Pescado que es aprovechado para la pesca deportiva. El área de emergencia de este manantial y sus zonas aledañas son utilizadas para el pastoreo. El manantial AM es utilizado para consumo familiar y surge en el tramo inferior de un extenso y angosto valle con frecuentes helocrenos interconectados. Este valle es utilizado para el pastoreo ovino. Los manantiales próximos a la localidad de Corcovado, CoG, CoV, CoC y CoT, emergen en la base del cono aluvial formado por el río Huemul en su ingreso a la llanura de inundación del río Carrenleufú. Estos manantiales se utilizan como fuente de agua para consumo humano. El pueblo está construido aguas arriba, sobre el mismo cono aluvial y los sitios de emergencia están expuestos al pastoreo.

### Tipología de las aguas encontradas

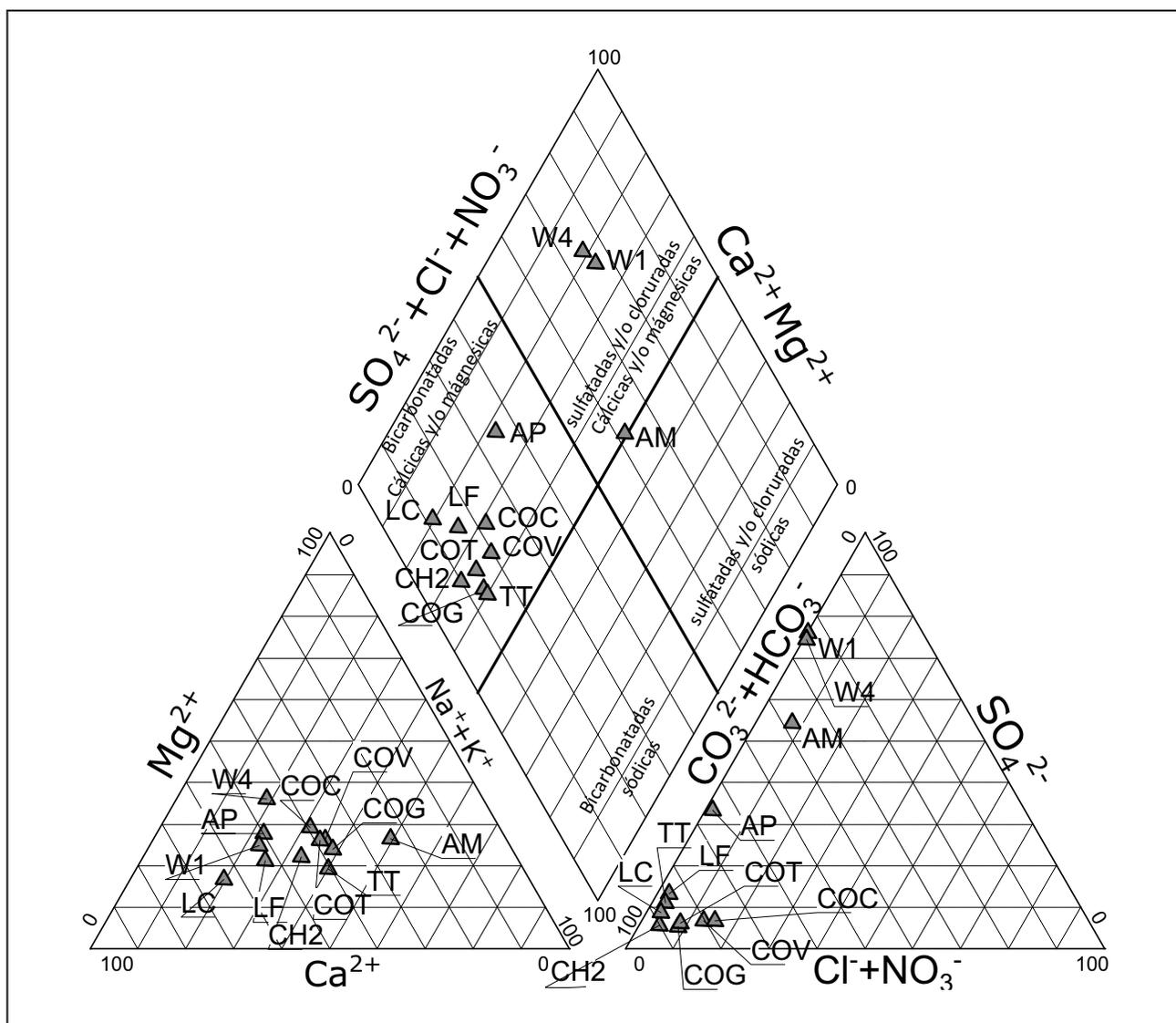
La temperatura del agua fue desde 3,9 °C hasta 12,5 °C. Los valores extremos de CE se registraron en los manantiales del cordón Esquel, siendo los máximos los de W1 y W4 (503 y 623  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente) y los mínimos en LC y LF (77 y 92  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente). Los valores más bajos de pH y de saturación de OD, 5,6 y 19,1% respectivamente, se registraron en los manantiales de Corcovado (Tabla 3). Según el CAA, las aguas con menos de 100  $\text{mg L}^{-1}$  entre las que se encuentran LC, LF, CH, CoG, CoV, CoC y CoT con TSD entre 53 y 83  $\text{mg L}^{-1}$  clasifican como oligominerales y las restantes (TT, AP, AM, W1 y W4) con TSD entre 161-453  $\text{mg L}^{-1}$ , como aguas de mineralización débil. Con respecto a los iones mayoritarios diferenciamos en primer lugar dos grupos principales, uno el de los manantiales sulfatados (uno sódico AM y dos cálcicos, W1 y W4), y otro, el de los bicarbonatados con nueve manantiales, preponderantemente cálcicos. Los cloruros se encontraron en muy baja concentración en todos los casos. El calcio fue el catión dominante en la mayoría de los manantiales, o codominante con el sodio en CoV, CoG y TT. El único sitio con dominancia neta de sodio fue AM. Según el diagrama de Piper (Figura 2), W1 y W4 clasifican como sulfatadas cálcicas, AM como sulfatada cálcico-sódica y el resto como bicarbonatadas cálcicas o cálcico-sódicas. El respectivo espectro de iones mayoritarios se visualizó espacialmente mediante diagramas de Stiff (Figura 3).

**Tabla 3. Variables fisicoquímicas en doce manantiales del NO de Chubut (Feb-Jun 2017).**

Sigla	CE	pH	Temp	OD	Sat
	$\mu\text{S cm}^{-1}$		$^{\circ}\text{C}$	$\text{mg L}^{-1}$	%
LC	76,9	7,7	3,9	10,3	78,3
LF	91,9	7,1	7,6	8,0	66,9
COV	93,0	6,2	11,0	7,0	63,5
COG	94,0	6,1	11,0	2,1	19,1
CH2	102,3	7,4	10,1	8,6	76,4
COT	105,0	6,3	11,0	5,3	48,3
COC	111,0	6,5	12,1	8,8	81,8
TT	210,0	8,0	11,5	9,1	83,4
AP	232,0	7,5	11,0	8,4	76,1
AM	448,0	8,1	6,4	9,6	78,0
W1	503,0	7,7	10,4	8,1	72,5
W4	623,0	7,6	9,2	8,2	71,0

**Influencia de las variables ambientales**

Los dos primeros autovalores del análisis de componentes principales (ACP) explicaron el 70 % de la varianza total de la base de datos y los tres primeros, el 80 % de la misma (Tabla 4). El primer componente principal (CP1) asocia cationes mayoritarios, CE,  $\text{NH}_4$  y  $\text{SO}_4$  en oposición con *ppa* (Figura 4), señalando el efecto de dilución por lluvias. El CP2 asocia variables que disminuyen y se oponen con la altura sobre el nivel del mar (*Hsnm*), *Temp*,  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ , y las opone con OD, que se incrementa con la altura (Figura 4). El pH depende por igual de *Hsnm* como de *ppa*, mientras que *Temp* depende tanto de *Hsnm* (CP2) como con un tercer factor no identificado (CP3). PRS depende de dos factores no identificados, CP3 y CP4 (Tabla 5). La concentración de  $\text{NO}_3^-$  correlacionó con *Hsnm* pero es influenciada también por otras fuentes de variabilidad, CP3 y CP5 (Tabla 5). En cierta medida el CP2 es también un eje ligado con impactos antrópicos (carga ganadera, efluentes cloacales), cuya magnitud es mayor en los sitios bajos, más poblados, y menor en los manantiales de altura. Las seis variables más importantes en el ACP en orden decreciente fueron; CE,  $\text{SO}_4^{2-}$ , *Hsnm*,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ .



**Figura 2. Diagrama de Piper y tipología de las aguas analizadas.**

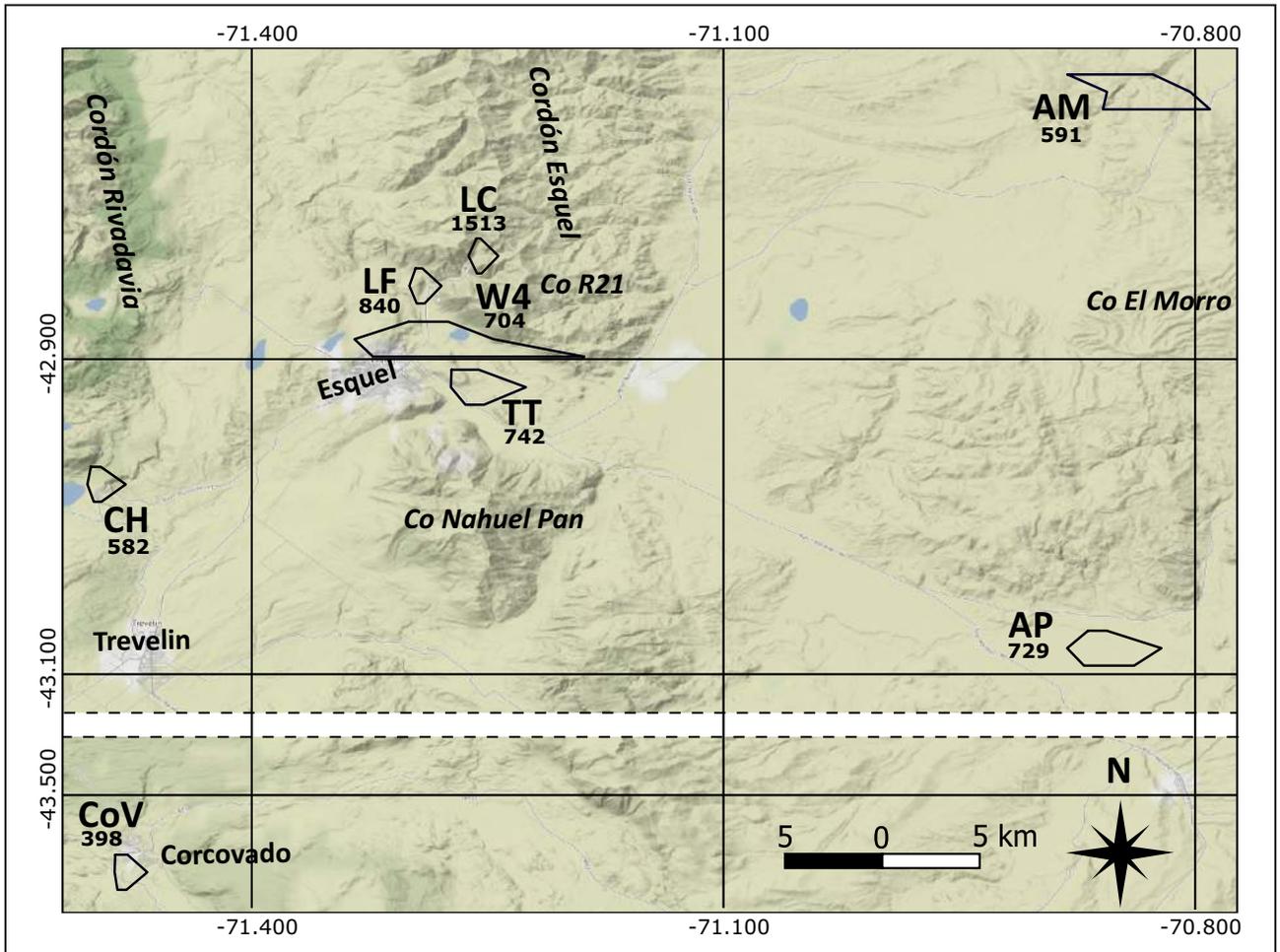


Figura 3. Diagramas de Stiff y altura snm de los manantiales estudiados.

Tabla 4. Varianza total explicada por los cinco primeros autovalores del ACP.

CP	Autovalores	% varianza	% Total var.
	Explicada	Explicada	
1	7,446	46,54	46,5
2	3,695	23,09	69,6
3	1,605	10,03	79,7
4	1,297	8,11	87,8
5	0,814	5,10	92,6

El ACP por filas organiza los manantiales estudiados en relación con el gradiente cruzado de ppa y de Hsnm (Figura 5). El eje vertical está relacionado con el impacto antrópico, generalmente mayor en los sitios más bajos y de menor pendiente y menor en los sitios de altura. Los grupos diferenciados coinciden con los del dendrograma de agrupamiento. LC, LF y CH se encuentran a mayor altura, tienen las aguas más diluidas, menor temperatura y más OD; en el cuadrante inferior se encuentran las fuentes de Corcovado, también con aguas diluidas, pero con los mínimos de OD, y valores máximos de  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ . No obstante la distancia entre las emergencias de TT y AP, se agrupan en un solo grupo debido a que las respectivas

áreas de recarga estimadas se encuentran en la misma isohieta (Figura 1). AM, por su parte, se ubica en un grupo separado ( $n=1$ ) en la franja más seca del área estudiada, con cierto nivel de impacto antrópico como muestra el déficit de OD y  $\text{NO}_2^-$  algo elevado. Por su proximidad, W1 y W4 debieran agruparse con TT o con LF, sin embargo, se forman un grupo en el extremo más seco del CP1. Esta anomalía se explica por una particular litología y procesos de meteorización específicos en las respectivas zonas de recarga.

#### Origen de los iones mayoritarios

En los manantiales bicarbonatados se encontró una elevada correlación entre bicarbonato y TZ (sumatoria de cationes) ( $R^2 = 0,97$ ;  $n=9$ ), lo cual confirma el origen de sus iones mayoritarios en procesos de disolución/hidrólisis de las bases de las rocas con el ácido carbónico (Stumm y Morgan 1970; Depetris et al. 2014). En siete de estos (LC, LF, CH, CoC, CoG, CoT y CoV), la correlación significativa entre sílice y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^- = 0,45 \text{ SiO}_4\text{H}_2 - 10,82$ ;  $R^2 = 0,74$ ;  $n=7$ ), confirma lo esperado para regiones con predominio de rocas silíceas, como en la región estudiada (Lizuain y Viera 2010). La relación  $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_4\text{H}_2$  se duplica en TT y AP; esta incongruencia puede atribuirse a la presencia de calcita diseminada en las rocas de origen ígneo, hecho que frecuentemente distorsiona los resultados esperados en la hidrólisis de rocas silíceas (Lecomte et al. 2011), o a otros procesos cuya dilucidación excede el propósito de este trabajo.

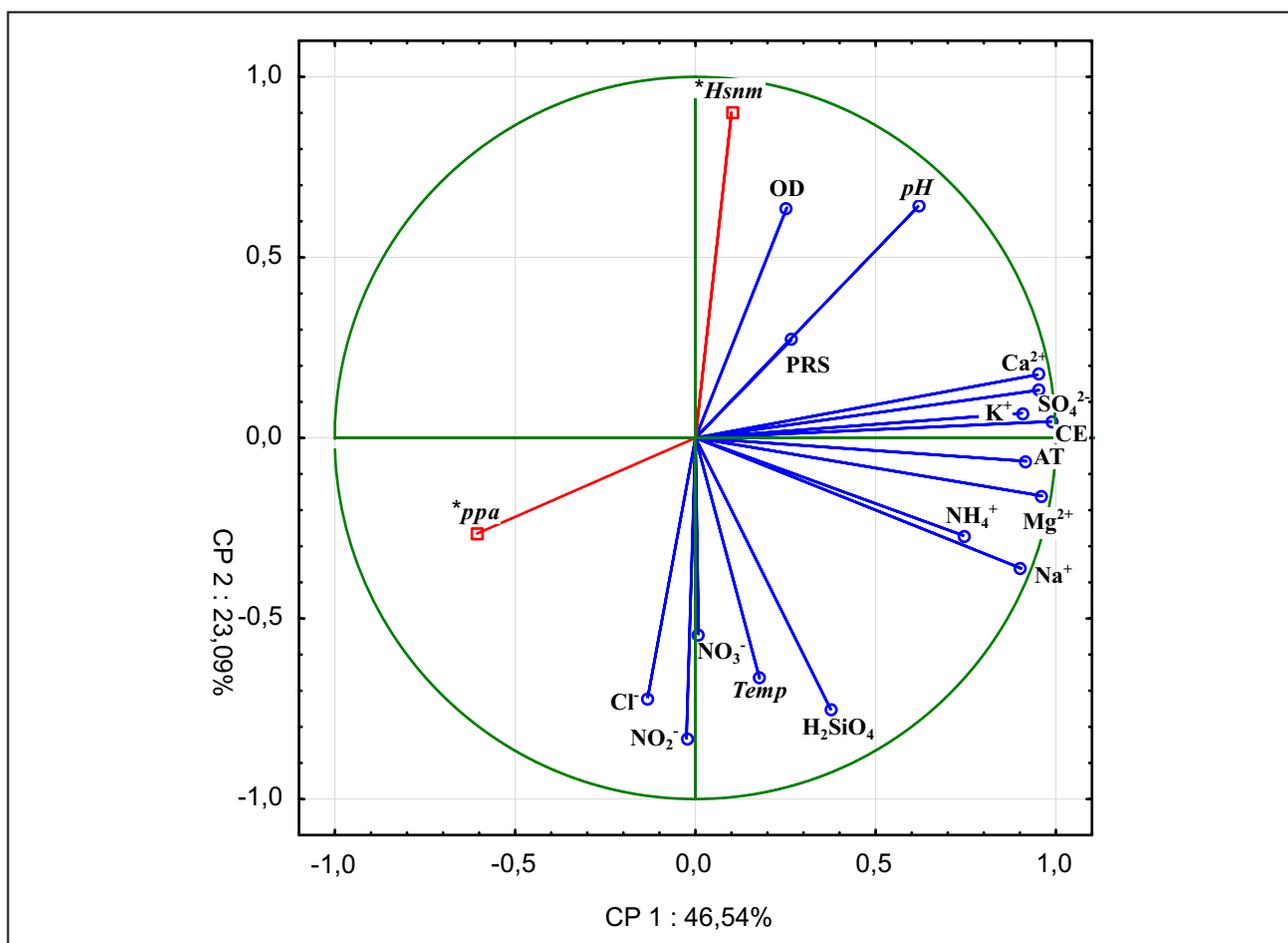


Figura 4. ACP: Proyección de las variables en el plano factorial formado por el 1er y 2do. componente principal; Hsnm y ppa: variables suplementarias.

Tabla 5. ACP: correlación entre variables y factores (\* variables suplementarias).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
OD	-0,253	-0,637	-0,020	-0,410	-0,269
Temp	-0,178	0,665	0,679	0,023	0,185
pH	-0,618	-0,641	-0,238	-0,316	-0,043
CE	-0,987	-0,046	-0,053	0,089	-0,080
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,952	-0,132	-0,096	0,226	-0,062
AT	-0,918	0,065	0,088	-0,088	0,048
Cl <sup>-</sup>	0,133	0,723	-0,431	-0,467	-0,073
H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	-0,375	0,751	-0,088	-0,450	0,205
Ca <sup>2+</sup>	-0,949	-0,175	0,077	0,225	-0,086
Na <sup>+</sup>	-0,904	0,361	-0,179	-0,117	0,023
Mg <sup>2+</sup>	-0,961	0,160	-0,003	0,127	-0,099
K <sup>+</sup>	-0,905	-0,068	0,015	-0,112	-0,144
PRS	-0,265	-0,271	0,596	-0,603	0,171
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,009	0,543	0,575	0,061	-0,589
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,025	0,832	-0,386	0,020	-0,243
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0,743	0,270	-0,034	0,283	0,415
*Hsnm	-0,100	-0,901	-0,367	-0,004	-0,144
*ppa	0,606	0,265	0,518	0,056	0,051

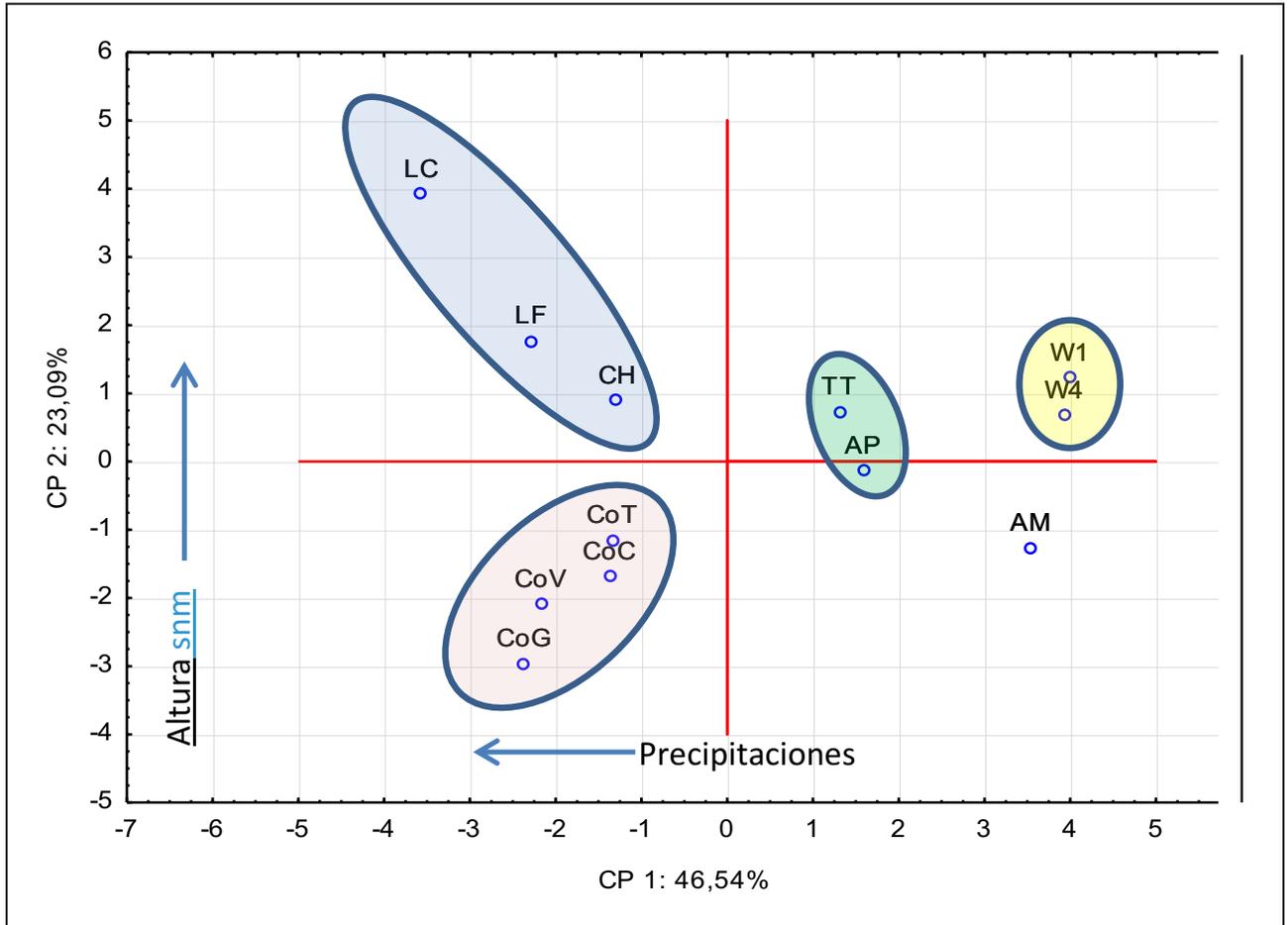


Figura 5. ACP: Proyección de las estaciones en el plano factorial formado por el 1er y 2do. componente principal.

El diagrama de dispersión  $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{Na}^+$  vs  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  (Figura 6) permite visualizar los miembros finales de la hidrólisis/disolución de diferentes tipos de rocas -silicatos, carbonatos o evaporitas (Lecomte et al. 2009). Los manantiales bicarbonatados graficaron dentro del rango teórico de disolución de la andesina y de la oligoclasa (Figura 6); la andesina en particular es una plagioclasa frecuente en las rocas de la región (Lizuain y Viera 2010). Los manantiales sulfatados, en cambio, graficaron por debajo de dicho rango (Figura 6). Como se mencionó en el ACP, W1 y W4 ocuparon un lugar discordante en el gradiente de precipitaciones (Figura 5) y, por otra parte, el elevado TSD y la dominancia de sulfatos en el espectro iónico (Figura 5), son anómalos en relación con otros manantiales y aguas superficiales del cordón Esquel (Pizzolon et al. 2001; Pizzolon et al. 2017). Estas anomalías se explican por la existencia de depósitos metalíferos epitermales en el área de recarga de W4 y W1 (Vector Engineering 2002, Lizuain y Viera 2010), ubicados a escasos kilómetros de distancia y a varios cientos de metros sobre el nivel de surgencia (Figura 7). Se encontraron allí drenajes ácidos de roca con alta concentración de sulfatos (Idoyaga 2004). El predominio de sulfatos proviene de procesos de óxido-reducción de sulfuros (Marqu ez, et al. 2006, Depetris et al. 2014), abundantes en la roca de caja; en este caso la meteorización por un ácido fuerte genera los valores más elevados de TSD.

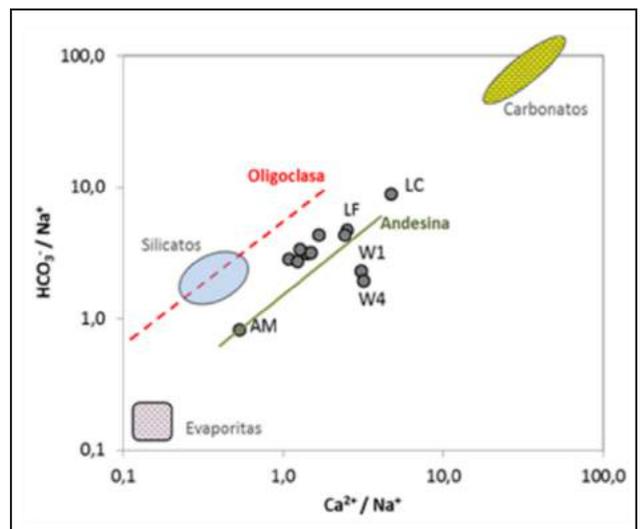


Figura 6. Diagrama  $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  modificado de Lecomte et al. (2009).

Si bien TT se encuentra más próximo a los depósitos metalíferos que W4 (Figura 7), por su baja CE y bajo  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tabla 3) se asume que sus áreas de recarga son independientes; entre

ellas se interpone una falla regional ONO-ESE ubicada al pie del cordón Esquel, la falla Willimanco (en la Figura 7, sigue la curva de nivel de los 800 m). Por otra parte, el ACP agrupa TT con AP en el eje de las ppa (Figura 5), siendo que emergen en isohietas muy diferentes (Figura 1). AP emerge en el tramo medio de un extenso pedemonte, en un paleocauce proveniente de la laguna Suñica, un cuerpo de agua muy somero que se alimenta del Co. Thomas y Co. Cueva del León (Figura 1), en la misma la isohieta que el área de recarga de TT; de aquí la semejanza hidroquímica entre ambos manantiales.

Tal como ocurre en W1 y W4, el predominio de sulfatos en AM puede vincularse con la presencia depósitos metalíferos epitermales (oro aluvional, registro 15905, Catastro minero de Chubut). AM presentó, además, el mayor valor de sodio; la eva-

poración produce una sucesiva segregación de iones divalentes, menos solubles, con el consecuente enriquecimiento en iones más solubles,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  o  $\text{Cl}^-$  (Baca y Threkeld 2000). En esta zona la evaporación potencial es de  $600 \text{ mm año}^{-1}$  (Auge et al. 2010), mientras que las precipitaciones alcanzan a 150-200 mm generando un elevado déficit hídrico. AM emerge en la parte baja de un mallín de fondo de valle, de unos 800 metros de longitud, a lo largo del cual el agua fluye en forma alternada por la superficie/subsuperficie. Durante el día, cuando la evaporación alcanza su valor máximo, el caudal de salida es prácticamente nulo, lo que exagera las condiciones de estrés mencionadas. Estos resultados concuerdan con Scappini y Orfila (1981), sobre el aumento de la concentración de  $\text{Na}^+$  y disminución del  $\text{Ca}^{2+}$  hacia el Este, en relación con el gradiente de precipitaciones.

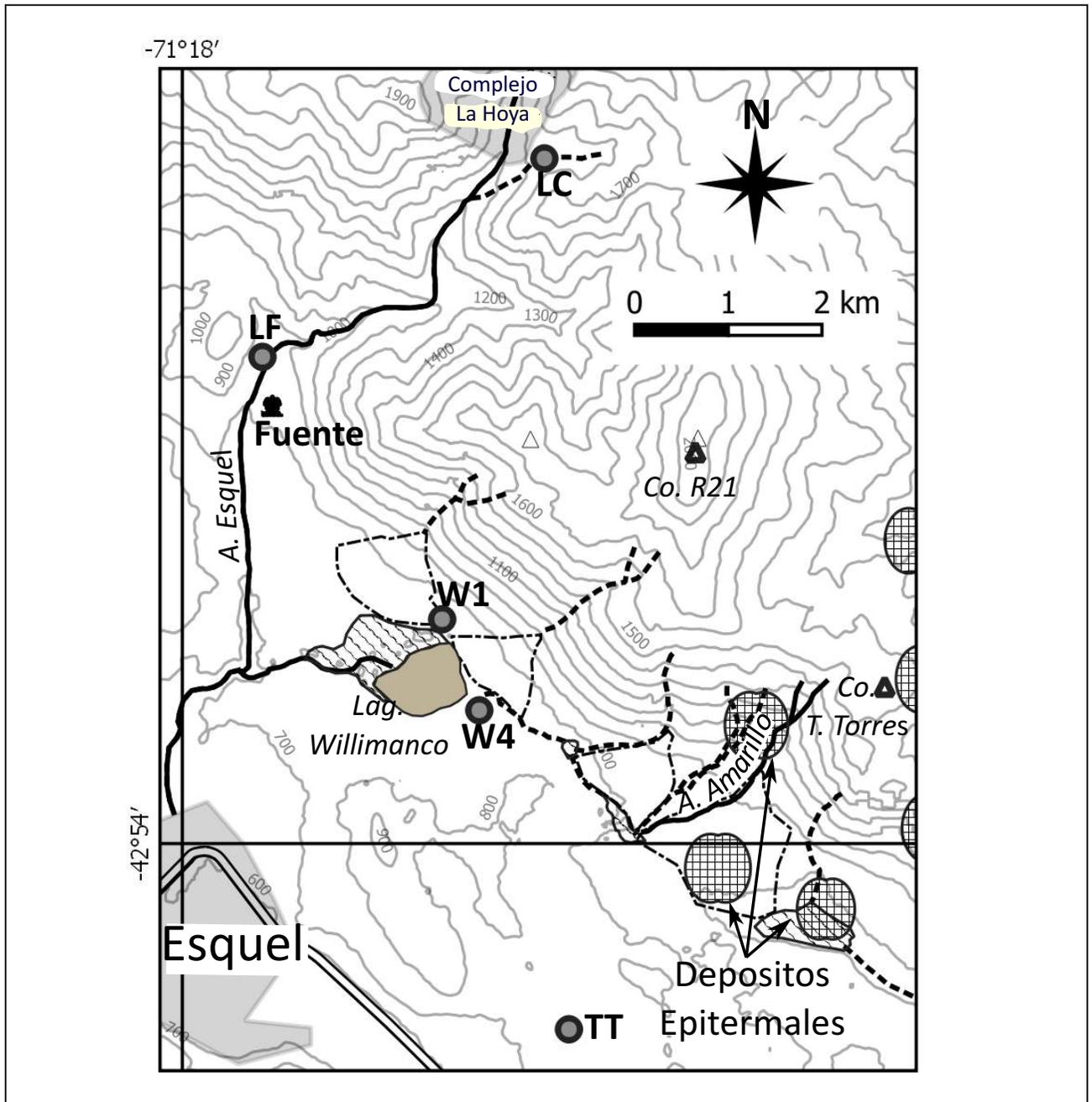


Figura 7. Manantiales y depósitos metalíferos epitermales en el extremo sur del Cordón Esquel.

### Nutrientes y factores de eutrofización

Los valores de concentración de nutrientes encontrados en este trabajo fueron muy inferiores a los límites de seguridad del CAA (2019) y en ningún caso permiten hablar de contaminación propiamente dicha. El nitrógeno inorgánico se encontró principalmente en forma de nitrato (72 % en promedio; 18 % en AM y >95 % en los manantiales de Corcovado), con variación de tres órdenes de magnitud en valor absoluto (Figura 8A). El  $\text{NH}_4^-$  estuvo entre 5 y 169 ppb, y el PRS, entre 6 y 55 ppb. Nótese la variabilidad creciente en un orden de magnitud  $\text{PRS} > \text{NH}_4^- > \text{NO}_3^-$ . El  $\text{NO}_2^-$  en todos los casos fue inferior al límite de cuantificación (Tabla 1). El  $\text{NH}_4^+$  aumenta hacia la

zona árida, en AP y AM, con acuíferos más superficiales; Mazzarino *et al.* (1998) demostraron que la nitrificación depende de la humedad del suelo, y que por lo tanto en zonas secas el nitrógeno se acumula en forma de amonio. El máximo encontrado en W1, posiblemente responde a otros factores, además del pastoreo de vacunos. La relación en peso  $\text{N/P} > 12$ , como nitrógeno inorgánico soluble/PRS (Figura 8C), sugiere que el fósforo es el nutriente limitante de la productividad primaria en todos los manantiales estudiados, salvo en CH, donde es limitante el nitrógeno; al respecto es indicativo allí, la presencia de nalcas, *Gunnera chilensis*, especie fijadora de nitrógeno atmosférico. Los máximos de PRS se encontraron en CH y TT (Figura 8B), sitios con carga importante de vacunos.

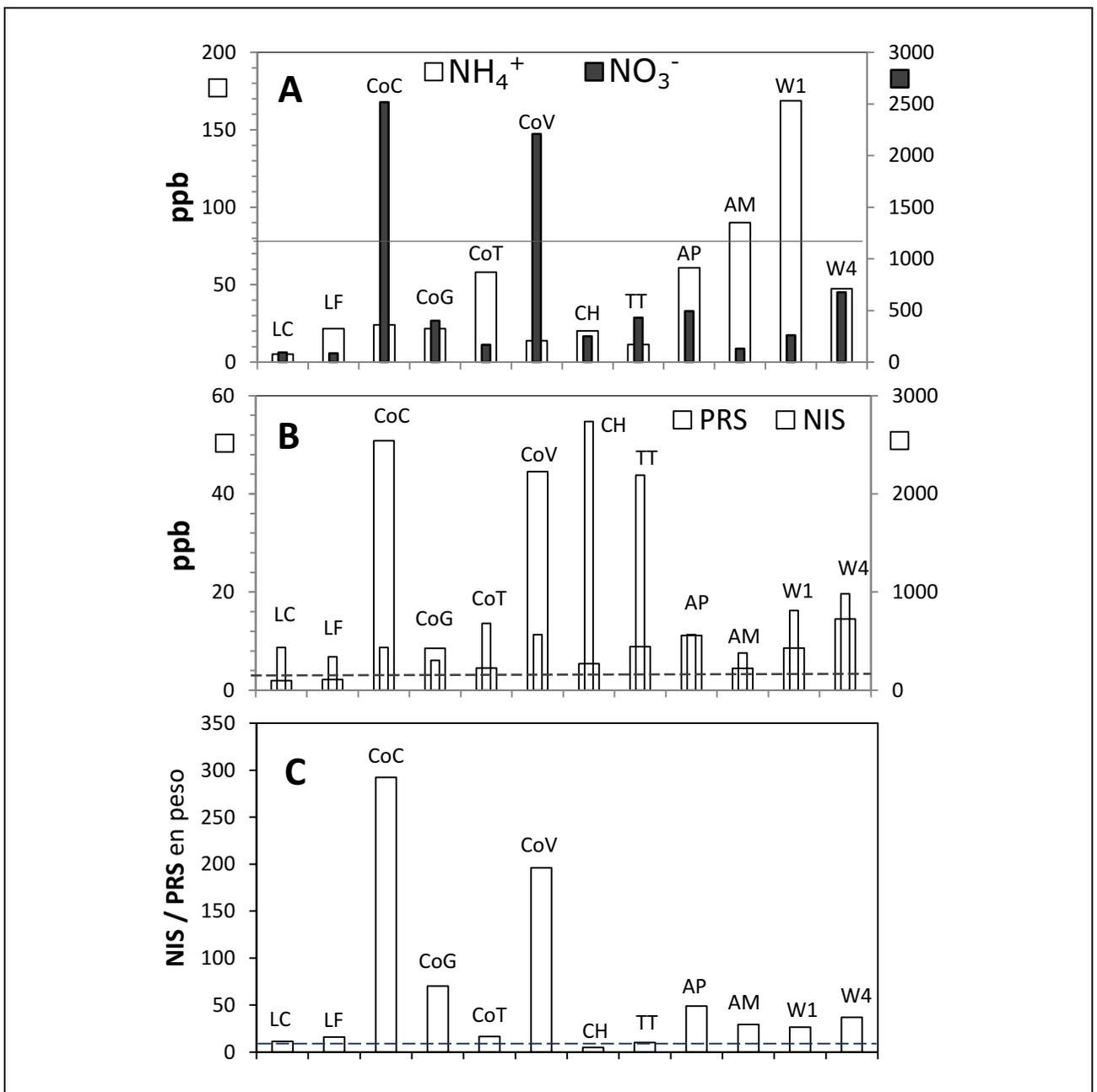


Figura 8. Nutrientes en 12 manantiales del NO de Chubut. A:  $\text{NH}_4^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ; B: PRS y NIS (nitrógeno inorgánico soluble). Las líneas de trazos en A y B indican el LOD de las técnicas analíticas (Tab. 1); C: Relación N:P en peso: la línea transversal indica el límite de colimitación por N y P (Según Fosberg *et al* 1978).

Los manantiales de Corcovado emergen al pié del cono aluvial sobre el cual está construido el pueblo (Figura 9). El área urbana está conformada por 587 hogares (1820 habitantes *s/Dirección General de Estadística y Censos, 2018*), donde solo el 37,2 % está conectado a la red cloacal, mientras el 63 % restante descarga en pozos ciegos. Esta situación genera un riesgo de contaminación muy alto, agravado por dos circunstancias que favorecen la infiltración: la escasa pendiente del cono aluvial y la alta porosidad del material que lo constituye. Los tres manantiales más cercanos al área urbana, CoG, CoV y CoC, presentaron los valores más bajos de saturación de oxígeno (Tabla 3) y los más elevados de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  (Figuras 8A y 8B). Se observó además la disminución de  $\text{NO}_2^-$  y el aumento de  $\text{NO}_3^-$  a medida que los manantiales están a mayor distancia del poblado (Figura 10). La oxidación de los compuestos de nitrógeno a nitrato con consumo de oxígeno es de ocurrencia común e indican la mayor o menor distancia a la fuente contaminante (*Fernández y Taset 2006*). CoT queda excluido de la serie porque presenta los valores mínimos de ambos compuestos y es posible que el curso subterráneo que lo alimenta no esté influenciado por el área urbana (Figura 9); aunque este manantial haya presentado el valor más elevado de  $\text{NH}_4^+$ , posiblemente vinculado al uso ganadero del área.

El análisis bacteriológico evidenció aguas aptas para consumo en todos los manantiales estudiados. Solo se detectó la presencia de bacterias aerobias mesófitas BAM en algunos de

ellos, pero con valores muy inferiores a los máximos indicados en el CAA (<500 ufc).

Por lo expuesto se concluye que no existe eutrofización antrópica en los manantiales estudiados o, en algunos casos (Corcovado), es apenas incipiente. En general, la mayoría de ellos se ubica en áreas poco menos que prístinas, en una región con baja densidad poblacional, aunque en constante crecimiento. La ganadería extensiva que prevalece en la región no parece tener impactos detectables en la calidad del agua; o, a lo sumo, solo en los acuíferos más superficiales, AM y los de Corcovado.

Respecto de los sitios de emergencia. Cabe agregar que por lo general se encuentran descuidados, con impactos por pisoteo de animales o efectos del fuego. En el caso de Corcovado existen antiguas obras/dispositivos de captación para uso público, si bien actualmente deterioradas, mantienen su funcionalidad y de hecho son utilizadas por la comunidad. AM es utilizado para consumo humano y es aprovechado por una vivienda. Su área de emergencia se encuentra protegida y posee una precaria obra de captación; sin embargo, la discontinuidad diaria en el caudal, además de una concentración iónica que podría ser el resultado de procesos de evaporación, sugieren que este manantial es alimentado por una corriente que discurre, por tramos, en forma sub-superficial y lo hace a lo largo de un valle sometido al pastoreo ovino, un detalle sanitario que debe ser tenido en cuenta.

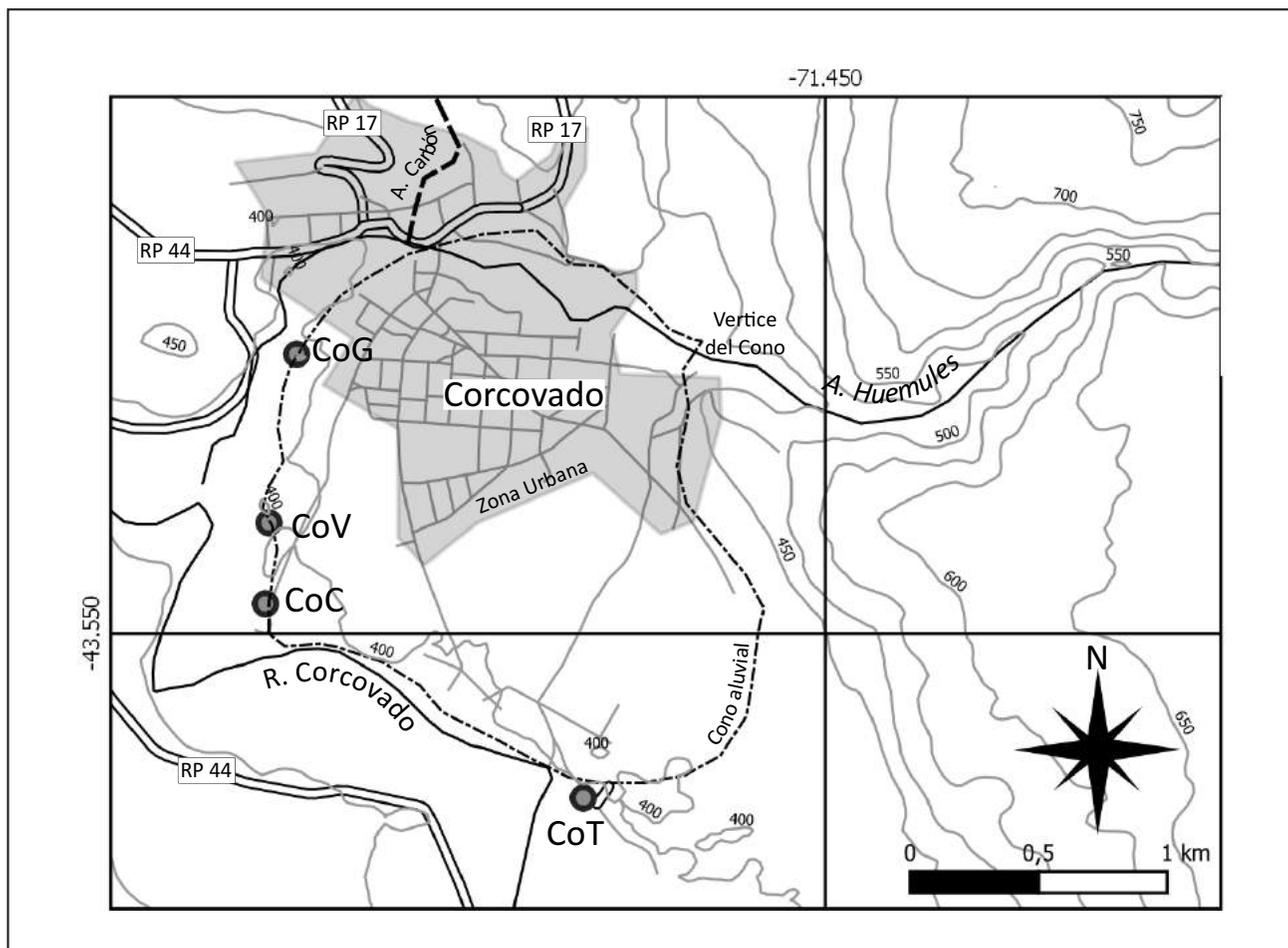


Figura 9. Ubicación de los manantiales de la localidad de Corcovado en relación con el área urbana.

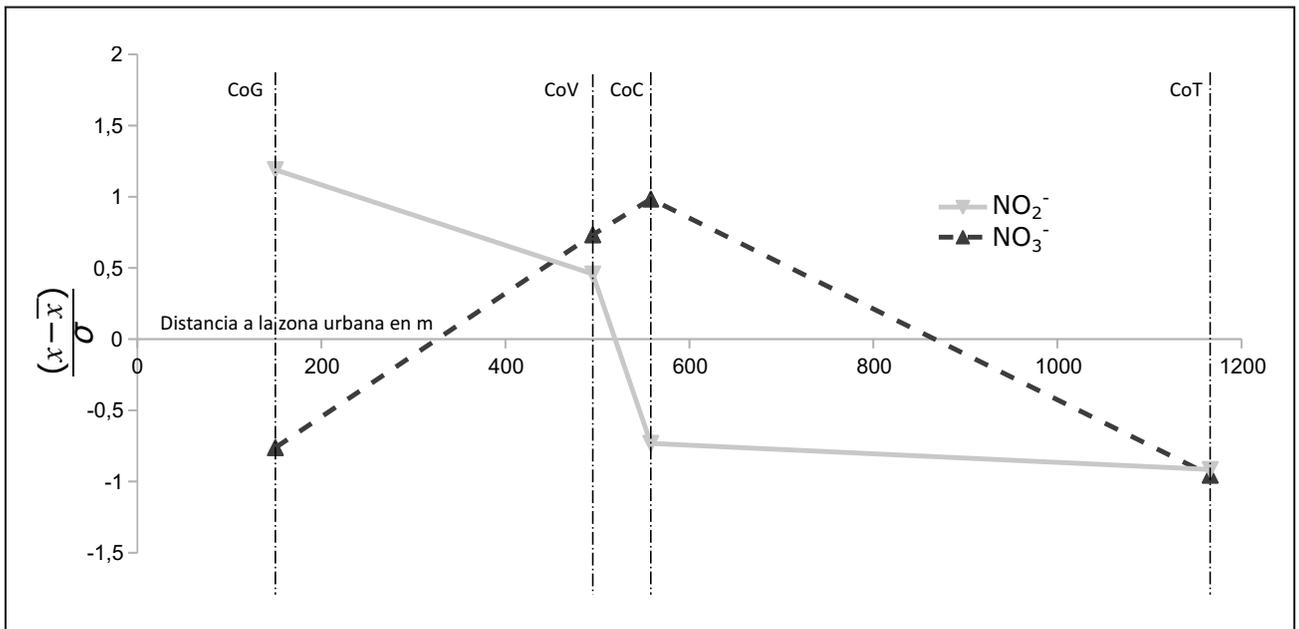


Figura 10. Gradientes de nitrito y nitrato en relación con la distancia al área urbana de Corcovado. Valores de concentración estandarizados.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman para el noroeste de Chubut la importancia atribuida por otros autores al gradiente de precipitaciones Este-Oeste como determinante del TSD y de la composición iónica del agua subterránea en Patagonia. Hacia el este, como en AM, la evaporación sustituye el calcio por sodio. La altura sobre el nivel del mar juega un rol importante en tanto implica una mayor precipitación pluvio-nival, mayor cercanía del manantial al área de recarga y menor tiempo de conducción, lo que resulta en las aguas más diluidas (LC). También influye la particular litología de cada acuífero; las rocas silíceas dominantes en la región dan origen a aguas de baja salinidad y de tipo bicarbonatado cálcico, o cálcico-sódico (CoC, CoG, CoT, CoV, CH, TT, LF, LC, AP). Sin embargo, la presencia de depósitos metalíferos epitermales intruídos entre las rocas silíceas origina en algunos sectores aguas más salinas y con predominio de sulfatos (W1, W4 y AM).

Todos los manantiales investigados presentaron aguas aptas para consumo humano/animal, ya sea desde el punto de vista de los iones mayoritarios, nutrientes o bacteriológico. Los manantiales de Corcovado, los del cordón Esquel y AM están vinculados actualmente a la provisión de agua para consumo humano. Si bien la concentración de compuestos nitrogenados fue baja, los gradientes observados en Corcovado se pueden interpretar como una señal de alarma por la contaminación del acuífero desde los pozos ciegos del pueblo. Estos manantiales y AM, son los únicos que poseen algún tipo de presencia humana

permanente en sus zonas de tránsito del acuífero; en ninguno de ellos existe protección del área de influencia, que, constituida por material poroso, en el primer caso o tener poco espesor en el segundo, exponen al acuífero a riesgos de contaminación.

En particular en situaciones como las dos últimas mencionadas, la realización de un estudio del tránsito del acuífero, determinando los tiempos de conducción hasta el punto de emergencia, permitiría establecer zonas de exclusión para preservar el área de influencia, cerramientos para impedir la entrada de animales, u otras. Estas medidas no solo garantizarían la calidad del agua a futuro, sino que también protegerían una variedad de especies vegetales de interés social por sus propiedades medicinales o alimenticias que crecen amparadas en estos microambientes.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Provincia del Chubut, por la beca de la Dirección de Gestión en Programas, Proyectos y Formación. Ello permitió financiar una parte de los análisis en laboratorios de terceros.

Al equipo del área programática SIPROSALUD, Esquel por los análisis bacteriológicos.

A todas las personas que facilitaron el acceso y orientaron para llegar a los diferentes manantiales.

A los revisores anónimos.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

APHA-AWWA-WPCF. (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - AMERICAN WATER WORKS ASSOC. - WATER POLLUT. CONTROL ASSOC.) 1992.

Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.

Díaz de Santos, Madrid, 17ava. ed.

- AUGE, M., 2004.  
Hidrogeología ambiental. En *Hidrogeología ambiental: I (Vols. 1–1)*. UBA.  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15910/Hidrogeolog%C3%ADa\\_ambiental\\_I.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15910/Hidrogeolog%C3%ADa_ambiental_I.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- AUGE, M. (ED.). 2020.  
Contaminación del agua subterránea en Argentina. Actualización en la investigación de la contaminación del agua subterránea en Argentina.  
*Rev. Lat. Am. Hidrogeol. Número especial p.1-82.*
- AUGE, M., WETTEN, C., BAUDINO, G., BONORINO, G., GIANNI, R., GONZÁLEZ, N., GRIZINIK, M., HERNÁNDEZ, M., RODRÍGUEZ, J., Y SISUL, A., 2010.  
Hidrogeología de Argentina.  
*Bol. Geológico y Minero 117(1), 7-23.*
- BACA, R. M., Y THRELKELD, S. T., 2000.  
Inland dissolved salt chemistry: statistical evaluation of bivariate and ternary diagram models for surface and subsurface waters.  
*Journal of Limnology, 59(2), 156-166.*
- BARQUÍN, O. J., 2007.  
Patrones de biodiversidad en manantiales: implicaciones para la gestión de las aguas subterráneas.  
*Locustella, 4, 37-49.*
- BECKER, S., 2008.  
Inorganic mass spectrometry: principles and applications.  
*John Wiley & Sons.*
- BELKHIRI, L., A. BOUDOUKHA Y L. MOUNI, 2011.  
A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data.  
*Internat. Jr. Environm. Res., 5(2), 537-544.*
- BELTRAN, J. F. A., COROMINAS, J., Y C. PARÍS, 1979.  
El estudio hidrogeológico de los manantiales y su aplicación geológica.  
*Caso de las aguas termales, carbónicas y sulfhídricas de Cataluña. Acta geológica hispánica, 14(1), 391-394.*
- CAA, 2019.  
Código Alimentario Argentino. Cap. XII. Agua Potable.  
Artículo 982 -(Resol. SRYGR y SAB Nro. 34/2019):  
[https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/caa\\_capitulo\\_xii\\_aguas\\_actualiz\\_2019-11.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/caa_capitulo_xii_aguas_actualiz_2019-11.pdf)
- CAMINOS, R. (ED.), 1999.  
Geología argentina.  
*SEGEMAR, Buenos Aires.*
- CANTONATI, M. Y K. ORTLER, 1998.  
Using spring biota of pristine mountain areas for long-term monitoring.  
*IAHS PUBL, 248:379-385.*
- CANTONATI, M., R. GERECKE Y E. BERTUZZI, 2006.  
Springs of the Alps - sensitive ecosystems to environmental change: from biodiversity assessments to long-term studies.  
*Hydrobiologia 562:59–96. En: A. Lami & A. Boggero (eds), Ecology of High Altitude Aquatic Systems in the Alps. DOI 10.1007/s10750-005-1806-9*
- CANTONATI, M., L. FUREDER, R. GERECKE, I. JUTTNER Y E.J. COX, 2012.  
Crenic habitats, hotspots for freshwater biodiversity conservation: toward an understanding of their ecology.  
*Freshwater Science 31(2):463-480. DOI: 10.1899/11-111.1*
- CASTILLO, F., Y P.G. HERNÁNDEZ, 2015.  
Aguas naturales, minerales y mineromedicinales.  
<http://www.sld.cu/sitios/mednat/docs/aguas.pdf>
- CHIMNER, R.A, G.L. BONVISSUTO, M.V CREMONA, J.J. GAITÁN Y C.R. LÓPEZ, 2011.  
Ecohydrological conditions of wetlands along a precipitation gradient in Patagonia, Argentina.  
*Ecología Austral 21:329-337.*
- CLARKE, N., N. COOLS, J. DEROME, K. DEROME, B. DE VOS, A. FUERST, A. KOWALSKA, R. MOSELLO, G.A. TARTARI, E. ULRICH, 2008.  
Quality assurance and control in laboratories.  
*European Union: ICP Forests Working Group on QA/QC in Laboratories.*
- CURTIS, C., V.J. PASQUARELLA Y B.A. BRADLEY, 2019.  
Características del paisaje de plantaciones de pino no nativas e invasiones en el sur de Chile.  
*Austral Ecology 44(7): 1213-1224. https://doi.org/10.1111/aec.12799.*

- DEL VALLE, H., J. LABRAGA Y J. GOERGEN, 1995.  
II.2. Biozonas de la región Patagónica.  
*En: Evaluación del estado actual de la desertificación en áreas representativas de la Patagonia. INTA-GTZ. Cap. 2: pgs. 37-55.*
- DEPETRIS, P. J., A.I. PASQUINI, A. I. Y K.L. LECOMTE, 2014.  
Weathering and the riverine denudation of continents.  
*Springer Briefs Earth System Sci., DOI: 10.1007/978-94-007-7717-0*
- DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS, 2018.  
Corcovado.  
[http://www.estadisticaold.chubut.gov.ar/home/index.php?option=com\\_content&view=article&id=224&Itemid=140](http://www.estadisticaold.chubut.gov.ar/home/index.php?option=com_content&view=article&id=224&Itemid=140)
- DRAGO, E., Y R. QUIROS, 1995.  
The hydrochemistry of the inland waters of Argentina: a review.  
*Internat. Jr. Salt Lake Res., 4(4):315-325.*
- EPELE, L.A., L.M. MANZO, M.G. GRECH, P. MACCHI, A.Ñ. CLAVERIE, L. LAGOMARSINO Y M.L. MISERENDINO, 2018.  
Disentangling natural and anthropogenic influences on Patagonian pond water quality.  
*Science Total Environm. 613-614: 866-876.*
- FAGUNDO, J., A. CIMA Y P. GONZÁLEZ, 2001.  
Revisión bibliográfica sobre clasificación de las aguas minerales y mineromedicinales.  
*Centro Nacional de Termalismo "Victor Santamarina", 27.*  
[http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bal/clasificacion\\_aguas\\_minerales.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bal/clasificacion_aguas_minerales.pdf)
- FERNÁNDEZ, C. M. Y Y. M. V. TASET, 2006.  
Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas.  
*Minería y Geología, 22(3), 9 pp.*
- Forsberg, C., S.O. Ryding, A. Claesson y G.A. Forsberg, 1978.  
Water chemical analysis and/or algal assay?  
*Mitt. Internat. Verein. Limnol. 21:352-263.*
- GIBBS, R. J., 1970.  
Mechanisms controlling world water chemistry.  
*Science, 170(3962):1088-1090.*
- Güler, C., G.D. Thyne, J.E. McCray y K.A. Turner, 2002.  
Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data.  
*Hydrogeol. Jr 10(4), 455-474.*
- HALLER, M.J., R.R. LECH, O. MARTÍNEZ, C.M. MEISTER, S. POMA Y R. VIERA, 2010.  
Descripción geológica de la Hoja 4374-IV y III, Trevelin, Provincia de Chubut.  
*Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín, 1-92.*
- IDOYAGA, M. 2004.  
Muestreo, análisis e interpretación de un fenómeno observado en el arroyo Descolgado (o Amarillo, o Will-A), ubicado en el proyecto Cordón Esquel, Provincia de Chubut.  
*Departamento de Cs. Geológicas, FCEFyN, Universidad de Buenos Aires. Informe para la Dirección General de Protección ambiental, Pcia. de Chubut. 32 pp. y 11 anexos.*
- IGN. INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL.  
Modelo Digital de Elevación.  
<http://ign.gob.ar/node/987>
- INTA, 2011.  
Cartografía de Isohietas Provincia del Chubut  
[http://anterior.inta.gov.ar/region/pas/sipas2/cmplsigliso\\_map.html](http://anterior.inta.gov.ar/region/pas/sipas2/cmplsigliso_map.html)
- JOBBÁGY, E. G., J.M. PARUELO Y R.J. LEÓN, 1995.  
Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia.  
*Ecología Austral, 5(1): 47-53.*
- LECOMTE, K.I., M.G. GARCÍA, S.M. FORMICA Y P. DEPETRIS, 2011.  
Hidroquímica de ríos de montaña (Sierras de Córdoba, Argentina): Elementos mayoritarios disueltos.  
*Latin Am. Jr. Sediment. Basin Analysis: 18(1):43-62.*
- LIZUAIN, A. Y R. VIERA, 2010.  
Hoja Geológica 4372 I y II, Esquel, provincia del Chubut.  
*Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 369, 72 p., Buenos Aires.*
- LONG, G. L., Y J. D. WINEFORDNER, 1983.  
Limit of detection. A closer look at the IUPAC definition.  
*Analytical chemistry, 55(7), 712A-724A.*

- MAŁEK, S. Y M. JASIK, 2011.  
Crenological studies on Pokrzywianka and Bielnianka catchments in the Świętokrzyski National Park.  
*Proceedings of the Biennial International Symposium, Forest and Sustainable Development, Braşov, Romania, 15-16th October 2010 2011 pp.537-542 ref.7. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123105460>*
- MARQUÉZ, M.J., C. PARISI, R.L.M. VIERA, M.I. FERNÁNDEZ, M.C. GODEAS Y L.C. MOSER, 2006.  
Carta Minero-Metalogenética 4372-I y II Esquel.
- MAZZONI, E. Y J. RABASA, 2013.  
Types and internal hydro-geomorphologic variability of mallines (wet-meadows) of Patagonia: Emphasis on volcanic plateaus.  
*Jr. South American Earth Sci. 46:170-182 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981111001222>*
- MERK, M, N. GOEPPERT Y N. GOLDSCHIEDER, 2020.  
Physicochemical and major ion data for springs in the Black Forest National Park, Germany.  
*Data in Brief 30-105645 <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105645>*.
- MONASTERIO, A.M., F. ARMIJO, I. HURTADO Y F. MARAVER, 2017.  
Análisis de las aguas minerales de la provincia del Neuquén, República Argentina.  
*Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd., 32(1):75-127. DOI: 10.23853/bsehm.2017.0296*.
- MORALES, D., S. MOLARES, L. EPELE, A. LADIO, P. MANZO Y G. ALDAY, 2020.  
An interdisciplinary approach to perception of water quality for human consumption in a Mapuche community of arid Patagonia, Argentina.  
*Sci. Tot. Environm. 720 - 137508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137508>*
- MURRAY, K. Y P. WADE, 1996.  
Checking Anion-Cation charge balance of water quality analysis: Limitations of the traditional method for non-potable waters.  
*Water SA 22(1):27-32*.
- ÑANCULEF HUAIQUINAO, J. 2016.  
El sentido y el significado del agua o Ko en el pueblo Mapuche, Presentación en power point enviada gentilmente por el autor.  
*OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org>*
- PEDROZO, F; S. CHILRUD; P. TEMPORETTI Y M. DIAZ, 1993.  
Chemical composition and nutrient limitation in rivers and lakes of Northern Patagonian Andes (39.5°-42° S; 71° W) (Rep. Argentina).  
*Verh. Internat. Verein. Limnol., 25(1):207-214*
- PIZZOLON, L., 2003.  
Informe sobre monitoreo de calidad del agua en la cuenca del arroyo Willimanco.  
*Esquel: Cooperativa 16 de Octubre. <https://docplayer.es/13001677-Informe-sobre-monitoreo-de-calidad-del-agua-en-la-cuenca-del-arroyo-willimanco.html>*
- PIZZOLON, L. MISERENDINO Y G. ALDAY, 2001.  
Evolución de la calidad del agua en la cuenca del río Percey en la década 1991-2001.  
*Convenio UNPat/FCN-Cooperativa 16 de Octubre, Anexo de Trabajo Nro. 2. Informe Final 67 pp.*
- PIZZOLON, L., G. OMAD, M., WEIDL Y H. CLAVERIE, 2017.  
Salinización incipiente en un arroyo de alta montaña (La Hoya, Chubut).  
*Rev. Geol. Apl. Ing. y Amb. 36:41-54. <https://www.editoriasagai.org.ar/lojs/index.php/rgaia/article/view/108/95>*
- SCAPPINI, M. DEL C. Y J.D. ORFILA, 1981.  
Características físico-químicas de las aguas subterráneas de la provincia de Chubut.  
*Revista Geofísica 16:62-71. [http://bibliotecas.inah.gob.mx:8090/IPGH/REGEOF\\_00\\_0016\\_1982\\_P062.pdf](http://bibliotecas.inah.gob.mx:8090/IPGH/REGEOF_00_0016_1982_P062.pdf)*
- SIG SEGEMAR (SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA ON-LINE DEL SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO):  
*<http://sig.segemar.gov.ar/>*
- SIMLER, R., 2009.  
Diagrammes.  
*<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>*
- SIPAS. SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA PATAGONIA SUR.  
*<http://anterior.inta.gov.ar/region/pas/sipas2/novedades/novedades.html>*.
- STAT SOFT, INC. 2010.  
STATISTICA for Windows.
- STEINMAN, P., 1915.  
Praktikum der Süßwasserbiologie.  
*Die Organismen des fließenden Wassers. Sammlung naturwissenschaftlicher Praktika, Teil 1:1-184.*

- STUMM, W. y J.J. MORGAN, 1970.  
Aquatic chemistry; an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters.  
*Wiley-Interscience*.
- TARTARI, G. A. y R. MOSELLO, 1997.  
Metodologie analitiche e controlli di qualità nel laboratorio chimico dell'Istituto Italiano di Idrobiologia.  
*Documenta I.I.I. n° 60, 160 pp.*
- VAN DER WEIJDEN, C.H. y F.A.L. PACHECO, 2007.  
From Hydrochemistry to Chemical Weathering: Models and Problems.  
*VI Congreso Ibérico de Geoquímica. <https://www.semanticscholar.org/paper/From-Hydrochemistry-to-Chemical-Weathering%3A-Models-Weijden-Pacheco/5543b5ce9529dd62f1f320308c6071f529ab04f6?p2df>*
- VECTOR ENGINEERING, 2002.  
Informe de Impacto Ambiental.  
*Proyecto Esquel. Minera El Desquite. Esquel, Prov. del Chubut.*
- VILLALBA, E., C. TANJALA, G. BORZIA, G. PÁEZ y E. CAROL, 2020.  
Geogenic arsenic contamination of wet-meadows associated with a geothermal system in an arid region and its relevance for drinking water.  
*Science Total Environm. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137571>*
- WIENER LAB. 2000.  
Uremia.  
*Prospecto 870990022/00.*  
[http://www.wiener-lab.com.ar/VademecumDocumentos/Vademecum%20espanol/uremia\\_sp.pdf](http://www.wiener-lab.com.ar/VademecumDocumentos/Vademecum%20espanol/uremia_sp.pdf)





# Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina

## Groundwater and underground construction in urban areas. The case of the city of Santa Fe, province of Santa Fe, Argentina

Lanzaro, María Verónica <sup>1</sup> ✉ - D'Elia, Mónica Patricia <sup>2</sup>

Recibido: 05 de diciembre de 2020 • Aceptado: 25 de marzo de 2021

### Resumen

*En las últimas décadas, la ausencia o aplicación inadecuada de planes de ordenamiento urbano ha generado en muchas ciudades patrones de uso del suelo caracterizados por una alta concentración en áreas centrales, en contraposición con una ocupación desordenada en las periferias. A su vez, el aprovechamiento subterráneo se ha convertido en alternativa para ciudades con problemas de crecimiento y densidad poblacional, aunque generalmente, no se comprende la compleja interacción entre el uso del suelo urbano y el comportamiento del sistema hídrico subterráneo ni se aborda considerando aspectos normativos.*

*El objetivo de este trabajo es evaluar la relación entre las características hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe y las construcciones subterráneas y de esa manera contribuir con la formulación de lineamientos técnicos y normativos para optimizar proyectos de obras con aprovechamiento del espacio subterráneo.*

*Se analizaron las variaciones de niveles freáticos para un periodo de 10 años, la calidad química del agua subterránea y los usos del suelo con aprovechamiento subterráneo, constatando que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70 m desde el terreno hasta aproximadamente 8m, rango donde se alojan fundaciones, infraestructura y recintos subterráneos.*

*Estos resultados contribuirán a optimizar futuras obras subterráneas y a la generación de una conciencia de gestión integral que asuma la relación compleja entre el uso del suelo urbano y el medio hidrogeológico en la toma de decisiones y planificación de la ciudad.*

**Palabras clave:** aguas subterráneas, áreas urbanas, uso del suelo, obras subterráneas, planificación urbana.

1. Dirección Provincial de Arquitectura e Ingeniería. Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat (M.I.S.P. y H.), Gobierno de la Provincia de Santa Fe, Francisco Miguenz 180, Piso 3, Corporate Tower, Dique 1, Puerto de Santa Fe. (3000) Santa Fe, Argentina.

✉ mlanzaro@santafe.gov.ar

2. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo", Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe, Argentina.

## Abstract

*In recent decades, the absence or inadequate application of urban planning plans has generated in many cities land use patterns characterized by a high concentration in central areas, in contrast to a disorderly occupation the peripheries. In turn, underground use has become an alternative for cities with problems of growth and population density, although the complex interaction between land use and the behavior of the groundwater system is not understood, nor is it addressed considering regulatory aspects.*

*The objective of this work is to evaluate the relationship between the hydrodynamic and hydrochemical characteristics of the aquifer system that underlies the city of Santa Fe with the underground constructions and thus contribute to the formulation of technical and regulatory guidelines to optimize works projects with underground use.*

*The variations of groundwater levels for a period of 10 years, the chemical quality of the groundwater and the underground use were analyzed, verifying that the depth of the groundwater table varied between 1.70m from the ground to approximately 8m, a range where foundations, infrastructure and underground enclosures are housed.*

*These results will contribute to optimizing future underground works and to the generation of an integral management awareness that assumes the complex relationship between the use of urban land and the hydrogeological environment in decision-making and city planning.*

**Keywords:** *groundwater, urban areas, land use, underground constructions, urban planning.*

## INTRODUCCIÓN

A medida que se consolida el desarrollo urbano se reduce el espacio disponible para concretar nuevas intervenciones en obras de distinta escala, tanto de arquitectura como de ingeniería civil. Como consecuencia de esta escasez de espacio se incrementa el costo de la tierra y la búsqueda de rentabilidad obliga a un desarrollo edilicio vertical ascendente y descendente. De este modo, el aprovechamiento del espacio subterráneo se convierte en una alternativa para muchas ciudades que poseen problemas relacionados con su crecimiento, densidad poblacional y ordenamiento urbano (*Lincoln Institute of Land Policy, 2007*).

El aumento de las superficies construidas y la densificación del uso del suelo asociado al fenómeno de urbanización implican una reducción de los espacios verdes y una impermeabilización del suelo y, consecuentemente, una disminución de la infiltración del agua en el suelo y un aumento del escurrimiento superficial. Esto incrementa la vulnerabilidad del área urbana ante inundaciones por excedentes pluviales (*Ambrosino et al., 2004*). Simultáneamente, la infraestructura básica (redes subterráneas: pluvial, cloacal, de agua potable, canales entubados) no acompaña el ritmo del crecimiento urbano evidenciándose procesos de obsolescencia y colapso.

Frente a esta realidad cobra importancia la planificación urbana como herramienta preventiva de gestión ambiental, la cual a través de instrumentos específicos como la regulación del uso del suelo y bajo los principios de desarrollo sustentable, contribuye a mejorar la seguridad de las ciudades al poner restricciones a las construcciones potencialmente peligrosas y minimizar los peligros de contaminación y riesgos ambientales (*Gómez Orea, 2008*).

En la etapa constructiva de toda obra se da una sinergia de efectos e impactos ambientales negativos como la contaminación sonora, atmosférica, del suelo y subsuelo, la degradación de espacios verdes, etc. Particularmente las construcciones subterráneas pueden crear un obstáculo al flujo del agua subterránea y alterar la calidad natural de la misma (*Custodio & Llamas, 1983; Dávila Porcel & de León Gómez, 2011; Lerner, 1997*).

Por otra parte, las construcciones subterráneas poseen una complejidad técnico-constructiva, relacionada principalmente con las excavaciones y su cimentación profunda. En todos los casos, cuando se ejecuta una excavación cercana o por debajo del nivel freático existe riesgo de inundación, filtración de agua e inestabilidad para la obra y el entorno inmediato (*Foster et al., 1998; Vázquez-Suñé et al., 2005*). Esta interacción del agua subterránea y la construcción subterránea es importante no solo durante el proceso constructivo sino también una vez finalizada la misma y a lo largo de toda su vida útil (*Custodio, 2004; Shanahan, 2009*).

Especialmente, las construcciones subterráneas son complejas y requieren parámetros elevados de calidad e ingeniería (medidas adecuadas de gestión, tecnología, métodos de construcción, técnicas de excavación, capacitación y especialización del personal de obra, etc.) en todas sus fases (idea, proyecto, ejecución, puesta en servicio). Parámetros elevados no sólo referidos a su propia materialidad, sino incluso a la necesidad de no alterar el espacio superficial y subsuperficial de las áreas urbanas, y a la protección de linderos durante el proceso constructivo (*Suárez-Burgoa, 2009*).

Actualmente es posible acceder a los conocimientos técnicos y tecnología apropiada para afrontar los impactos ambientales y sociales negativos producidos por la ejecución de obras subterráneas. Sin embargo, no son acompañados por un abordaje de los aspectos legales y normativos, lo cual requiere la comprensión de la interacción entre el uso del suelo y el comportamiento del sistema hídrico subterráneo en áreas urbanas.

La ciudad de Santa Fe no está exenta a que sucedan las situaciones antes mencionadas, más aun considerando su emplazamiento entre los ríos Salado y Paraná y la influencia de sus crecidas y de fenómenos meteorológicos extremos que se vienen registrando en los últimos años, caracterizados por abundantes precipitaciones en cortos periodos de tiempo, que hacen imprescindible integrar el funcionamiento del sistema hídrico a la planificación y construcción de la ciudad.

Por otra parte, desde el punto de vista físico-espacial, la ciudad se va acercando a un punto de saturación en las áreas más consolidadas del perímetro urbano, donde los espacios disponibles y las condiciones del mercado inmobiliario van agotando las posibilidades efectivas de ocupación de áreas vacantes o sustitución de edificaciones antiguas para ejecutar nuevas obras. Esta tendencia permite inferir que en los próximos años seguirá aumentando la ocupación urbana de mayor densidad, con mayor aprovechamiento del espacio subterráneo.

En este contexto de constante crecimiento urbano, los suelos sobre los que se asienta la ciudad también sufren alteraciones. A simple vista, solo se observan transformaciones sobre la superficie: nuevas calles pavimentadas, crecimiento del tránsito vehicular, extensión de redes de infraestructura, nuevos edificios en altura, transformaciones que también impactan en las capas de suelo por debajo de los pavimentos. Existen en la ciudad numerosos casos informados de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales y de roturas de redes subterráneas. Especialistas en geología e ingeniería ambiental definen a la situación como un fenómeno multicausal derivado del tipo de cañerías y su estado de mantenimiento, del tipo de suelo de la ciudad, del avance de la urbanización, y de la incidencia del comportamiento fluctuante y dinámico del agua subterránea (Casarotto, 2015).

Se registran también numerosas obras subterráneas, que presentan problemas de filtraciones de aguas subterráneas en su interior. En algunos casos con ingreso estacional del agua y en otros de manera permanente. Esta situación provoca la degradación de sus estructuras resistentes, asentamientos diferenciales del terreno, grietas, riesgo eléctrico, etc., que llevan a la inutilización de esos recintos, y pueden llegar a producir la inestabilidad estructural de las edificaciones. En la mayoría de los casos las patologías mencionadas son irreversibles o solo se logran soluciones parciales, difíciles de ejecutar y de muy alto costo para sus propietarios.

En los procesos de ejecución de las obras en la ciudad se evidencia un desconocimiento y falta de información acerca del comportamiento dinámico y fluctuante del agua subterránea en el tiempo y su relación con el medio construido. Previamente a la construcción de edificaciones no se considera en los proyectos las variaciones de los niveles freáticos en el terreno, lo cual evitaría problemas futuros en fundaciones y en distintos tipos de construcciones subterráneas; y estaría contribuyendo a una planificación urbana segura y económicamente racional.

En esta perspectiva y ante la falta de consideración del medio hidrogeológico y su interacción con el medio urbano, la ciudad de Santa Fe requiere proyectar un escenario futuro donde se garantice el aprovechamiento óptimo del espacio urbano, con especial consideración del espacio subterráneo bajo condiciones de seguridad técnica, ambiental y legal.

El *objetivo de este trabajo* es evaluar la relación entre las características hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe con las construcciones subterráneas y de esa manera contribuir con la formulación de lineamientos técnicos y normativos para optimizar proyectos de obras con aprovechamiento del espacio subterráneo.

## ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Provincia de Santa Fe, Argentina, es capital de la provincia y cabecera del departamento La Capital. Está ubicada en el centro-este de la República

Argentina, en la región geográfica denominada llanura pampeana a los 31° 42' de latitud sur y 60° 46' de longitud oeste, a una altitud promedio de 17 m.s.n.m.

La jurisdicción territorial del Municipio de Santa Fe, abarca 268km<sup>2</sup>, de los cuales, más de un 70% está conformado por ríos, lagunas y bañados.

El área de estudio se centra específicamente en el área urbana de la ciudad de Santa Fe; abarca 80,4km<sup>2</sup>, delimitada al norte por calle Padre Facundo Quiroga en el límite del ejido municipal, al este por la laguna Setúbal, al oeste por el río Salado y al sur por el río Santa Fe (Figura 1).

## Características generales

La ciudad de Santa Fe se localiza en el punto exacto de cruce entre la Hidrovía Paraná-Paraguay, con orientación norte-sur vinculando a Paraguay y el centro-este de Brasil con la provincia de Buenos Aires; y el Corredor Bioceánico Central, eje vial este-oeste de escala continental vinculando el sur de Brasil con la zona central de Chile. Conectada a redes de intercambios económicos activos le confieren un elevado alcance regional. La estructura económica de la ciudad se concentra fundamentalmente en el sector terciario o de servicios, prevaleciendo el comercio como principal motor de la economía. La transformación de los recursos naturales en productos primarios no elaborados, incluye a la agricultura y a la ganadería como principales actividades. La industria y la construcción conforman el sector secundario; siendo la construcción uno de los principales motores que dinamiza el conjunto de la economía. Como capital político-administrativa de la provincia posee un fuerte desarrollo del sector público en todos sus niveles.

Según el último censo del año 2010, la ciudad de Santa Fe tenía una población urbana de 391.231 habitantes (INDEC - IPEC, 2010), y la proyección poblacional estimada a julio de 2016 fue de 417.224 habitantes. Para el Aglomerado urbano Gran Santa Fe, ese censo registró una población de 501.166 habitantes, de la cual el 80% vive en la ciudad de Santa Fe.

En cuanto a la cobertura de servicios, del total de hogares particulares ocupados de la ciudad (124.927) el 95% cuenta con servicio de agua potable, el 62% con servicio de cloacas, el 64% con servicio de gas natural y el 99% con electricidad (Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2016).

El tamaño, la demografía y su dinamismo regional le confieren a la ciudad de Santa Fe la condición de ciudad intermedia.

## Características naturales

Según estudios previos, el clima de la ciudad es templado y húmedo, la temperatura media anual es del orden de los 19°C (período 1920-2007). La precipitación media anual es de 1007mm (período 1901-2007), con un valor máximo observado de 1825mm en el año 1914 y un mínimo de 480mm en el año 1910. Las máximas precipitaciones medias mensuales se registraron desde noviembre a abril superando los 100mm. Los meses de invierno son los menos lluviosos con montos del orden de los 30mm en promedio. El balance hídrico modular (período 1977-2007) indica que no se producirían déficits hídricos y que los excesos tendrían lugar desde abril a agosto y de octubre a diciembre, variando desde unos pocos mm hasta aproximadamente 40mm mensuales. Para el mismo período la humedad relativa media varía entre 71% y 83% y la presión atmosférica oscila entre 1006 y 1016 hPa. Se evidencia en la región un aumento

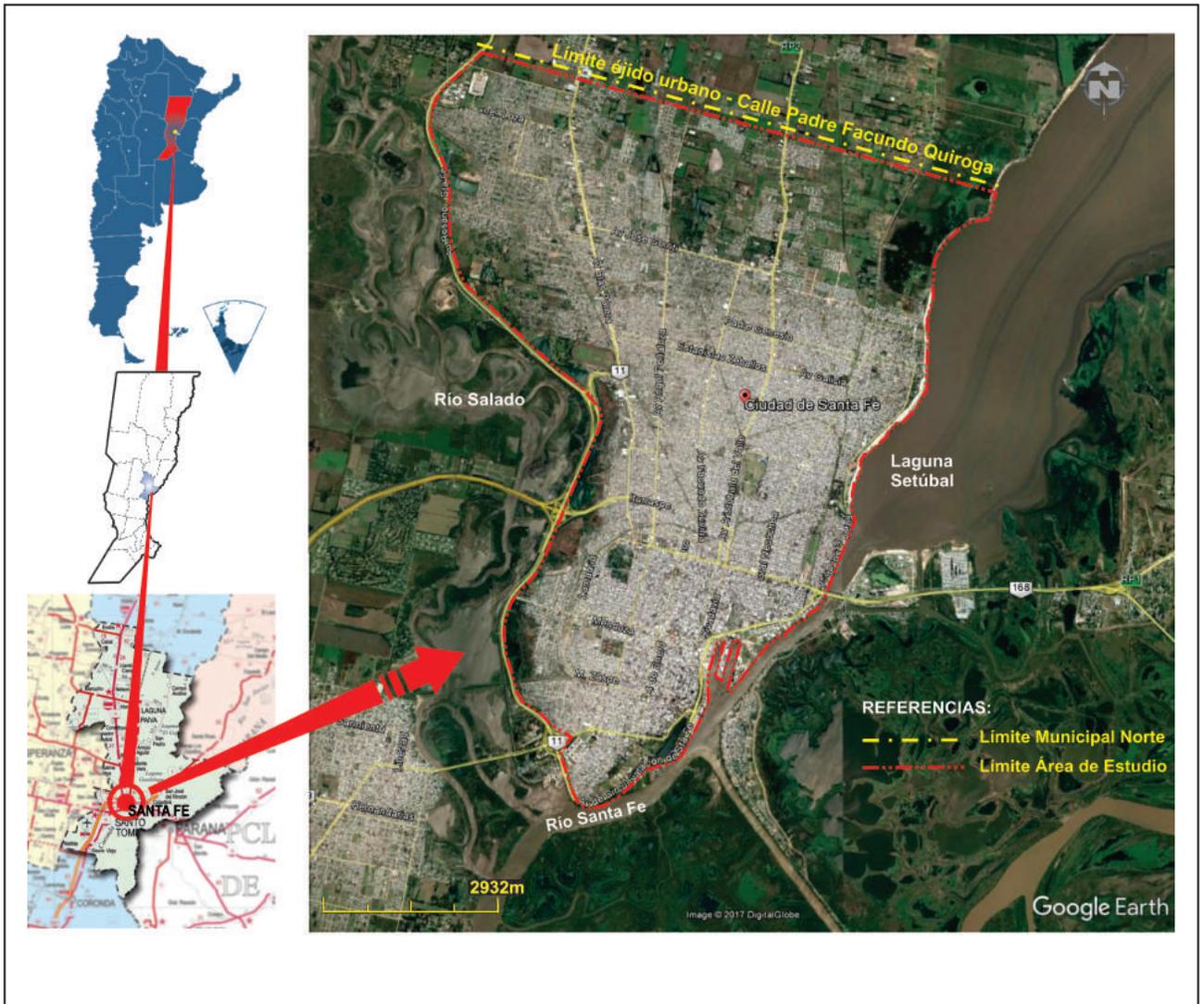


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de la precipitación a partir de la década del '70 y hasta la actualidad, con precipitaciones anuales del orden de 900 a 1200mm, con persistencia de condiciones húmedas, eventos lluviosos muy intensos y arealmente concentrados (Pagliano, 2008).

La ciudad de Santa Fe se encuentra emplazada entre los valles de inundación de los ríos Paraná y Salado. Las máximas crecidas históricas del río Paraná se registraron durante los años 1977, 1983, 1987 y para el río Salado en 1973. Durante el año 2003, la ciudad se vio afectada por una crecida extraordinaria del río Salado que causó pérdidas humanas, más de 130.000 evacuados y cuantiosas pérdidas materiales. Esta crecida se originó por la ocurrencia de precipitaciones intensas sobre la cuenca baja del río, que ya se encontraba saturada por precipitaciones ocurridas en los meses previos. Otra situación de características extremas aconteció en marzo-abril de 2007, cuando precipitaron aproximadamente 536mm en el mes de marzo, causando el anegamiento de gran parte de la ciudad, más de 28.000 evacuados, riesgos en la salud de la población, pérdidas económicas, etc., debido al colapso de la infraestructura para la evacuación de efluentes pluviales fuera del cinturón que conforman las obras de defensa contra inundaciones (D'Elia et al., 2008).

Los puntos topográficos más altos de la ciudad se encuentran en cotas IGN (Instituto Geográfico Nacional) 20m, mientras que las máximas crecidas registradas de los ríos Paraná y Salado han estado en cotas IGN del orden de 16 a 17m, según las zonas y considerando las pendientes hidráulicas de los planos de inundación. Una gran superficie de ocupación urbana se encuentra por debajo de estas cotas de inundaciones máximas históricas y una superficie mayor aún por debajo de las cotas de inundación correspondientes a crecidas hipotéticas de mayor recurrencia. La progresiva expansión urbana fue ocupando los valles de inundación del río Paraná hacia el este y del río Salado hacia el oeste (Paoli citado por Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2009). Ese crecimiento urbano avanzando sobre terrenos inundables, con el tiempo ha llevado a la construcción de un complejo sistema de protección contra inundaciones conformado con terraplenes de protección, reservorios y componentes del drenaje urbano, lo que implicó el relleno de zonas bajas y modificó significativamente el drenaje natural (Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2016). Resultado de esa ocupación del suelo urbano, la ciudad Santa Fe se ha transformado en un territorio vulnerable, expuesto principalmente a riesgos hídricos como las crecidas de los ríos, las lluvias intensas o la combinación de ambos fenómenos.

Las características del sistema hídrico subterráneo en la ciudad de Santa Fe se conocen a través de estudios llevados a cabo por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (GIG) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL).

Este Grupo ha implementado una red de monitoreo compuesta por 23 pozos de entre 5 y 15m de profundidad, cuya ubicación se muestra en la Figura 2.

Sobre la base del análisis de los perfiles litológicos de las perforaciones de los pozos de monitoreo y de perforaciones existentes, el GIG elaboró el perfil A-A' (Figura 3), en el que se puede distinguir arenas grises y arcillas verdes de la Formación Paraná a aproximadamente a partir de la cota IGN -20,5 en el norte de la ciudad y a cota IGN -32,5 en el sur de la ciudad. Esto constituye la base del acuífero en estudio. Superiormente, se encuentran arenas y arenas gravosas de 30m de espesor promedio, cuyo techo se ubica entre cotas 13 y 10 IGN, que corresponden a un ambiente dominado por la dinámica de divagación lateral de cauces del río Paraná, con episodios de

crecidas de gran intensidad que formaron estos niveles de arenas gravosas que pertenecen a la Formación Ituzaingó (conocida como Arenas "Puelches"). Sobre ellas y hasta la superficie, se apoyan sedimentos cuaternarios de granulometría más fina (arenas finas a limos, con arcillas) de origen eólico, de aproximadamente 6m de espesor promedio. Esta secuencia sedimentaria da lugar a un acuífero multicapa que estaría comportándose como libre con drenaje diferido (D'Elia et al., 2011).

Desde la implementación de la red de monitoreo en los años 2008-2009 y hasta la actualidad, se registra la profundidad del agua subterránea en los pozos con una frecuencia mensual y, en uno de ellos diariamente mediante un registrador continuo.

A través del análisis de los datos colectados e información generada se evidenció un comportamiento similar en las fluctuaciones de los niveles de agua subterránea en todos los pozos de monitoreo durante el período 08/2008-05/2011. La profundidad del agua subterránea varió desde unos pocos cm hasta 7m aproximadamente. En el período 10/2009-03/2010 se evidenció un ascenso en los niveles freáticos de 2m en promedio,

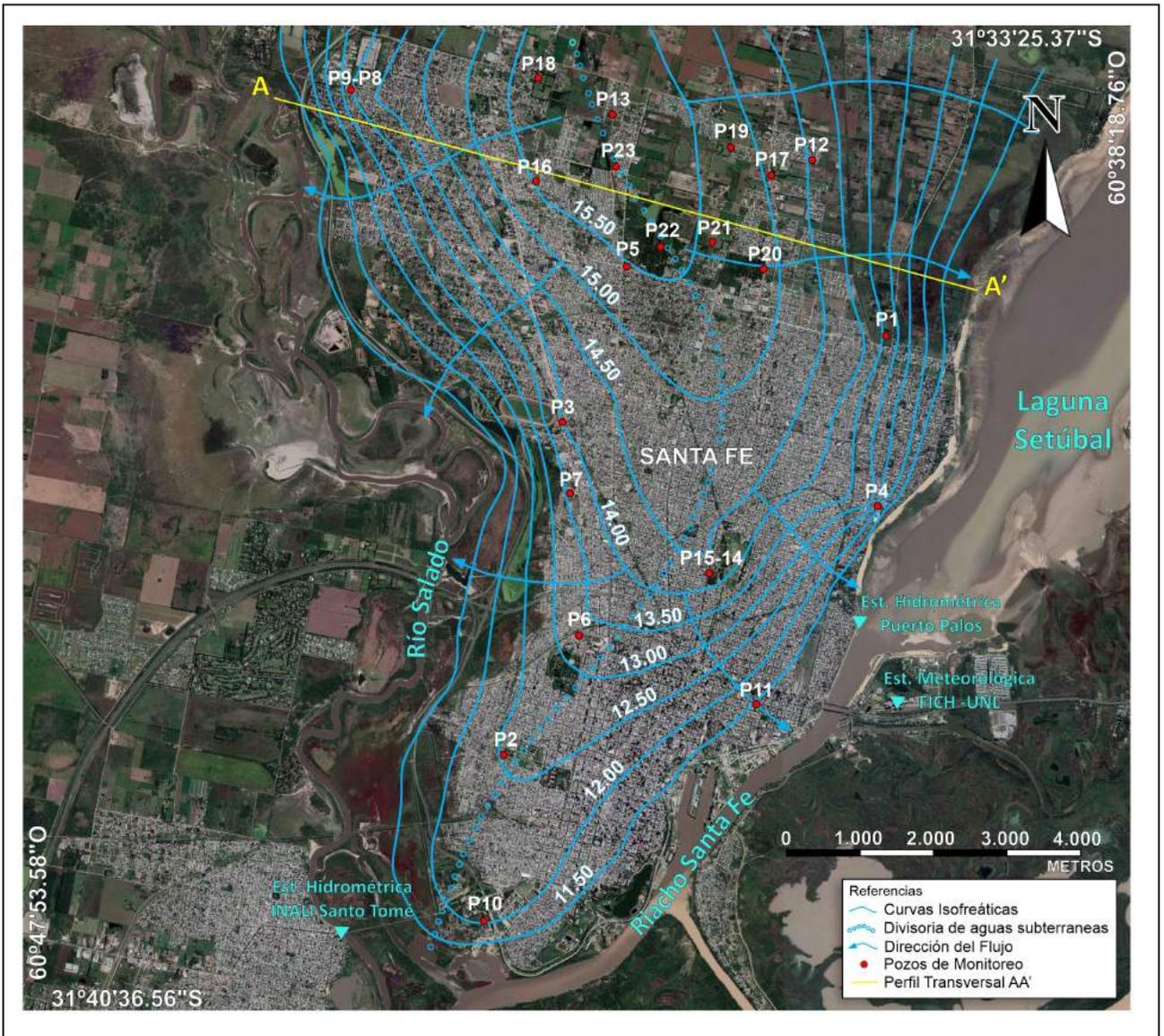


Figura 2. Ubicación Pozos de Monitoreo. Curvas isofreáticas (septiembre de 2010). Fuente: D'Elia et al., 2011.

como consecuencia de las elevadas precipitaciones (del orden de los 1200mm) y en coincidencia con las crecidas ordinarias de los ríos Salado y Paraná. Luego, descendieron hasta octubre de 2010 y posteriormente, en el período 11/2010-05/2011, ascendieron como respuesta a las precipitaciones estivales y otoñales.

La recarga del acuífero es principalmente directa proveniente de las precipitaciones y se produciría principalmente en el sector norte de la ciudad, donde la impermeabilización por la urbanización es menor y, eventualmente, de los cuerpos de agua superficial con los que se encuentra hidráulicamente conectado. Se observó una divisoria de aguas en el sector central de la ciudad con dirección norte-sur que divide el sentido de escurrimiento del agua subterránea hacia las zonas de descarga, hacia el oeste (río Salado) y hacia el este (laguna Setúbal). Esta situación ha sido

corroborada a través del análisis de la superficie freática (D'Elia *et al.*, 2011). En la Figura 2 se presentan las curvas isofreáticas en el área de estudio correspondiente a septiembre de 2010.

Del análisis de la calidad química de muestras de agua subterránea surge que un 60% corresponden al tipo bicarbonatada cálcica-magnésica, el 23% son bicarbonatadas sódicas y el resto clorurada y/o sulfatada sódica, según la clasificación de Piper Hill. En general el agua se encuentra dentro de los límites establecidos por Ley 11220 para el agua de bebida, excepto en los pozos P4 y P16 en los que el contenido de  $\text{NO}_3^-$  supera los 45mg/l, en los pozos P16 en el que el contenido de  $\text{Mn}^{++}$  es del orden de los 2mg/l, y P5 donde el contenido de  $\text{Fe}^{++}$  es de 0,6mg/l (D'Elia *et al.*, 2011).

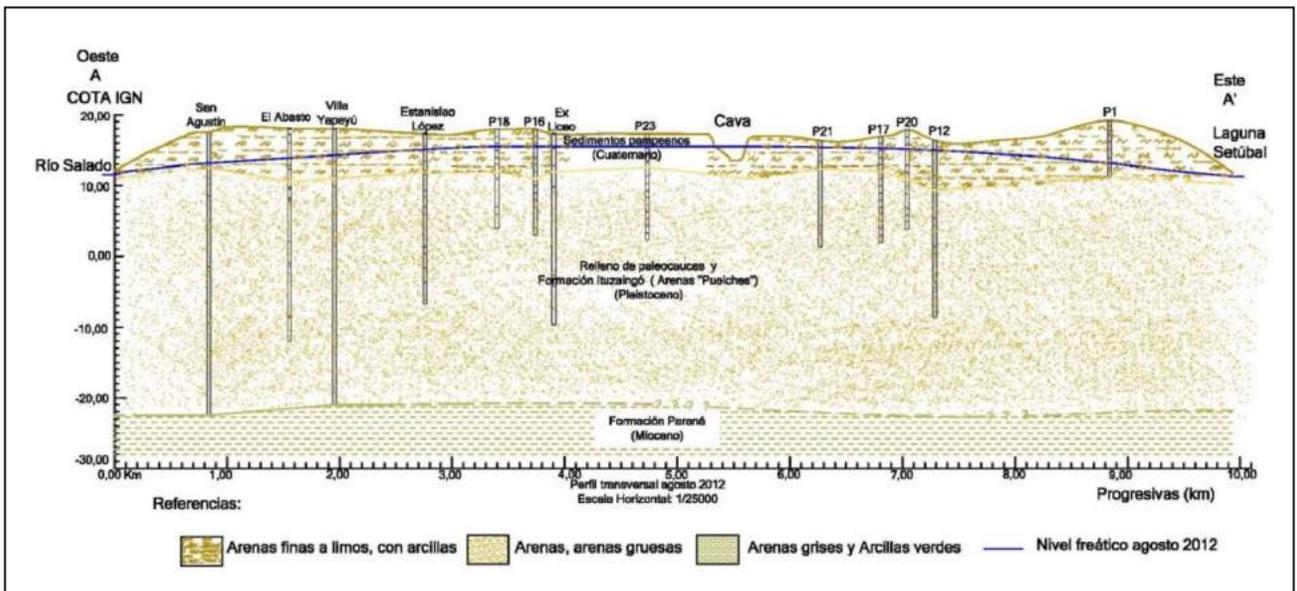


Figura 3. Perfil Estratigráfico A-A'. Fuente: D'Elia *et al.*, 2011.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Aspectos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos

Se contó con datos de precipitaciones diarias y mensuales de la Estación Hidrometeorológica ubicada en el parque "Carlos Zapata" de la Ciudad Universitaria de Santa Fe y lecturas hidrométricas diarias del río Salado en las estaciones hidrométricas INALI-Santo Tomé y de la laguna Setúbal en la estación hidrométrica Santa Fe-La Guardia, así como con la cota del cero de las escalas de los hidrómetros de las estaciones mencionadas.

Por otra parte, se dispuso de los registros mensuales de profundidades de los niveles freáticos medidas en tres pozos de monitoreo de la red antes mencionada (P4, P11 y P14) ubicados en sitios que resultaron relevantes para el presente estudio (Figura 2). El pozo P4 se encuentra en el Instituto Nacional del Agua, en el sector noreste de la ciudad a escasos metros de la laguna Setúbal, y el pozo P11 se encuentra en la Planta Potabilizadora de Aguas Santafesinas S.A., en el centro-este de la ciudad, ambos en la zona de circulación y descarga del acuífero hacia la laguna Setúbal. El pozo P14 se ubica en el parque del ex - Jardín

Botánico en cercanías de la divisoria de aguas subterráneas, pudiendo descargar hacia el este en laguna Setúbal como así también hacia el oeste en el valle del río Salado. El período de análisis del presente trabajo abarca 10 años, 08/2008 - 08/2018 y coincide con el período de registro de niveles de agua subterránea en los pozos de monitoreo de la red. Estos registros fueron proporcionados por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (GIG-FICH-UNL).

En la Tabla 1 se sintetiza la información disponible hidrometeorológica, hidrológica e hidrogeológica para el período mencionado, la frecuencia de medición y la fuente de información.

Los niveles de agua superficial y subterránea se referenciaron al "cero" del IGN y se realizaron gráficos de la evolución de los niveles freáticos en el tiempo y su relación con las alturas hidrométricas de los cuerpos de agua superficiales y con las precipitaciones locales. Sobre la base del análisis de estas relaciones se determinaron las fechas correspondientes con períodos de niveles de agua subterránea extremos, máximos y mínimos.

**Tabla 1. Información hidrometeorológica, hidrológica e hidrogeológica disponible**

INFORMACIÓN DISPONIBLE (Período 2008-2018)				
	REGISTRO	UBICACIÓN / IDENTIFICACIÓN	FRECUENCIA	FUENTE
LECTURA HIDROMÉTRICA	PRECIPITACIÓN	Estación hidrometeorológica FICH - UNL	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	RÍO SALADO	Estación hidrometeorológica INALI - Santo Tomé	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	RÍO SALADO	Estación hidrométrica Recreo RP 70	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	LAGUNA SETÚBAL	Estación hidrométrica Santa Fe - La Guardia	Diaria	SRH <sup>b</sup>
	LAGUNA SETÚBAL	Estación hidrométrica Puerto de Santa Fe	Diaria	PNA <sup>c</sup>
PROFUNDIDAD	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P4	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>
	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P11	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>
	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P14	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>

a Centro de Informaciones Meteorológicas; b Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación; c Prefectura Naval Argentina; d Grupo de Investigaciones Geohidrológicas - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.

Contando con los datos de niveles del agua subterránea de los 23 pozos de la red de monitoreo relevados por el GIG-FICH-UNL en la ciudad, se realizó un análisis espacial de estos niveles para las fechas seleccionadas a través de la elaboración de mapas de curvas isofreáticas utilizando el software Surfer 13 (*Golden Software LLC; 2016*). Estos mapas de curvas isofreáticas obtenidos, se integraron con las curvas de niveles topográficos de la ciudad, y se importaron en Autocad Civil 3D 2020 (*Autodesk Inc.; 2019*), bajo el sistema de coordenadas Gauss Krüger. Además, se incorporó la imagen satelital de la ciudad de Bing Maps (*Microsoft; 2019*).

En relación con la calidad química de muestras de agua subterránea de la ciudad de Santa Fe, se contó con los resultados de análisis realizados por el GIG-FICH-UNL obtenidos de muestras extraídas en los pozos de monitoreo P4 y P14 en fecha 23/02/2010, siendo los parámetros de interés del presente estudio el pH, los cloruros, los sulfatos y el magnesio, a fin de establecer si el agua subterránea de las muestras analizadas es agresiva en contacto con los materiales con que se ejecutan fundaciones, estructuras subterráneas y sus protecciones impermeables, de acuerdo a los valores de referencia de la norma (*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. CIRSOC 201, 2005*).

**Usos del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo**

**Infraestructura edilicia y vial**

Se realizó un relevamiento de campo de construcciones existentes con aprovechamiento subterráneo dentro del área de estudio, y se clasificaron por tipo, incluyendo un conjunto de edificaciones públicas e institucionales, edificaciones particulares; y construcciones de la infraestructura vial con intervención del subsuelo urbano y estaciones de servicio con depósitos de almacenamiento de combustibles subterráneos en la ciudad. También se detectaron tipologías constructivas de edificaciones en altura con usos subterráneos para cocheras y áreas de servicio.

Particularmente, la información referida a edificaciones en altura en la ciudad de Santa Fe para el período 2008-2016, se obtuvo de la Secretaria de Planeamiento Urbano de la Municipalidad de Santa Fe. SPU - MCSF (*Gobierno de la Ciudad*

*y Bolsa de Comercio de Santa Fe, 2008-2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016*). La misma fue sistematizada y analizada según la localización y cantidad de edificios en altura construidos por zonas de la ciudad, la cantidad de subsuelos construidos para cocheras y servicios. Esta información es considerada útil a fin de observar la tendencia del mercado de la construcción en la ciudad, y de identificar aquellas zonas de crecimiento edilicio en altura, para lo cual mediante tareas de campo y de gabinete se hizo un reconocimiento de las áreas de mayor densificación urbana, relacionando las mismas con las áreas de desarrollo urbano que habilita el R.O.U. (*Reglamento de Ordenamiento Urbano. Ordenanza N° 11.748, 2011*). El abordaje del estudio se realizó partiendo del área urbana de la ciudad, avanzando luego hacia un área de interés específico, dentro de la cual se seleccionó un sector para profundizar en mayor detalle el análisis (Figura 4).

**Infraestructura de redes subterráneas de servicios**

Se contó con información de las trazas principales y secundarias de la red de la infraestructura de servicios de agua potable y cloacas. Además, la Empresa Aguas Santafesinas S.A., prestataria de los servicios en la ciudad, ha suministrado información de traza, profundidad y características de ambas redes sobre un sector de la ciudad con alta consolidación y demanda de servicios: el Corredor Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez, a lo largo del cual se alojan las redes maestras de la ciudad.

También se contó con información de cuencas y subcuencas de aporte del Plan Director de Desagües Pluviales (*Municipalidad de Santa Fe - INA, 2000*) y de trazas principales de la red de drenaje pluvial de la ciudad con su posición georreferenciada, diámetros, secciones y profundidades, y el conjunto de obras de drenajes pluviales existentes, proyectadas y en ejecución.

A su vez, se recopilaron para este estudio, desde el año 2015 en adelante, registros publicados en medios de comunicación locales, especialmente en Diario El Litoral y Diario Uno de Santa Fe, relacionados con casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales, y de colapso de las redes de la infraestructura de servicios, todos ubicados dentro del área de estudio.

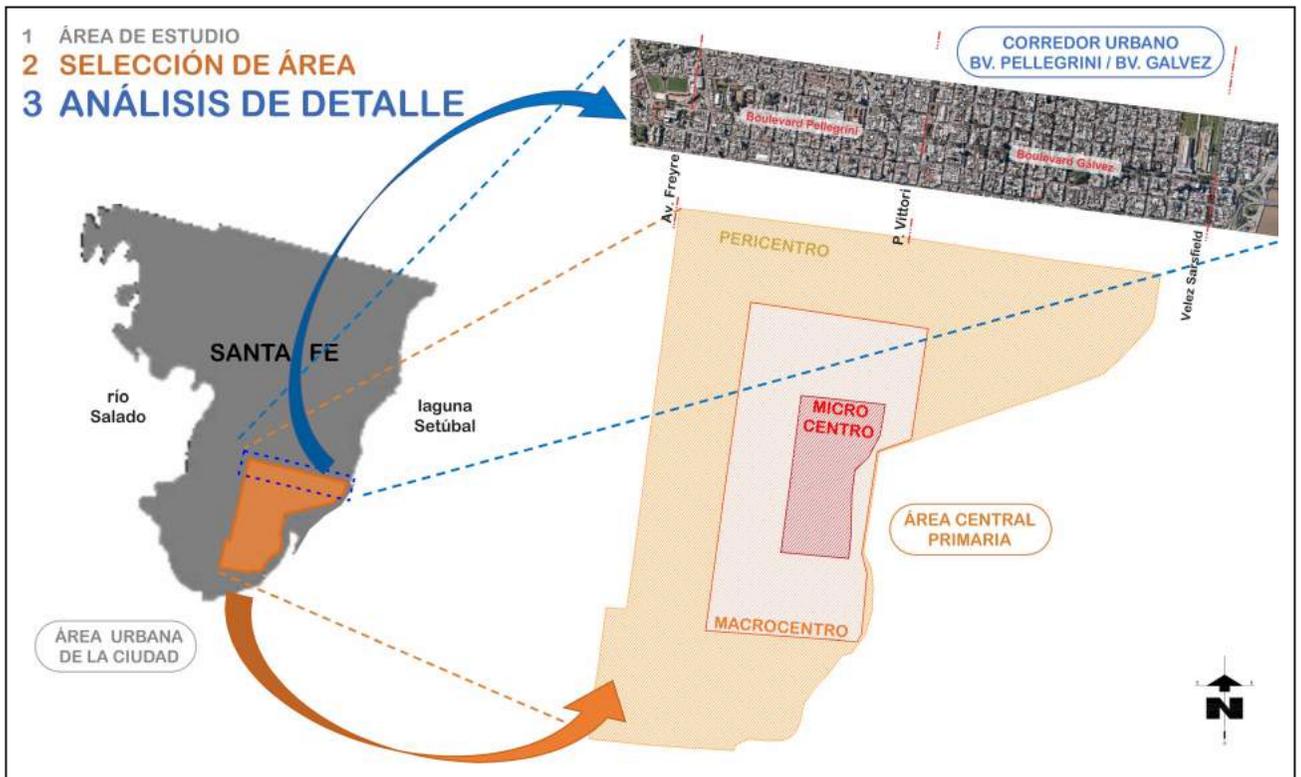


Figura 4. Criterio de abordaje del estudio.

Todos los datos del relevamiento de campo realizado (infraestructura edilicia, vial y de redes subterráneas de servicios, y registros de casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales, y de colapso de las redes de la infraestructura de servicios) se ingresaron en un sistema de información geográfica mediante la utilización del software ArcGIS Desktop 10.5 (Esri Inc.; 2016). Con el objeto de que toda la información ingresada se relacione con el entorno urbano de la ciudad, se utilizó información complementaria (metadatos) de manzanos, parcelas, calles, cursos de agua superficial de la ciudad de Santa Fe proporcionados por IDESF e IPEC, bajo el mismo sistema de coordenadas de Gauss Krüger / WGS84 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de las características hidrogeológicas del área de estudio

Para el período 08/2008-08/2018, en la ciudad de Santa Fe se registró una precipitación media anual de 1476mm. En dicho período, los años 2009, 2015 y 2016 se consideraron húmedos con precipitaciones anuales de 1211, 1239 y 1495mm respectivamente, el año 2008 fue un año seco con una precipitación anual de 670mm (Figura 5), mientras que el resto de los años se consideraron típicos, teniendo en cuenta la determinación de años secos, húmedos y típicos realizados por *Paoliano (2008)* para el período 1901-2007 en la ciudad de Santa Fe. Los meses de verano y otoño presentan los mayores registros de precipitación media mensual (entre 100 y 200mm), mientras que los meses correspondientes a invierno y primavera son de menor precipitación (entre 22 y 60mm) (Figura 6). Desde noviembre del año 2015 hasta mayo de 2016, se presentó en el área de la ciudad de Santa

Fe un período lluvioso con montos de precipitación del orden de los 1125mm (Lanzaro, 2020).

Del análisis de fluctuaciones de los niveles freáticos, se evidenció un comportamiento similar en los pozos de monitoreo P4, P11, P14 durante el período analizado. La Figura 7 muestra las fluctuaciones de los niveles freáticos referidos a cota en relación con las precipitaciones diarias. Se observa que los niveles de agua subterránea ascienden luego de eventos de precipitación, es decir, que el sistema responde ante la llegada del agua de lluvia. Se infiere que la respuesta es rápida, ya que en los días siguientes a la lluvia se manifiesta el ascenso de los niveles del agua subterránea, los cuales se registraron principalmente en verano y otoño (enero a mayo). La profundidad del nivel freático varió desde 1,70m desde el nivel de terreno, hasta aproximadamente 8m.

De acuerdo con las investigaciones existentes, la zona de recarga del acuífero se encontraría en el norte de la ciudad donde se registran los mayores niveles freáticos, y la dirección del escurrimiento subterráneo es hacia el sur, oeste y este, donde se encuentran los cuerpos de agua superficiales que son considerados zonas de descarga. Esta situación, no obstante, podría invertirse en épocas de crecidas de los ríos Salado y/o Paraná. Los pozos P4 y P11 se sitúan al este de la divisoria de aguas subterráneas, y el P14 se encuentra en una zona muy cercana a dicha divisoria de aguas.

La evolución en el tiempo de los niveles freáticos de los pozos de monitoreo P4 y P11, en relación con la altura hidrométrica de la laguna Setúbal (Figura 8) indican que el acuífero, durante todo el período analizado, descarga hacia la laguna Setúbal que se comporta como efluente.

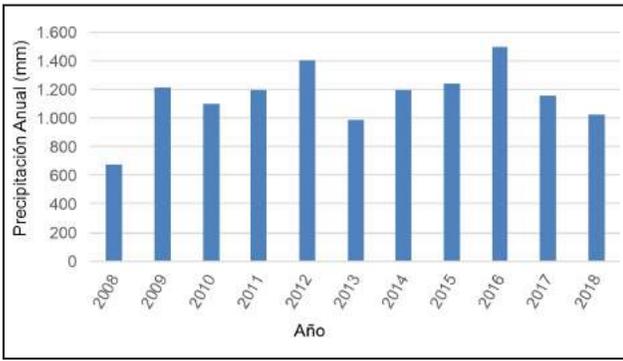


Figura 5. Precipitación Total Anual período 08/2008 - 08/2018.

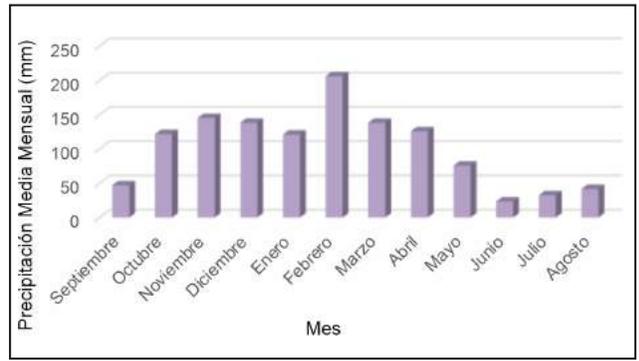


Figura 6. Precipitación Media Mensual período 08/2008 - 08/2018.

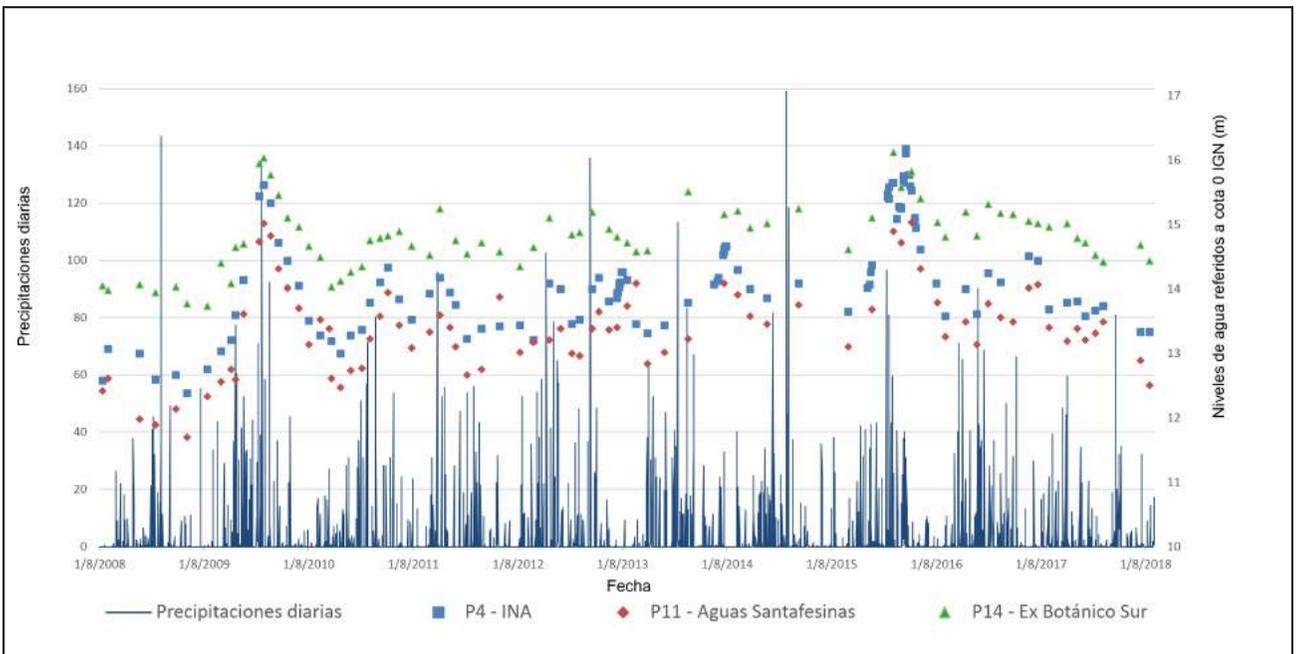


Figura 7. Evolución niveles de agua subterránea vs precipitaciones período 08/2008 - 08/2018.

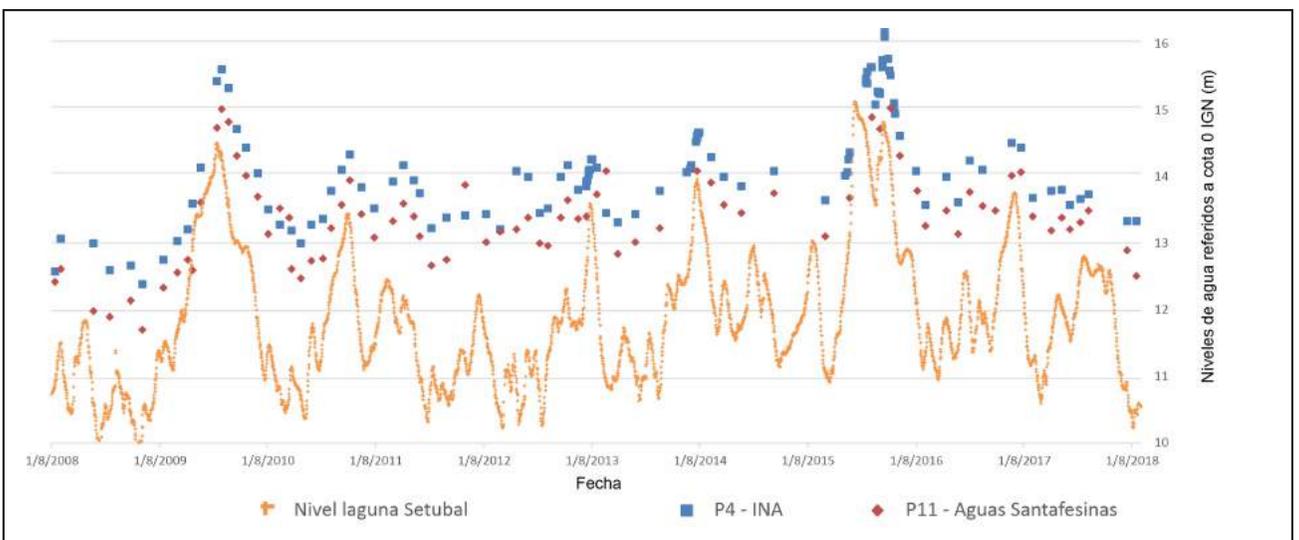


Figura 8. Niveles de agua subterránea vs niveles laguna Setúbal período 08/2008 - 08/2018.

En los años 2010, 2011, 2013, 2014 se registraron alturas hidrométricas en la estación Santa Fe-La Guardia cercanas al nivel de emergencia. En el año 2016 la lectura hidrométrica de la laguna sobrepasó el valor de evacuación de 5,70m (13,98m referido a cota), registrando una altura hidrométrica de 15,13m en el mes de enero y de 14,83m en el mes de abril (Figura 8), en coincidencia con el periodo lluvioso 11/2015-05/2016. Se registraron las menores alturas hidrométricas de todo el período en enero y mayo de 2009 con 9,89m y 9,79m respectivamente, y recientemente en agosto de 2018 con una altura hidrométrica de 10,23m.

El pozo de monitoreo P14, ubicado cercanías de la divisoria de aguas subterráneas, se analiza conjuntamente con la evolución de las alturas hidrométricas del río Salado en la estación INALI-Santo Tomé y de la laguna Setúbal en la estación Santa Fe-La Guardia, observándose un comportamiento similar (Figura 9).

Las mayores alturas hidrométricas se registraron en febrero de 2010 alcanzando 14,11m, 14,68m en enero de 2016 y 14,51m en abril de 2016. El menor registro de todo el período fue en enero y mayo de 2009 con una altura hidrométrica de 9,94m y 9,82m respectivamente; otro período de registros bajos fue octubre de 2012 con 10,09m y recientemente en agosto de 2018 con 10,33m.

Del análisis de los niveles freáticos referidos a cota, *se identificaron períodos de niveles freáticos extremos*, máximos y mínimos (Lanzaro, 2020).

En el período de marzo, abril y mayo de 2016, se registraron los valores máximos de todo el período analizado para los 3 pozos de monitoreo, P4, P11 y P14 (16,17m, 15,04m y 16,12m referidos a cota, respectivamente). Se presentó un período muy lluvioso en febrero-abril de 2016 con 728mm de agua precipitada, y una precipitación anual para el año 2016 de 1495mm que resultó la más alta de todo el período analizado. También se registraron crecidas de los ríos Salado y Paraná que se mantuvieron por un período de 5 meses (enero a mayo) por encima de los niveles de alerta.

Durante los meses de febrero, junio y agosto de 2009, se observaron los niveles de agua subterránea más bajos de todo el período de análisis para los 3 pozos de monitoreo P4, P11 y

P14 (12,39m, 11,69m y 13,74m referidos a cota, respectivamente). Se registraron escasas precipitaciones durante ese período y en los meses previos. El río Salado y la laguna Setúbal presentaron los registros de niveles más bajos del período (9,82m y 9,79m referidos a cota, respectivamente). Recientemente, en agosto de 2018, se observaron niveles freáticos bajos en los 3 pozos de monitoreo, con una situación general previa similar a la del año 2009.

Las fluctuaciones extremas resultaron: P4: 3,78m; P11: 3,35m; y P14: 2,38m.

A partir del estudio de la evolución de los niveles freáticos en los pozos de monitoreo P4, P11 y P14, para el período 08/2008 - 08/2018, se analizó la piezometría en el área de estudio en situaciones extremas seleccionando dos fechas: 03/03/2016 (estado de niveles del agua subterránea máximo), y 17/08/2018 (estado de niveles del agua subterránea mínimo). Con la información de niveles freáticos en los pozos de monitoreo en estas dos fechas, se trazaron las curvas isofreáticas máximas (Figura 10) y las curvas isofreáticas mínimas (Figura 11) para la ciudad de Santa Fe, con una equidistancia de 0,50m.

En ambos casos se observa una configuración de curvas piezométricas similar y se corrobora la existencia de la divisoria de aguas subterráneas en el centro de la ciudad con dirección norte-sur que divide el flujo hacia la laguna Setúbal al este y hacia el río Salado al oeste. Los mayores valores de niveles freáticos se presentan en el centro-norte, indicando la presencia de una zona de recarga. En la situación de niveles freáticos mínimos (Figura 11), la separación de curvas es menor indicando mayores gradientes hidráulicos y mayor velocidad del flujo hacia la zona de descarga.

En relación con la calidad química de muestras de agua subterránea de la ciudad de Santa Fe, se observa que la concentración de sulfatos y magnesio, y el pH obtenidos de las muestras de agua extraídas en los pozos de monitoreo P4 y P14 en fecha 23/02/2010, se encuentran fuera de los rangos de niveles de agresividad definidos por la norma CIRSOC 201, 2005 (Tabla 2.3 de la norma), resultando inferiores respecto al nivel moderado de agresividad, el mínimo previsto (Tabla 2).

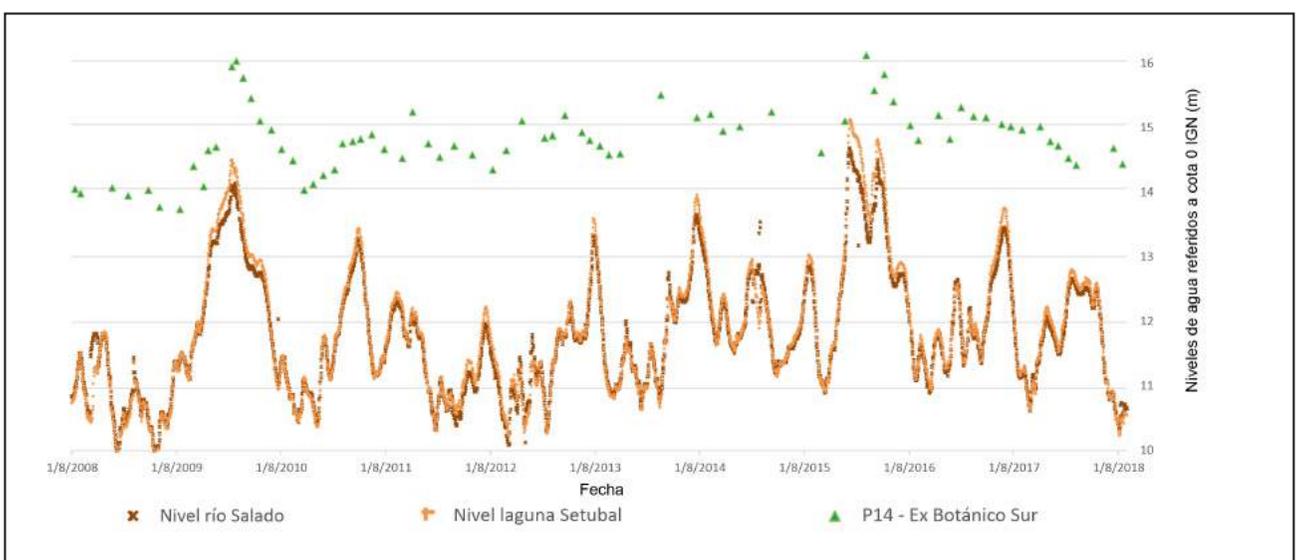


Figura 9. Niveles agua subterránea vs niveles río Salado y laguna Setúbal 08/2008 - 08/2018.

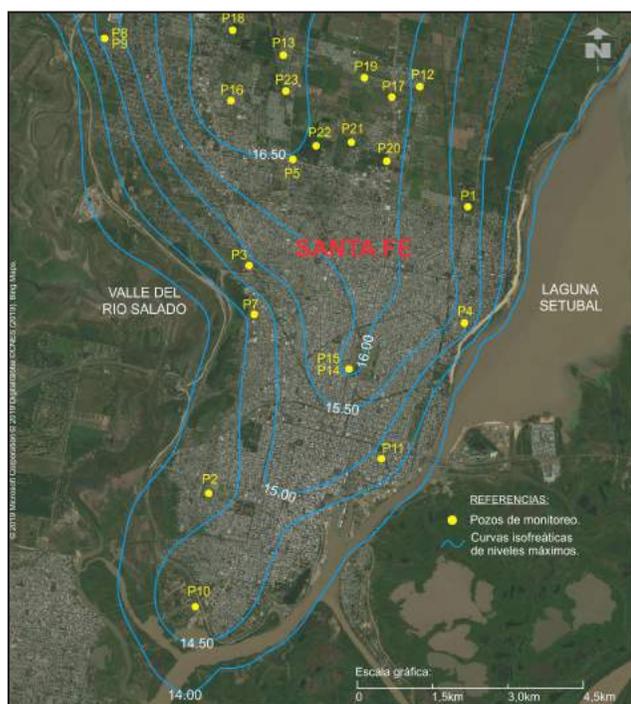


Figura 10. Curvas isofreáticas máximas 03/03/2016.

Figura 11. Curvas isofreáticas mínimas 17/08/2018.

Tabla 2. Comparación de parámetros químicos del agua subterránea

Parámetros	Análisis químicos agua subterránea (23-02-2010) GIG		Valores guía CIRSOC 201, 2005		
	Pozo de Monitoreo		Rangos límite		
	P4	P14	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte
pH	7,60	7,66	6,5 a 5,5	5,5 a 4,5	> a 4,5
Sulfatos (mg/L)	50,80	40,20	150 a 1.500	1.500 a 10.000	< de 10.000
Magnesio (mg/L)	29,30	20,60	300 a 1.000	1.000 a 3.000	< de 3.000

### Análisis del uso del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo

Del análisis del relevamiento realizado (Lanzaro, 2020) se constató que:

- Existe un predominio de edificaciones (79,12%) sobre el resto de las construcciones con aprovechamiento subterráneo. Las edificaciones públicas-institucionales representan el 52,78% y las particulares o privadas el 47,22%.
- Las tipologías de edificaciones en altura, representan solo el 10,53% del total de edificaciones públicas-institucionales. En cambio, existe un alto porcentaje (82,35%) de edificaciones en altura en el caso de edificaciones particulares con aprovechamiento subterráneo relevadas. De ese total de edificios en altura (82,35%), el 28,57% de los mismos se terminaron de construir en los últimos 5 años y en la actualidad existe un 42,86% en ejecución, esto habla de un proceso afianzado desde hace aproximadamente una década y con una perspectiva creciente hacia el futuro.

- Existen edificaciones con aprovechamiento subterráneo con patologías edilicias relacionadas con el ingreso de agua subterránea por filtraciones, alcanzando el 55,26% de edificaciones públicas-institucionales y el 41,18% de las de edificaciones particulares.
- Dentro del área de interés específico denominada en la normativa urbana como área central primaria (microcentro, macrocentro y pericentro), sector más consolidado, densificado y con alta demanda de servicios de la ciudad, se constató que la mayor concentración de construcciones con aprovechamiento subterráneo relevadas y registro de casos informados se ubican en el pericentro, superando el 50% en todos los casos: 55% de estaciones de servicios; 50% de edificios en altura; y 56,76% de casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales y de rotura de redes, más un 21,62% en las adyacencias.
- Sobre el sector seleccionado para mayor detalle en el análisis, denominado Corredor Urbano Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez, eje especializado de tipo residencial, comercial jerarquizado, y con alto valor patrimonial y

paisajístico-ambiental, ubicado en el centro de la ciudad, de 25 cuadras de extensión con sentido este-oeste, se constató que los índices de edificabilidad: factor de ocupación del suelo (F.O.S.) y factor de ocupación total (F.O.T.) determinados por la normativa urbana (ROU) son los más elevados de toda la ciudad y han propiciado la densificación urbana dando lugar a un importante proceso de sustitución edilicia.

### Integración de los resultados

Se realizó la integración de resultados de los aspectos hidrogeológicos del área de estudio con los usos del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo, considerando conjuntamente los mapas de curvas isofreáticas máximas y mínimas obtenidos (Figuras 10 y 11), el mapa de curvas de niveles topográficos de la ciudad de Santa Fe y el corredor urbano seleccionado (Figuras 12 y 13).

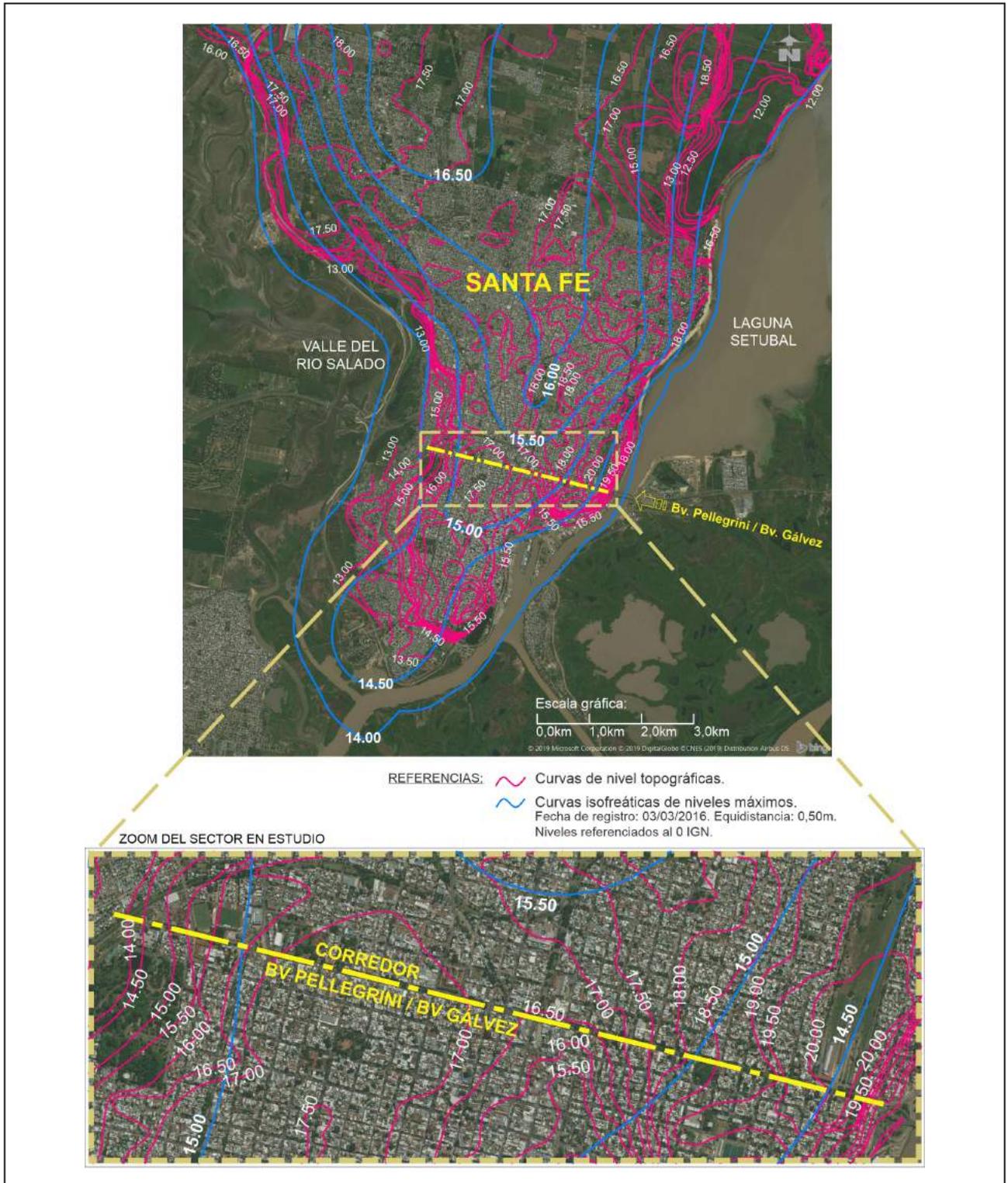


Figura 12. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez sobre curvas isofreáticas máximas y curvas de nivel topográfico.

Con esta información espacial se generó un perfil longitudinal oeste-este de esta área de detalle, en el que se incluyeron niveles topográficos y niveles freáticos máximos y mínimos (Figura 14).

A lo largo del corredor se localizan cinco Estaciones de Servicio que poseen sus depósitos subterráneos de combustibles y numerosos edificios en altura. En la mano norte del corredor se han constatado 22 edificios en altura, 2 de ellos en ejecución,

y sobre la mano sur existen 26 edificios en altura, 8 de ellos en ejecución; alcanzando un total de 48 edificios.

También en este corredor, a partir del año 2014 se han registrado, de manera cada vez más frecuente, socavones de gran magnitud resultado del colapso y fugas en las redes de infraestructura de servicios de la ciudad que silenciosamente han provocado el arrastre de partículas finas de suelo dando lugar a socavones y hundimientos en calzadas y veredas.

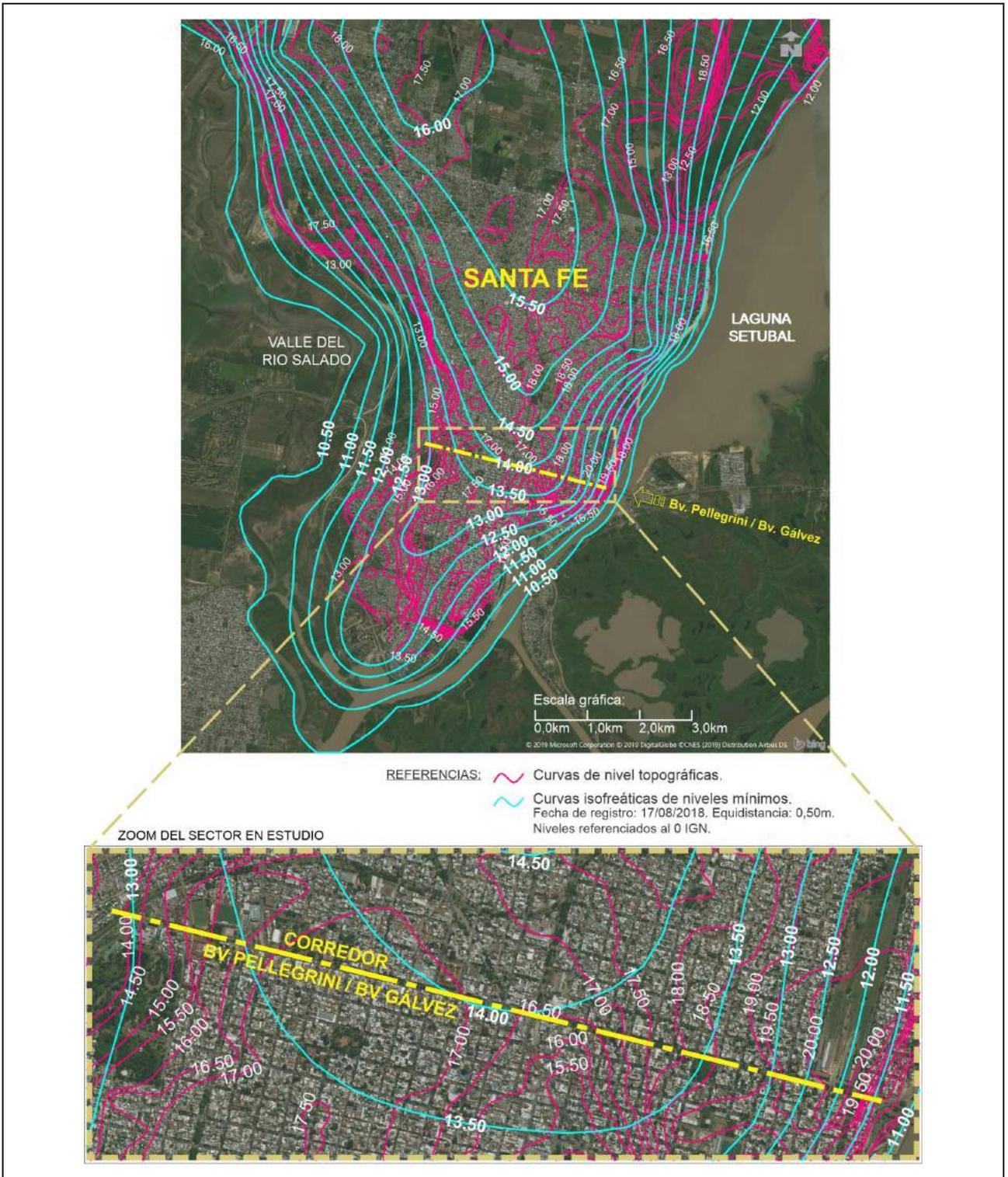


Figura 13. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez sobre curvas isofreáticas mínimas y curvas de nivel topográfico



Figura 14. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez. Corte longitudinal. Niveles topográficos y niveles freáticos extremos (máximos: 03/03/2016 y mínimos: 17/08/2018).

Completando el análisis espacial, se ubicaron sobre el Corredor Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez dos secciones o cortes transversales, los cuales se posicionaron en el corte longitudinal (Figura 14). Uno hacia el extremo este de Bv. Gálvez, próximo a la laguna Setúbal, denominado Corte 1-1 (Figura 15); y el otro hacia la zona media del corredor sobre Bv. Pellegrini, denominado Corte 2-2 (Figura 16).

En ambos cortes transversales se posicionaron las redes de la infraestructura de servicios de agua potable, cloacas y drenaje pluvial de la ciudad, con sus diámetros, secciones y profundidades. Asimismo, se plasmó el volumen y profundidad de fundaciones y recintos subterráneos de los edificios en altura existentes con el objetivo de ilustrar la magnitud de interferencias alojadas en el subsuelo urbano que resultan invisibles desde la superficie. A partir de la información generada en la Figura 14 con el perfil longitudinal del corredor, se obtuvo para cada corte transversal el rango de las fluctuaciones de los niveles del agua subterránea del período de análisis (08/2008 - 08/2018) en las fechas determinadas de períodos extremos máximos y mínimos (03/03/2016 y 17/08/2018, respectivamente) y los niveles topográficos. El posicionamiento de la información mencionada se visualiza para el Corte 1-1 en la Figura 17, y para el Corte 2-2 en la Figura 18 (Lanzaro, 2020).

En el Corte 1-1, se detectó un rango de fluctuación del agua subterránea de 2,05m, con niveles máximos a -2,05m de profundidad, y niveles mínimos a -7,20m de profundidad, desde el nivel 0,00m en vereda. El sector se encuentra a escasos 300m de la zona de descarga del agua subterránea con pendiente de escurrimiento hacia la laguna Setúbal. Los niveles topográficos del sector son de +19,75m referidos a cota IGN, siendo uno de los sectores más altos de la ciudad por ser una zona contigua a la Estación y vías del FFCC Belgrano. La cañería maestra de cloacas de la ciudad, alojada a lo largo del boulevard, bajo el cantero central, de gran diámetro (1700mm) se encuentra a una profundidad de -8,05m desde el nivel de vereda; también en este tramo se ubican caños de la red de agua potable de 300 y 400mm de diámetro y otras cañerías de menor sección pertenecientes a conexiones de colectores cloacales domiciliarios. Se observó que en su mayor parte las redes se encuentran alojadas dentro de los estratos no saturados de suelo, a excepción de la cloaca máxima que se encuentra en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Los recintos subterráneos como la sala de máquinas, foso de ascensores, retardador pluvial, cisterna de incendio y elevador mecánico de vehículos del Edificio de Bv. Gálvez 1033, se encuentran por encima del suelo saturado, sin contacto directo con el agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, con probabilidad de ascenso de humedad por capilaridad (Lanzaro, 2020).

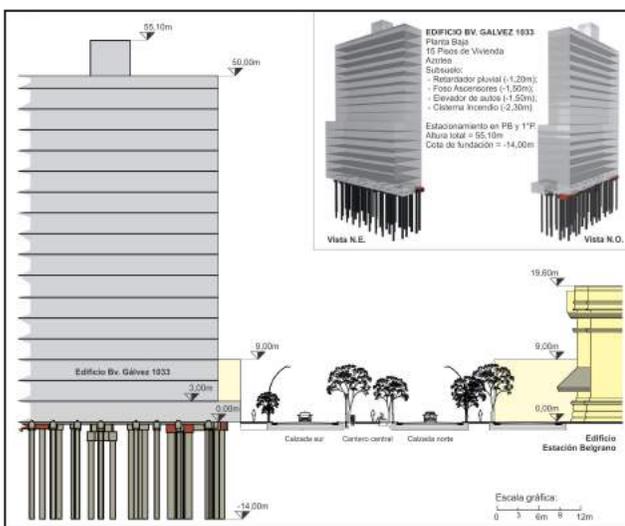


Figura 15. Corte transversal 1-1. Boulevard Gálvez al 1000

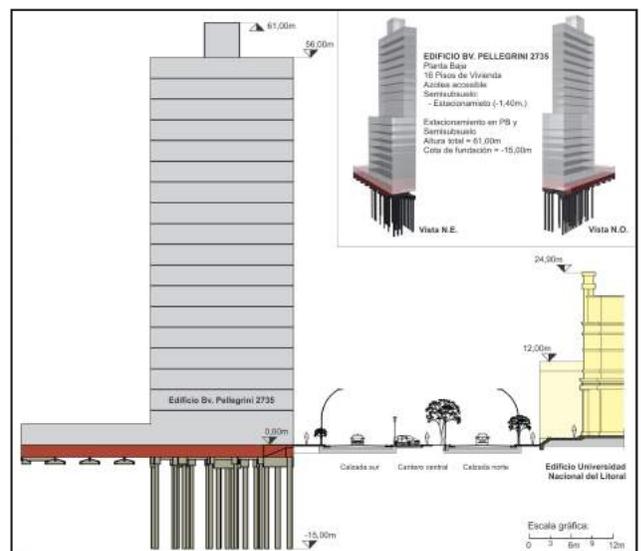


Figura 16. Corte transversal 2-2. Boulevard Pellegrini al 2700

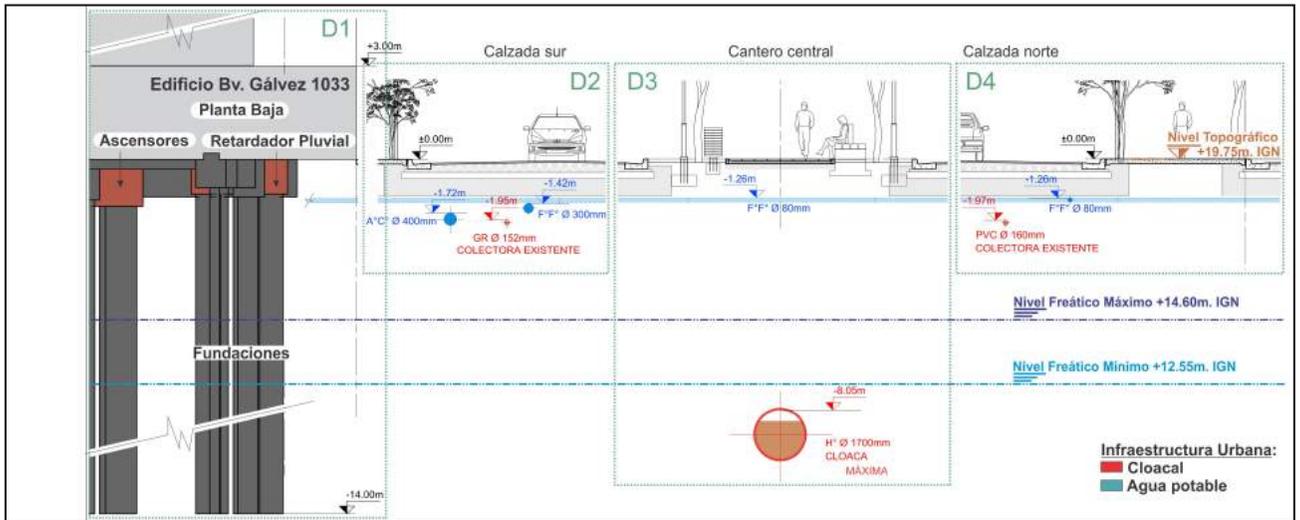


Figura 17. Fluctuaciones extremas de niveles del agua subterránea en el período 08/2008 - 08/2018, en Corte 1-1.

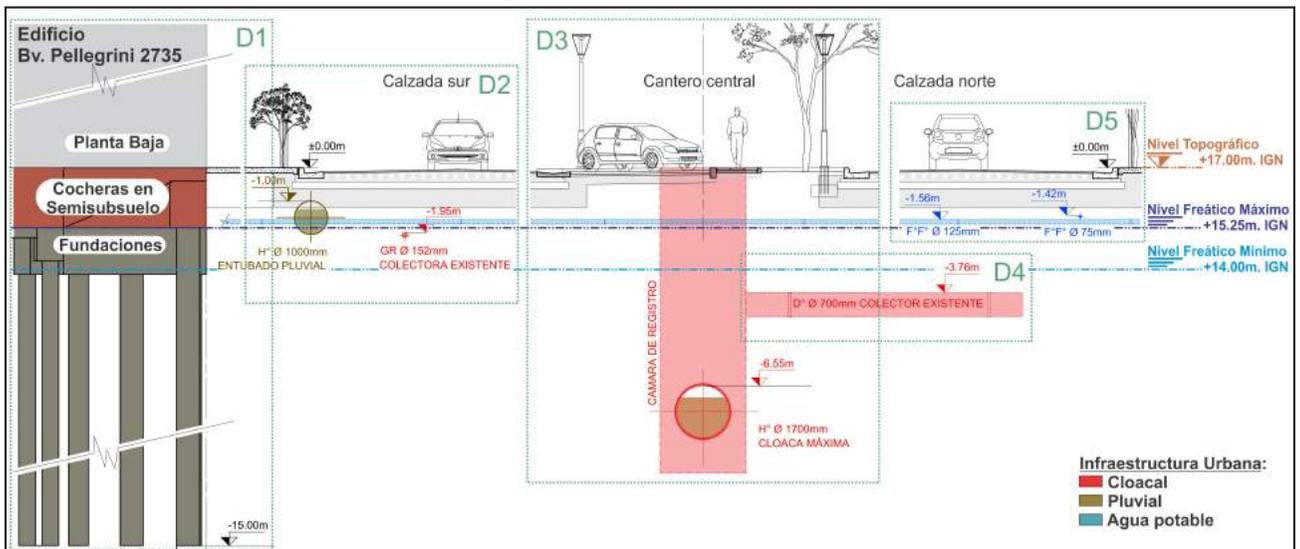


Figura 18. Fluctuaciones extremas de niveles del agua subterránea en el período 08/2008 - 08/2018, en Corte 2-2.

En el Corte 2-2, se detectó un rango de fluctuación del agua subterránea de 1,50m, con niveles máximos a -1,75m de profundidad, y niveles mínimos a -3,00m de profundidad desde el nivel 0,00m en vereda. El sector se encuentra próximo a la divisoria del escurrimiento de agua subterránea, hacia el oeste (río Salado) y hacia el este (laguna Setúbal). Los niveles topográficos del sector son de +17,00m referidos a cota IGN. La cañería maestra de cloacas de la ciudad, alojada a lo largo del boulevard, bajo el cantero central, de gran diámetro (1700mm) se ubica a una profundidad de -6,55m desde el nivel de vereda, también existe una cámara de registro que recibe un caño colector cloacal de 700mm de diámetro que vuelca en la cloaca máxima, un caño entubado pluvial de 1000mm de diámetro; y otras cañerías de menor sección pertenecientes a conexiones de colectores cloacales domiciliarios. Se observó que gran parte de las cañerías se encuentran alojadas en estratos de suelo en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Además, los recintos subterráneos como las cocheras del Edificio de Bv. Pellegrini

2735 se encuentran en contacto con agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, lo cual da lugar a una acción de subpresión que ejerce el agua bajo la platea de fundación del recinto, y posibles empujes laterales si los niveles freáticos superaran el fondo del recinto, humedad ascendente por capilaridad, riesgos de infiltración de agua en el interior, etc. A su vez, en período de niveles freáticos altos, la cañería de la red pluvial podría correr riesgo de flotación, especialmente en momentos en donde no se transportan fluidos (Lanzaro, 2020).

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos permitieron establecer relaciones entre el sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe y las construcciones subterráneas existentes.

Como se expuso anteriormente, la ciudad de Santa Fe se ve afectada por los regímenes del río Salado y del sistema río Paraná - laguna Setúbal y por una alternancia de períodos

lluviosos y secos. Ante estos eventos se observó que el sistema hídrico subterráneo reacciona elevando los niveles de agua subterránea, pudiendo alcanzar niveles próximos a la superficie del terreno y estar en contacto con redes de la infraestructura urbana de servicios y las estructuras y recintos subterráneos, o disminuyendo sus niveles. A lo largo de los 10 años del período analizado (08/2008 - 08/2018), se ha observado que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70m y aproximadamente 8m desde el nivel del terreno y que las fluctuaciones de los niveles freáticos variaron entre 2,40 y 3,80m en los pozos censados, y entre 1,25 a 2,00m en las secciones urbanas estudiadas. Además, se observó que el agua subterránea es principalmente de tipo bicarbonatada cálcica. Cabe destacar que estas observaciones fueron posibles debido a la existencia de una red de monitoreo del agua subterránea en la ciudad que lleva más de 10 años de operación.

Por otra parte, el relevamiento edilicio realizado permitió constatar la existencia de numerosas construcciones con aprovechamiento subterráneo, especialmente bajo la tipología de edificios en altura, resultado de la alta rentabilidad de emprendimientos privados, y de los incentivos de la normativa urbana propiciando la alta densidad mediante el incremento de los indicadores urbanísticos de edificabilidad. Particularmente, en el área de detalle estudiada se observó un entramado de interferencias en el subsuelo urbano, formado por recintos subterráneos, fundaciones y la infraestructura de redes subterráneas de servicios que ante niveles freáticos altos podrían estar expuestos a presión hidrostática lateral o de subpresión, con deterioro de materiales, filtración en los recintos, etc.; y ante el descenso de niveles freáticos, con posibilidad de asentamientos diferenciales de terreno y hundimientos que dañan edificios, calles, estructuras superficiales y redes subterráneas.

De hecho, la existencia de numerosas edificaciones afectadas con patologías edilicias relacionadas con el ingreso de agua subterránea por filtraciones permitió inferir que las obras se ejecutaron sin integrar al proyecto la consideración de las variaciones de los niveles freáticos ni las previsiones relacionadas con la seguridad, durabilidad y funcionalidad requerida para las obras.

Es de destacar que los valores de pH y las concentraciones de sulfatos, cloruros y magnesio de las muestras de agua subterránea analizadas se encuentran fuera de los rangos de agresividad definidos por la norma CIRSOC 201/2005, lo que indica que las estructuras y protecciones impermeables no estarían en contacto con aguas agresivas.

De lo anteriormente expuesto, surge que las interacciones entre los sistemas acuíferos y las construcciones subterráneas en el subsuelo urbano son complejas y demandan regulación por parte del Estado en todas sus jurisdicciones. Esta regulación debería contemplar lineamientos técnicos y normativos que consideren el conocimiento de las variaciones de los niveles de agua subterránea y de sus características químicas en el tiempo, el uso actual del espacio subterráneo, datos geotécnicos, entre otros.

Así, le correspondería al Estado propiciar la implementación y sostenimiento de redes de monitoreo de agua subterránea, la creación de una base de datos geotécnicos, el inventario del uso actual del espacio subterráneo, así como la sistematización de toda esta información en un sistema de información geográfica y su actualización permanente, para contar con una aproximación completa y real del proceso de urbanización de la ciudad que esté disponible a organismos estatales y privados, a expertos e investigadores para consulta y estudio, sin sustituir la obligatoriedad de realizar tales estudios en el sitio en que se ejecute una obra.

Por otra parte, el ejecutor o desarrollador de la obra debería hacer efectiva la aplicación de buenas prácticas contractuales para la ejecución de las mismas. Estas buenas prácticas deberían incluir diagnósticos preliminares, estudios de línea de base, y de prefactibilidad que aporten información útil relacionada con la estabilidad mecánica para el diseño de fundaciones y estructuras subterráneas, para la selección de las técnicas de excavación y para el dimensionamiento de los elementos resistentes frente situaciones permanentes y temporales; y considerar en la investigación geotécnica, la determinación del rango de fluctuaciones de los niveles del agua subterránea en el tiempo y sus características químicas. Todos estos aspectos, de gran importancia en cuanto a la seguridad de los trabajos, durabilidad y funcionalidad de la obra, permitirían anticipar y evitar desprendimientos y/o inundaciones, seleccionar los materiales apropiados al entorno hidrogeológico y los sistemas de impermeabilización a disponer en la obra, y proveer el nivel de habitabilidad o de estanqueidad requerido para cada tipo de recinto subterráneo.

Finalmente, se resalta que es necesario que el Estado implemente estrategias de gestión en el ámbito urbano y las mismas sean encaradas por equipos interdisciplinarios, tanto en la instancia de conocimiento como para la formulación de políticas y definición de acciones concretas, avanzando hacia la formulación de un plan de gestión integral (hídrico-urbano-ambiental) que sea sostenible en el tiempo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AMBROSINO, S., BARBEITO, O., BERTONI, J. C., DANIELE, A., MAZA, J. A., PAOLI, C. U., & SERRA, J. J. (2004). Inundaciones Urbanas en Argentina (Primera ed.). (J. C. Bertoni, Ed.) Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- CASAROTTO, J. (02 DE SEPTIEMBRE DE 2015). Grietas y hundimientos en viviendas y calles: algunas hipótesis bajo análisis. Santa Fe. Obtenido de [www.ellitoral.com/index.php/id\\_um/118767](http://www.ellitoral.com/index.php/id_um/118767)
- CUSTODIO, E. (2004). Hidrogeología urbana: Una nueva rama de la ciencia hidrogeológica. *Boletín Geológico y Minero, 115, Número Especial, 283-288.*
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. (1983). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega.

- D'ELIA, M. P., PARIS, M., PÉREZ, M., TUJCHNEIDER, O., PUSINERI, G., PAGLIANO, M. L., & GUALINI, S. (2008). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas en situaciones de riesgo hídrico en la ciudad de Santa Fe, Argentina. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Primera Fase. Cartagena de Indias.*
- D'ELIA, M. P., PARIS, M., TUJCHNEIDER, O., PÉREZ, M., PAGLIANO, M. L., GUALINI, S., & FEDELE, A. L. (2011). Agua subterránea en áreas urbanas. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrogeología Subterránea. Captación y Modelación de Agua Subterránea, (págs. 46-53). Salta.*
- DÁVILA PORCEL, R. A., & DE LEÓN GÓMEZ, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana: ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 463-477.*
- FOSTER, S., LAWRENCE, A., & MORRIS, B. (1998). Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano. Evaluación de necesidades de gestión y formulación de estrategias. *Documento técnico N° 390. Washington D.C.: Banco Mundial.*
- GOBIERNO DE LA CIUDAD DE SANTA FE. (2016). Santa Fe Resiliente. Evaluación preliminar de resiliencia. *Santa Fe: Secretaría de comunicación y desarrollo estratégico MCSF.*
- GOBIERNO DE LA CIUDAD Y BOLSA DE COMERCIO DE SANTA FE. (2008-2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016). SANTA FE, Cómo Vamos. *Santa Fe: Comunicación institucional MCSF.*
- GÓMEZ OREA, D. (2008). Ordenación territorial. *Madrid: Mundi-Prensa.*
- INDEC - IPEC. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda.
- LANZARO, M. V. (2020). El agua subterránea como condicionante ambiental de construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe.*
- LERNER, D. N. (1997). Too much or too little: Recharge in urban areas. *En Chilton et al., Groundwater in the Urban Environment: Volume 1: Problems, processes and management. Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 41-48). Nottingham: Balkema.*
- LINCOLN INSTITUTE OF LAND POLICY. (2007). Perspectivas urbanas. Temas críticos en políticas de suelo en América Latina. (M. O. Mullahy, Ed.) Cambridge, Massachusetts, EEUU. *Obtenido de <https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/perspectivas-urbanas-book-full.pdf>*
- MUNICIPALIDAD DE SANTA FE - INA. (2000). Plan Director de Desagües Pluviales. *Santa Fe.*
- PAGLIANO, M. L. (2008). Evaluación de las posibilidades de recarga en áreas urbanas. *XII Encuentro de Jóvenes Investigadores de la UNL. III Encuentro de Jóvenes Investigadores de Universidades de Santa Fe. Santa Fe.*
- REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN. CIRSOC 201. (2005). Buenos Aires, Argentina. *Obtenido de <https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/201/reglamento/reglamento201completo.pdf>*
- REGLAMENTO DE ORDENAMIENTO URBANO. ORDENANZA N° 11.748. (2011). Santa Fe. *Obtenido de [http://www.santafeciudad.gov.ar/media/files/ordenanza\\_11748.pdf](http://www.santafeciudad.gov.ar/media/files/ordenanza_11748.pdf)*
- SHANAHAN, P. (2009). Groundwater in the urban environment. *En L. A. Baker, The water environment of cities (págs. 29-48). Cambridge: Springer Science+Business Media.*
- SUÁREZ-BURGOA, L. (2009). Obras subterráneas en conurbaciones. Soluciones debajo de la superficie para problemas en la superficie. *Revista de Arquitectura Universidad Católica de Colombia, 11, 97-107.*
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., SÁNCHEZ-VILA, X., & CARRERA, J. (2005). Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal 13, 522-533.*





## Mapa estratigráfico con fines geotécnicos de la ciudad de Córdoba

## Stratigraphic map for geotechnical purposes of Córdoba city

Clariá, Juan José <sup>1</sup> ✉ - Rouzaut, Sabrina <sup>2</sup> - Ares, Mauricio <sup>2</sup> - Eveling, Pablo <sup>2</sup>

Recibido: 08 de abril de 2021 • Aceptado: 14 de mayo de 2021

### Resumen

*Los datos aportados por los mapas geotécnicos permiten optimizar la planificación y uso del territorio con fines de creación y mantenimiento de infraestructura civil. La información provista por dichos mapas permite tanto la evaluación del comportamiento de las construcciones, como la predicción y previsión de posibles inconvenientes de carácter geológico y / o geotécnico. Este trabajo presenta un Mapa Geotécnico de la ciudad de Córdoba construido a partir de la carga de aproximadamente 900 perforaciones exploratorias realizadas por los autores, y tomando como base el mapa desarrollado por Rocca et al., (1995), el cual fue elaborado a partir de un análisis geológico y geomorfológico de la ciudad. El mapa confeccionado aquí, amplía el área abarcada por la Carta de Rocca et al (1995) y se orienta a la definición de la profundidad de fundación más que a la predicción de asentamientos por colapso. Se ilustran datos litológicos y resistencia a la penetración en el ensayo de hincas dinámicas con cono Súper Pesado (DPSH, Dynamic Probing Super Heavy). Se presenta un mapa de profundidad de rechazo en la hincas DPSH. El análisis geoestadístico predictivo y la interpolación de los datos de las perforaciones necesarios para la confección del mapa se realizaron en un Sistema de Información Geográfica. Los resultados de la interpolación hecha por el software se muestran en una interfaz gráfica a color en 2D y 3D de muy simple lectura e interpretación.*

**Palabras clave:** mapa geotécnico, Córdoba, GIS, estratigrafía, suelos.

### Abstract

*The data provided by geotechnical maps allow to optimize the planning and usage of the territory for civil infrastructure construction and maintenance. The information supplied by these maps, permit the evaluation of structures behavior, as well as the prediction and prevention of possible geological and / or geotechnical problems. This work presents a Geotechnical Map of the city of Córdoba built from the load of approximately 900 exploratory drillings made by the authors, and based on the map previously developed by Rocca et al., (1995), which was constructed from a geological and geomorphological analysis of the city. The map assembled here, expands the area covered by Rocca et al., (1995), and is*

1. Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

✉ jclaria@unc.edu.ar.

2. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

oriented to the definition of the foundation depth rather than to the prediction of settlements by collapse. Lithological data and penetration resistance of the Dynamic Probing Super Heavy Cone Test (DPSH) are illustrated. A map of rebound depth of the DPSH test is presented. Predictive geostatistical analysis and interpolation of drillhole data were performed on a Geographic Information System. The results of the software interpolation are showed in a 2D and 3D color graphic interface of very simple and fast reading and comprehension.

**Keywords:** geotechnical map, Córdoba, GIS, stratigraphy, soils.

## INTRODUCCIÓN

La planificación y ejecución de obras de ingeniería requieren tener una base geológico-geotécnica sólida para evaluar futuros problemas de esta índole. Los mapas geotécnicos aportan información valiosa con fines de planificación y uso del territorio (González de Vallejo et al., 2002).

La ciudad de Córdoba ya cuenta con antecedentes de mapas geotécnicos, entre los que se destacan los de *Bondenbender* (1890), *Reginatto* (1970), *Rocca et al.*, (1995) y *Rocca y Quintana Crespo* (1999). El mapa de *Bondenbender* (1890) se centralizó en las márgenes del río Suquía, área en la que resultaba factible el empleo de fundaciones directas sobre suelos aluviales. Luego, con el crecimiento de la ciudad las construcciones avanzaron fuera del valle del río y comenzaron a ocupar terrenos en los que predominaban los loess con características colapsables (*Moll y Rocca*, 1991; *Rinaldi et al.*, 2007; *Francisca et al.*, 2008). *Reginatto* (1970) publicó por primera vez un mapa geotécnico de la ciudad de Córdoba con el objetivo de ser utilizado por los ingenieros a la hora de definir los eventuales inconvenientes en la fundación de sus construcciones. Por otro lado, *Rocca et al.*, (1995) y *Rocca y Quintana Crespo* (1999) presentaron un mapa que completó y extendió el desarrollado por *Reginatto* (1970) en el que se distinguen una serie de perfiles modales de cada unidad de Tipo geotécnico. El mapa de *Rocca* está orientado fundamentalmente a la predicción de asentamientos en estructuras civiles generados por el fenómeno de colapso frente al humedecimiento que sufren los limos de tipo loésico tan abundantes en la ciudad de Córdoba. Frente a la ampliación y la creciente urbanización de la ciudad de Córdoba, *Rocca y Quintana Crespo* (1999), *Rocca* (2006) y *Rocca et al.*, (2013) presentaron actualizaciones de su mapa con análisis geoestadísticos que estiman asentamientos potenciales máximos en las nuevas zonas anexadas al ejido urbano. Dado que los sectores anexados no estaban mapeados, las estimaciones de asentamientos se basaron en el empleo de información en parte subjetiva y en la experiencia de los especialistas (*Rocca et al.*, 2013).

Desde las primeras publicaciones de los mapas de *Bondenbender* (1890), *Reginatto* (1970), *Rocca et al.*, (1995) y *Rocca y Quintana Crespo* (1999) hasta hoy, la urbanización de la ciudad de Córdoba ha crecido considerablemente. Entre 2001 y 2010 se crearon 231 nuevas urbanizaciones, lo que representa casi 50.000 nuevos inmuebles y 17,3 millones de metros cuadrados edificados (*Diario La Voz del interior*, 2012). Estas nuevas urbanizaciones se distribuyen principalmente en la zona sur, oeste, y noroeste de la ciudad. Esta creciente demanda de viviendas e infraestructura, combinado con el loess altamente colapsable, la forma plano-cóncava del ejido urbano, y sumado a los problemas de anegamiento que tiene la ciudad (*Quintana Salvat et al.*, 2001), torna vital tener conocimiento del subsuelo para la correcta planificación y ejecución de obras civiles. Es por ello

que el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar y mapear geotécnicamente los suelos de la ciudad de Córdoba a partir de los datos de aproximadamente 600 estudios de suelos (más de 900 perforaciones), tomando como base las Cartas geotécnicas de la ciudad de Córdoba elaboradas por *Reginatto* (1970) y *Rocca et al.*, (1995). Por otro lado, se busca relacionar las características y propiedades geotécnicas con la geología y geomorfología de la ciudad. El mapeo está orientado fundamentalmente a la descripción de secuencias sedimentológicas tipo en los diferentes sectores de la ciudad, así como a la definición de estratos recomendados para el apoyo de las fundaciones de obras de infraestructura de porte medio.

## GEOMORFOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA GENERAL DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA

### Geomorfología

Las características de los suelos de la ciudad se encuentran estrechamente vinculados con las formas y topografía del terreno. Desde un punto de vista geomorfológico, el ejido urbano de la ciudad de Córdoba y zona metropolitana se encuentra ubicado en el piedemonte oriental de la Sierra Chica y en la Llanura Pampeana que se desarrolla inmediatamente al este de la misma. La ciudad de Córdoba se emplaza en una rampa tectónica reactivada, de perfil asimétrico, con su flanco occidental conformado por un escarpe de falla, abrupto y un flanco oriental tendido, que fue cubierto por un manto de loess que suavizó el relieve hasta perderse en la llanura. El sector proximal está conformado por un glacis de acumulación que apenas se observa ya que el manto loésico lo tapa. Por otro lado, de manera sincrónica, el río Suquía ha desarrollado su abanico de depósitos aluviales, que se extienden a lo largo y ancho de la ciudad, sumado a paleocauces anastomosados que ponen de manifiesto los diferentes emplazamientos desde comienzos del Cuaternario (*Quintana Salvat et al.*, 2001). Esto permite diferenciar cuatro niveles de terrazas asimétricas: a) las más antiguas se elevan 40 a 42 m sobre el nivel del río, b) las intermedias 10 a 12 m, c) las más recientes 3 a 4 m, y finalmente, c) a nivel de cauce existente, los depósitos actuales y primera terraza (*Frenguelli*, 1957). Otro agente modelador en la ciudad de Córdoba es el Arroyo La Cañada, que nace en la vertiente oriental de la Sierra Chica, y desagua en el río Suquía en el centro de la ciudad. El Arroyo La Cañada, causó innumerables problemas de inundación y anegamientos a lo largo de la historia hasta que en 1939 se realizaron las primeras obras de canalización que definieron la actual fisonomía por el centro de la ciudad (*Fogliá*, 1989).

### Secuencia estratigráfica

La secuencia estratigráfica típica y dominante de la ciudad de Córdoba está constituida (de base a techo) por basamento metamórfico (cuya profundidad se estima entre los 200 a 300 m por ejemplo en el Barrio de Alta Córdoba), sobre el cuál se

han depositado sedimentos provenientes de las Sierras Chicas y sedimentos fluviales producto de las crecidas históricas del Río Suquía (previo a la construcción del Dique San Roque que actualmente regula su caudal) y el Arroyo la Cañada. Estos depósitos corresponden a la Formación Río Primero de edad aproximada 1,8 - 1,0 Ma (Santa Cruz, 1972) y representan los niveles aterrazados del río. Sin embargo, desde el punto de vista geotécnico el sedimento más problemático es el manto de loess que se encuentra a nivel superficial y cubre gran parte de la ciudad a ambos márgenes del Río Suquía. El manto de loess presenta espesores muy variables, del orden de tan solo 5 m en el sector oeste - noroeste (inmediaciones de los Campos del 3er Cuerpo del Ejército, Avda. Ejército Argentino), rondando los 25 m en el extremo sur del ejido municipal, y alcanzando profundidades de más de 80 m en el extremo norte como por ejemplo en Barrio Guiñazú (Quintana Salvat et al., 2001).

La principal característica geotécnica de los loess cordobeses es la colapsabilidad, es decir su capacidad de sufrir grandes asentamientos en forma brusca frente a humedecimientos o cambios tensionales (Rocca, 2006 y Rinaldi et al., 2007), lo cual permite clasificarlos como suelos metaestables (Aitchinson, 1973). Esta inestabilidad es motivo de numerosos daños y pérdidas en la infraestructura civil. De acuerdo a observaciones realizadas por Sanabria y Argüello (2003), el manto de loess, denominado Fm. General Paz (Santa Cruz, 1972), está constituido por dos pulsos. Por un lado, el loess más profundo que corresponde a la Fm. Pampeana (Cantú, 1992). Este manto está caracterizado por sedimentos loésicos, loessoides y fluvio-eólicos, con presencia de fragipanes (Sanabria y Argüello, 2003). Desde un punto de vista mecánico la Fm. Pampeana, corresponde a loess removilizado que ha sufrido preconsolidación por desecación y por lo tanto no resultan susceptibles a sufrir colapso (Rocca, 2006). Por otro lado, el loess superior, que se encuentra a profundidades de hasta aproximadamente 10 m, corresponde a la Fm. Cordobense,

conformada por limos de color pardo a pardo rojizo, de origen eólico y generalmente edafizados a nivel superficial (Frenguelli, 1957). El comportamiento de estos loess superficiales es altamente colapsable (Rocca, 2006).

Desde el punto de vista mineralógico, en el loess se presentan como minerales mayoritarios el cuarzo, el feldespato, la calcita y vidrio volcánico y a su vez aparecen como trazas, minerales tales como la muscovita, illita y clorita (Rocca, 2006 y Argüello et al., 2012).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Como punto de partida se construyó una base de datos a partir de 600 informes geotécnicos (alrededor de 900 perforaciones). Asimismo, para la construcción del mapa se emplearon imágenes satelitales de *Google Earth Pro* con 1 m de resolución y SRTM de 30 m de resolución, trabajando con el sistema de referencia Datum WGS84 con una escala aproximada de 1:100.000. El mapeo digital de las unidades geotécnicas se realizó usando softwares de uso gratuito tales como SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*), *Qgis* y *Rockworks*. Los diferentes mapas de profundidades y las secciones transversales, fueron realizados a partir del modelo de bloques sólidos previamente generado en *Rockworks*. Los perfiles tipo de cada unidad geotécnica se graficaron empleando herramientas de diseño gráfico. Finalmente, con estas herramientas e información, se procedió a desarrollar un modelo geomorfológico y geotécnico de la ciudad de Córdoba y alrededores, a partir del cual se construyó el mapa geotécnico. Este proceso se ejecutó respetando los lineamientos fundamentales previamente empleados por Reginatto (1970) y Rocca et al., (1995). El modelo desarrollado divide a la ciudad en unidades de Tipo Geotécnico siguiendo criterios de uniformidad litológica-mecánicas. En la Figura 1 se presenta un esquema de la metodología empleada para la confección del mapa.

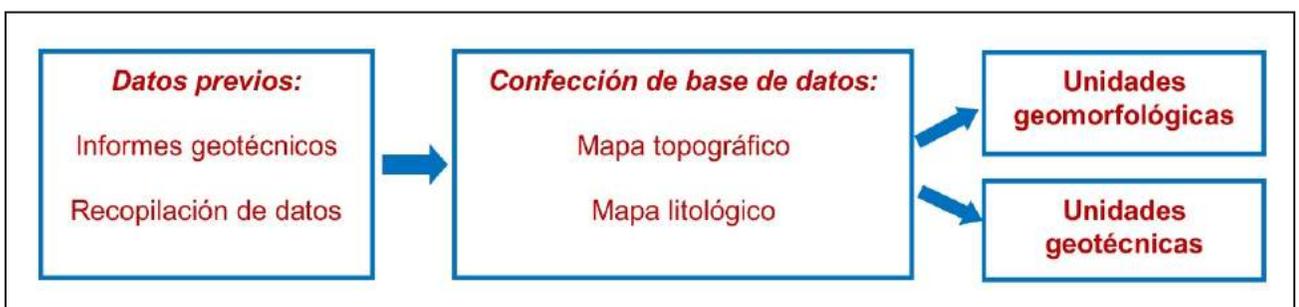


Figura 1. Metodología empleada para la confección del mapa geotécnico de la ciudad de Córdoba y alrededores.

## RESULTADOS

### Zonificación Geotécnica

Dado que el comportamiento mecánico de los suelos y rocas se encuentra estrechamente relacionado con el paisaje geomorfológico, siguiendo los criterios mencionados, se zonificó al ejido urbano y alrededores de la ciudad de Córdoba de la manera ilustrada en la Figura 2. Las divisiones geomorfológicas fueron tomadas de Quintana Salvat et al., (2001).

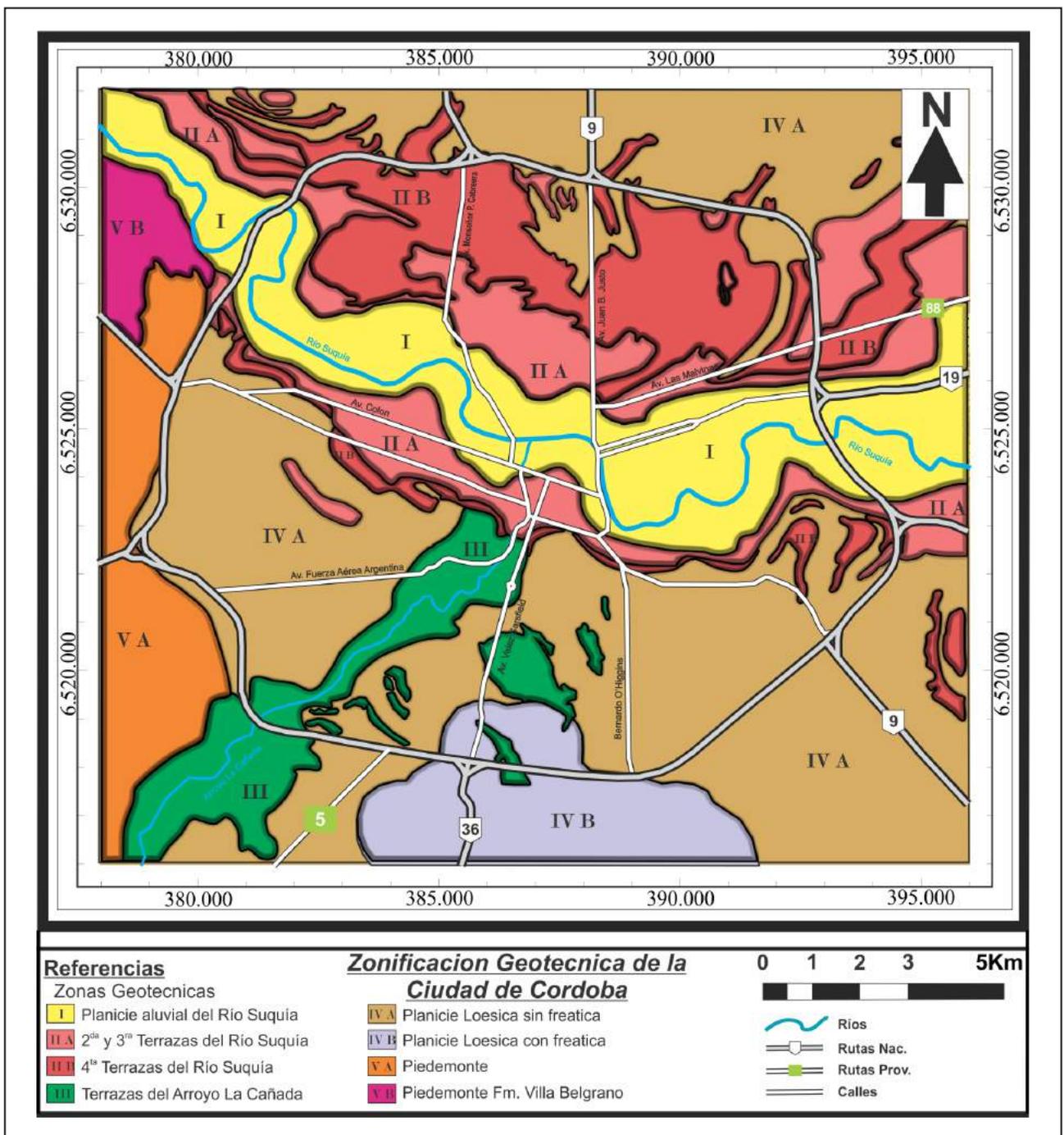
La ciudad de Córdoba quedó dividida en cinco unidades de mapeo las cuales se enumeran en la Tabla 1. Las principales características geotécnicas de los diferentes sectores geomorfológicos,

así como los aspectos más sobresalientes del comportamiento mecánico de los perfiles tipo se resumen en "Fichas Técnicas". Estas fichas técnicas se presentan en las Figuras 3 a 11.

En la zonificación se unieron algunas unidades geomorfológicas para facilitar la lectura del mapa, sin embargo, en las fichas técnicas se encuentran desglosadas. Por ejemplo, en la zonificación geotécnica, la segunda y tercera terraza del Río Suquía conforman una misma unidad geomorfológica, sin embargo, en las fichas técnicas se presenta un perfil característico para cada una de las terrazas.

**Tabla 1. Zonificación geotécnica de la ciudad de Córdoba, unidades de mapeo.**

Zona geomorfológica	Perfil tipo
I. Planicie aluvial Río Suquía	Depósitos actuales y primer Terraza
II. Terrazas intermedias	a) Segunda y Tercera Terraza b) Cuarta Terraza
III. Terrazas del Arroyo La Cañada	
IV. Planicie loésica	a) Con freática b) Sin freática
V. Piedemonte Sierras Chicas.	a) Piedemonte proximal b) ¿Formación Villa Belgrano?



**Figura 2. Zonificación geotécnica de la ciudad de Córdoba.**

## Aspectos fundamentales de cada zona

### Planicie aluvial Río Suquía y 1er terraza

Corresponde al cauce actual del río Suquía. El río Suquía o Primero es un río de carácter antecedente, el cual al salir del piedemonte forma un gran abanico aluvial. La planicie aluvial actual, está compuesta por arenas gruesas a finas, cuya gradación depende de la competencia y capacidad que tuvo el río a lo largo de las fluctuaciones estacionales típicas del clima dentro de su historia geológica.

El perfil tipo de la zona es (de base a techo): SP - ML o ML / CL. Está constituido por alternancia de arenas de diferente granulometría y capas de finos como limos y arcillas. La profundidad y la intercalación de cada uno de estos materiales están sujetas a la dinámica fluvial a lo largo de la ciudad. Este perfil se encuentra representado principalmente en el barrio Centro y todos los barrios que se encuentren en la ribera del río (Figura 3).

### Terrazas intermedias

#### Segunda y tercera terraza

A medida que nos alejamos del cauce actual del río tenemos las distintas terrazas. Éstas corresponden a geoformas que se encuentran a niveles topográficos más elevados que el cauce contemporáneo y que se suavizan hacia el este producto de la erosión ocasionada por el lavado de los sectores superiores. Debido a esto, la alternancia de los materiales, como las profundidades pueden variar ligeramente.

La segunda terraza se encuentra a aproximadamente 4 a 5 m de profundidad con respecto a la superficie actual del terreno. Corresponde a la secuencia (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL y se encuentra en barrios como Alberdi, Providencia, San Martín (Figura 4).

La tercera terraza se encuentra a los 6 - 8 metros aproximados de profundidad, el perfil tipo es (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL. El perfil se conforma por arenas en general pobremente graduadas en profundidad, luego arenas limosas, y finalmente la cubierta loésica que reviste a toda la ciudad de Córdoba. Este perfil caracteriza a barrios como Alta Córdoba (Figura 5).

#### Cuarta terraza

La cuarta terraza se encuentra a aproximadamente 12 metros de profundidad con respecto a la superficie del terreno natural actual. El perfil tipo está compuesto por (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL. Esta terraza se encuentra mayormente desarrollada en el sector norte de la ciudad (Figura 6) como ser barrios Poeta Lugones y Marqués de Sobremonte.

### Terrazas Arroyo La Cañada

Estos depósitos se encuentran en el sector sur - suroeste del Arroyo La Cañada, principalmente en barrios como La Cascada.

El perfil se encuentra representado por una alternancia (de base a techo) de arenas limosas, arenas pobremente graduadas y limos. En este sector, se entremezclan depósitos de piedemonte (las arenas pobremente gradadas) con arenas limosas pertenecientes al arroyo, recubiertos por mantos loésicos (Figura 7).

### Planicie loésica

#### Sin freática

Corresponde a la fracción sureste, algo al suroeste, y al norte de la ciudad de Córdoba, sectores actualmente en pleno

desarrollo urbanístico. Es el sitio elegido en las últimas dos décadas por numerosos desarrollistas para construir *countries* y barrios cerrados.

El perfil tipo es ML o bien ML / CL. Si bien, la profundidad estudiada en el presente trabajo llega hasta los 14 m, perforaciones no incluidas aquí indican que la litología loésica se mantiene sin cambios a profundidades mayores (Figura 8).

#### Con freática

Ubicada hacia el sur del anillo de Circunvalación, entre las avenidas Armada Argentina y 11 de Setiembre. Esta zona se caracteriza por tener presencia de nivel freático a profundidades variables entre los 2 y 13 m con respecto a la superficie actual del terreno. La presencia de la primera napa a escasa profundidad es consecuencia, en parte de la elevada y descontrolada urbanización combinada con la carencia de obras de cloacas, como así también al drenaje proveniente de las Sierras de Malagueño y Los Cerrillos, por lo que de acuerdo a análisis de DEM (modelo de elevación digital) (Quintana Salvat et al., 2001) y trazado de cuencas de drenaje, este sector pertenecería a la cuenca del Río Xanaes.

El perfil tipo se caracteriza por tener 14 m de loess (ML o bien ML / CL) con presencia del nivel freático a profundidades variables entre los 2 y 13 m (Figura 9). Si bien la profundidad estudiada aquí llega hasta los 14 m, datos de perforaciones no incluidas en el presente trabajo indican profundidades mayores manteniendo la presencia de limos loésicos.

### Piedemonte Sierras Chicas

#### Piedemonte proximal

Si nos desplazamos hacia el oeste, y saliendo del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, los suelos en el piedemonte presentan una gran variabilidad espacial y gran heterogeneidad litológica, con lo cual los perfiles tipo aquí presentados pueden encontrarse en áreas puntuales y localizadas, pudiendo hallarse fuera de las mismas columnas sedimentarias levemente diferentes a las descritas a continuación.

Los suelos encontrados en el piedemonte de las Sierras Chicas se encuentran bien representados en localidades como Villa Allende y Mendiolaza, entre otras. Básicamente están conformados en su base por basamento metamórfico altamente meteorizado, o bien gravas pobremente seleccionadas (GP), o en ocasiones arenas mal graduadas y cementadas en una matriz calcárea. Suprayaciendo a estos materiales suele encontrarse un manto de limos arenosos de tipo loésico, cuyos espesores pueden variar desde los 50 cm hasta 5 a 6 metros (Figura 10).

#### ¿Formación Villa Belgrano?

Constituye todo el sector noroeste de la ciudad, en el límite del ejido urbano. Está representado por el perfil (de base a techo) GP - SW - SM - cubierta loésica (ML o ML / CL). En zonas puntuales puede hallarse el nivel freático, cuya profundidad resulta variable según la estación del año. Este perfil, se caracteriza por encontrar en numerosos sectores a aproximadamente los 2 a 4 m de profundidad un suelo (o roca débil) color rojizo con elevada resistencia mecánica y capacidad portante, que correspondería a la Fm. Villa Belgrano (Santa Cruz, 1972). Vale aclarar que para corroborar de manera fehaciente si efectivamente se trata de la Fm. Villa Belgrano debería realizarse un estudio más exhaustivo que incluya análisis microscópicos y dataciones. Este perfil se puede encontrar en barrios como Villa Warcalde (Figura 11).

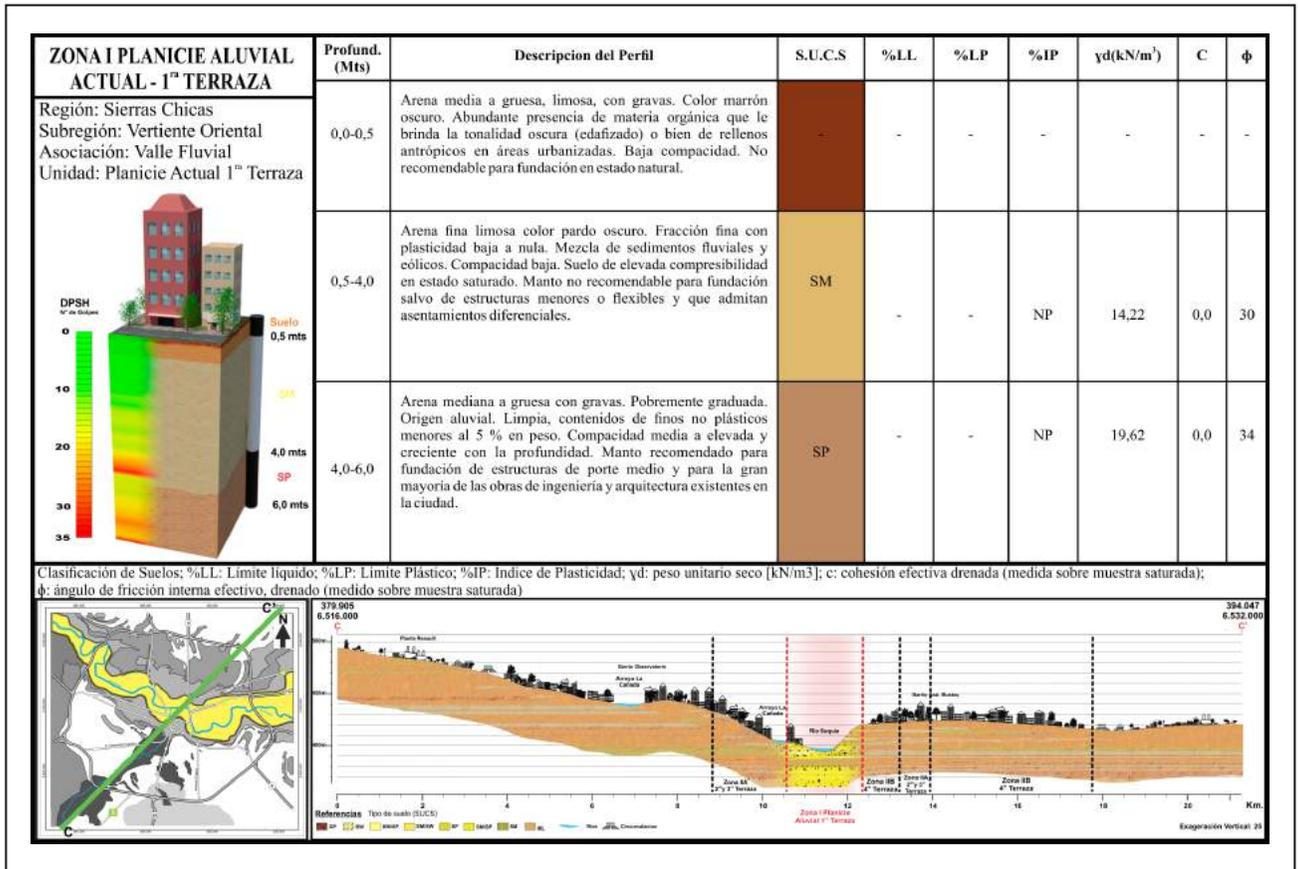


Figura 3. Planicie aluvial actual y 1er terraza del Río Suquía.

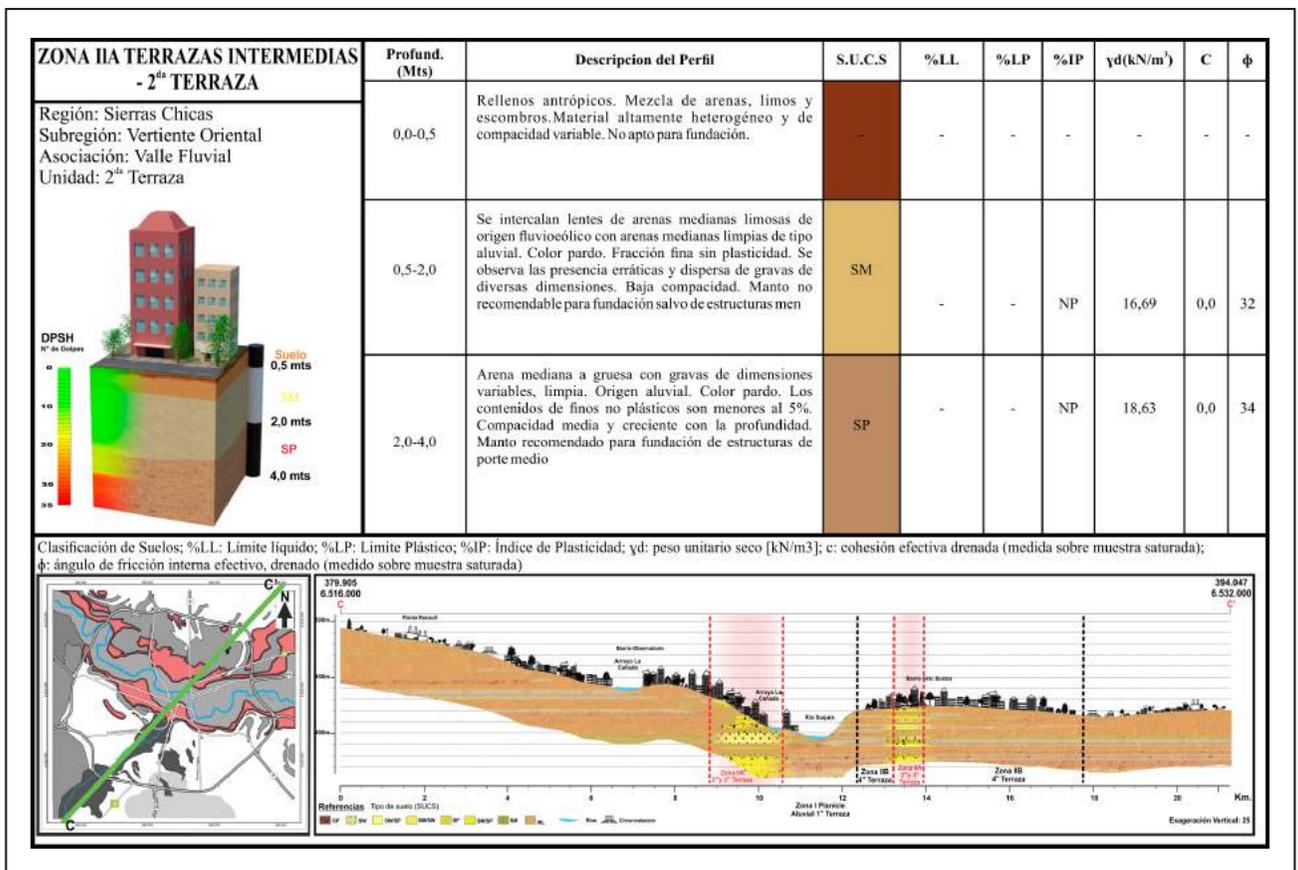


Figura 4. Terrazas intermedias, 2da terraza del Río Suquía.

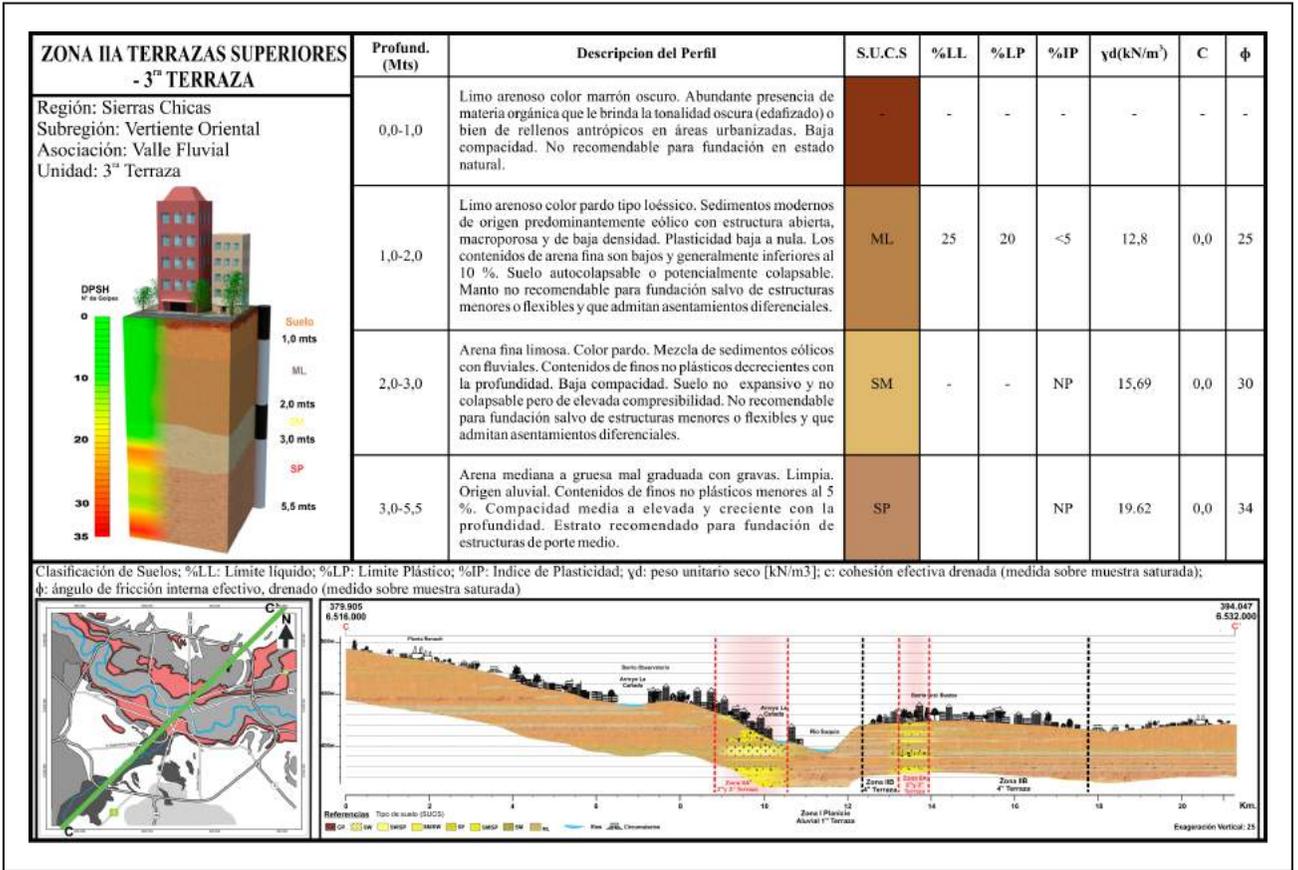


Figura 5. Terrazas intermedias, 3ra terraza del Río Suquia.

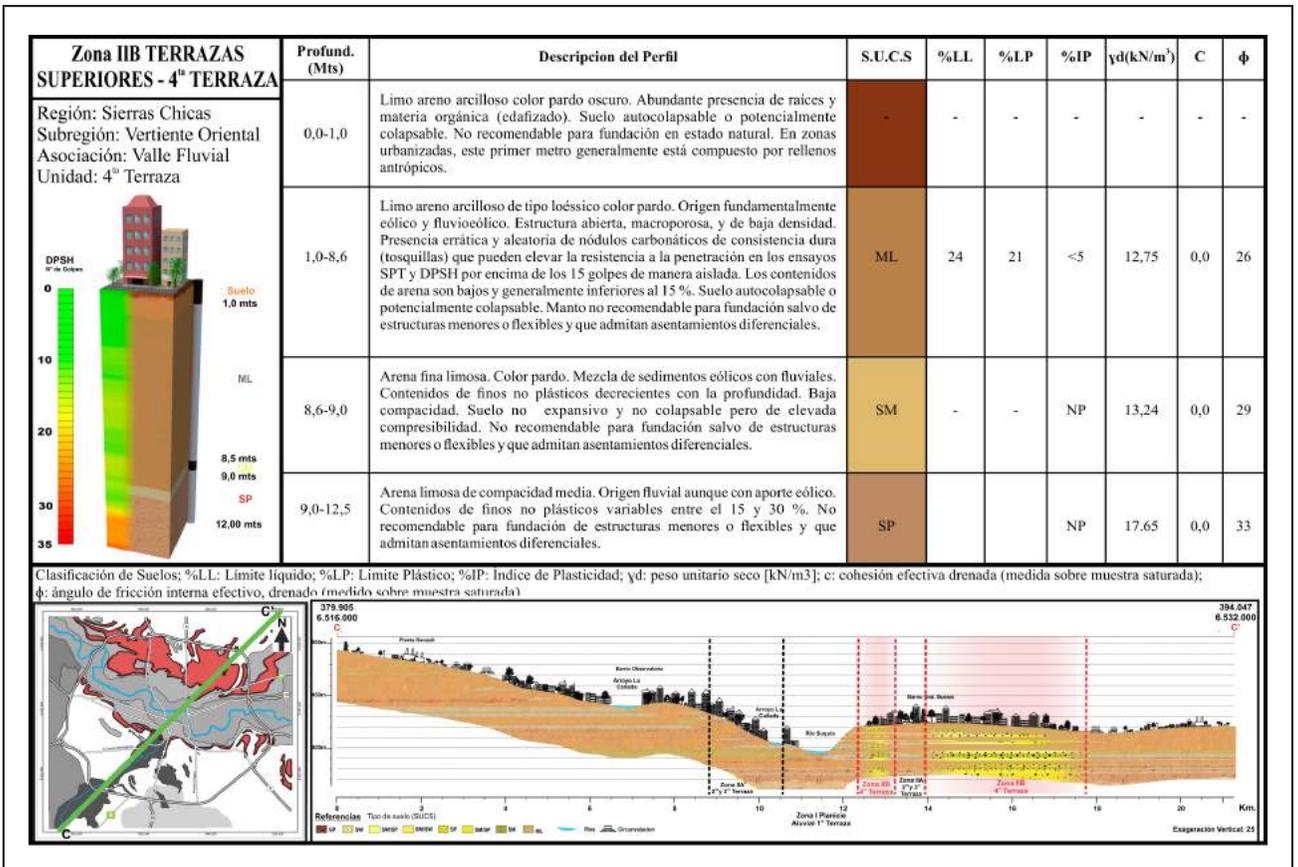


Figura 6. Terrazas superiores, 4ta terraza del Río Suquia.

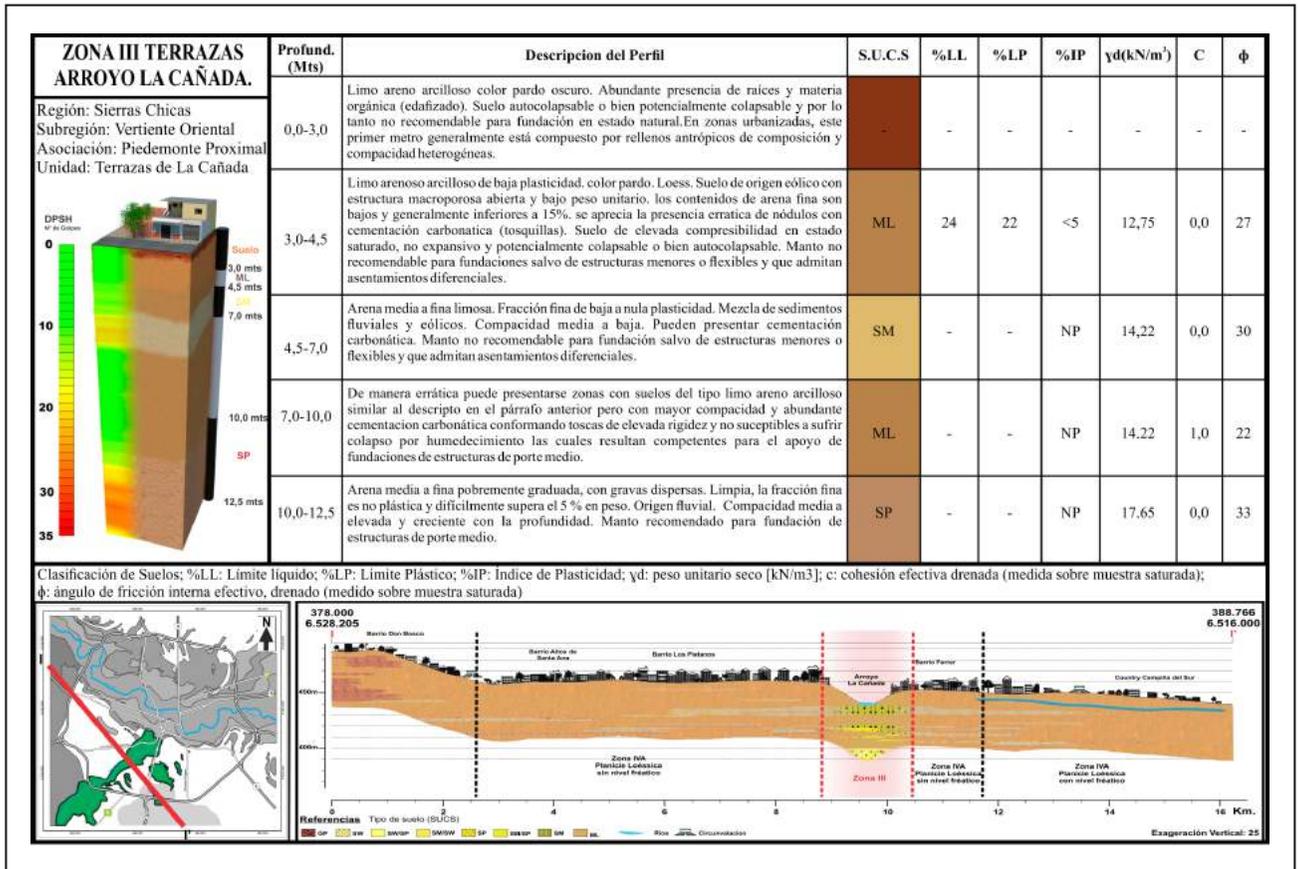


Figura 7. Terrazas Arroyo La Cañada.

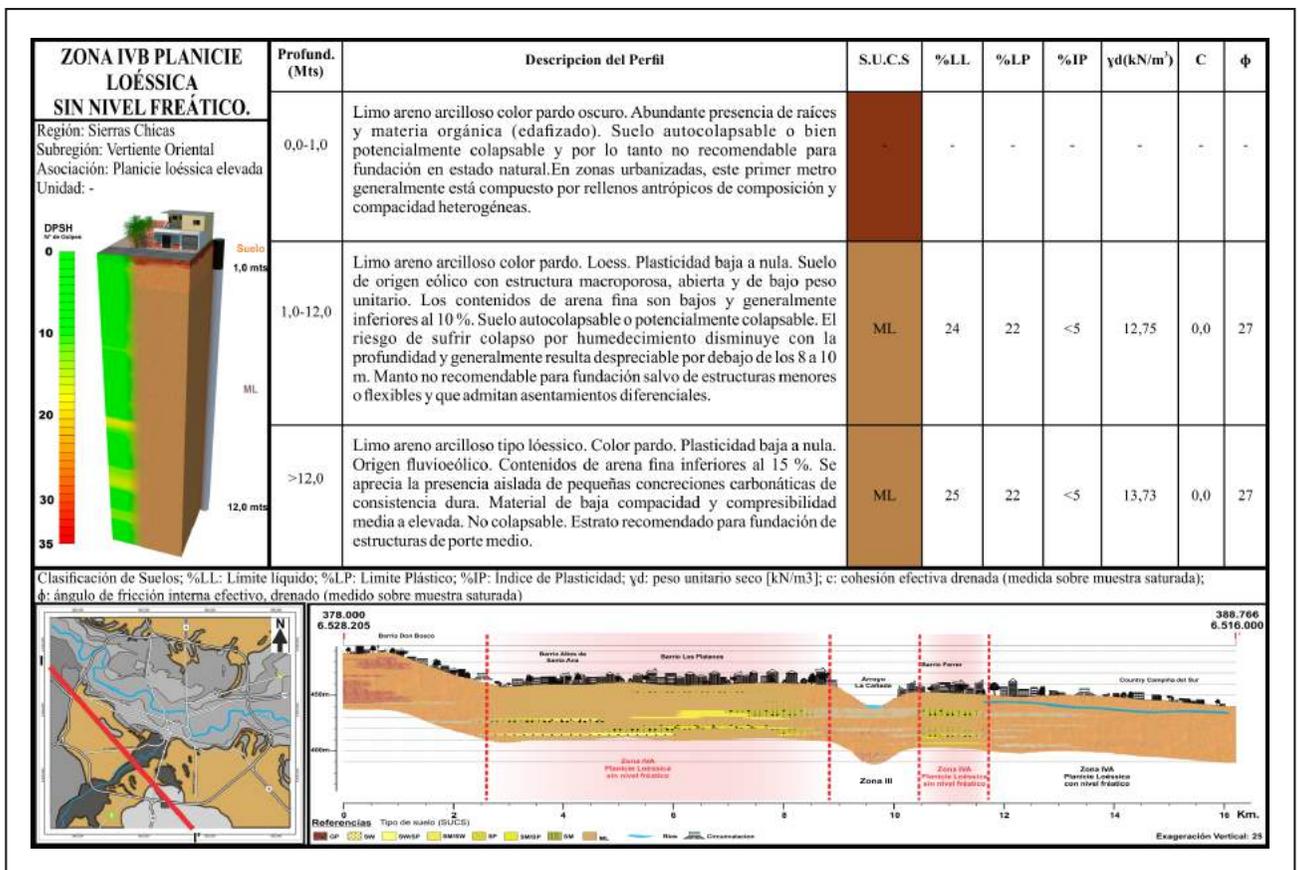


Figura 8. Planicie Loésica sin napa freática.

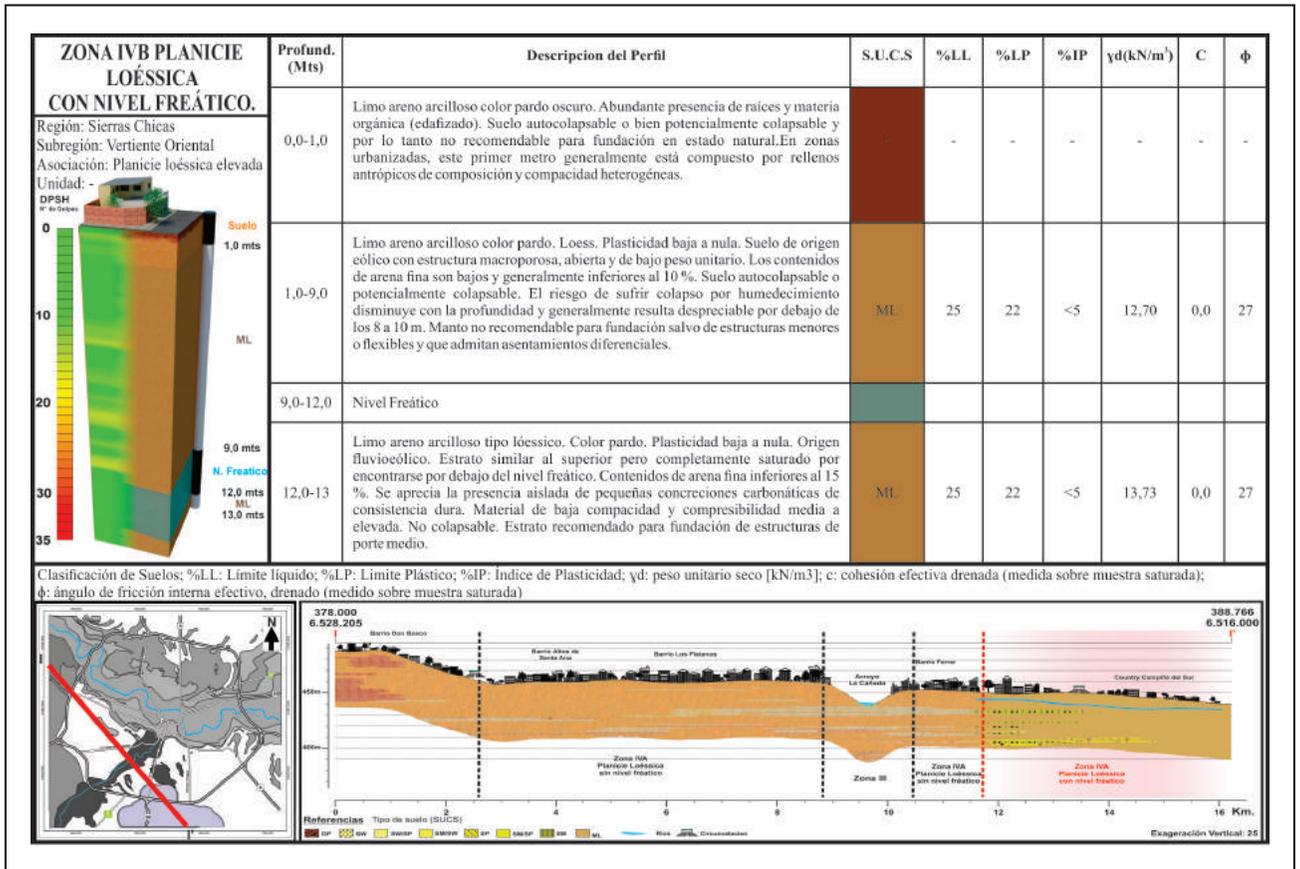


Figura 9. Planicie Loésica con napa freática.

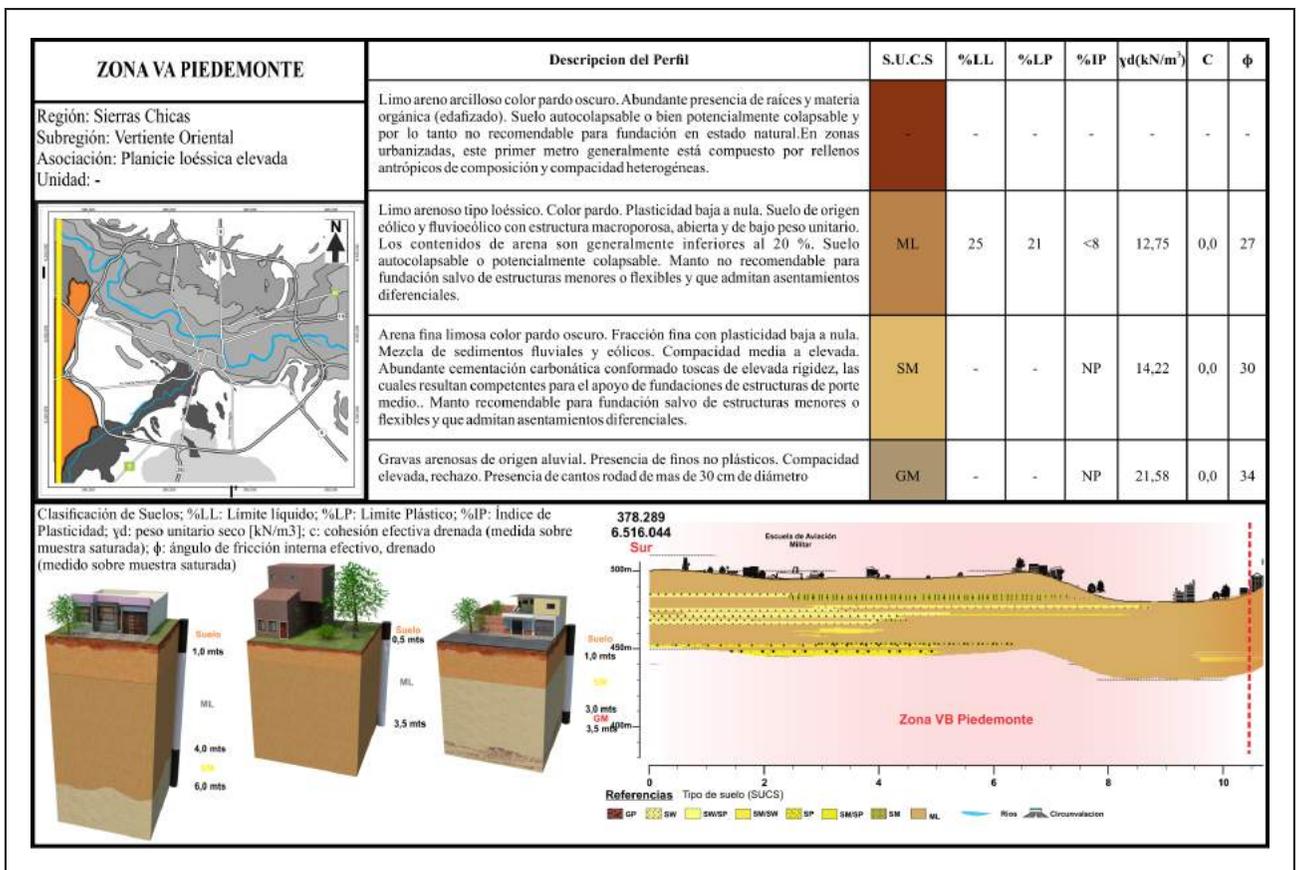


Figura 10. Piedemonte proximal.

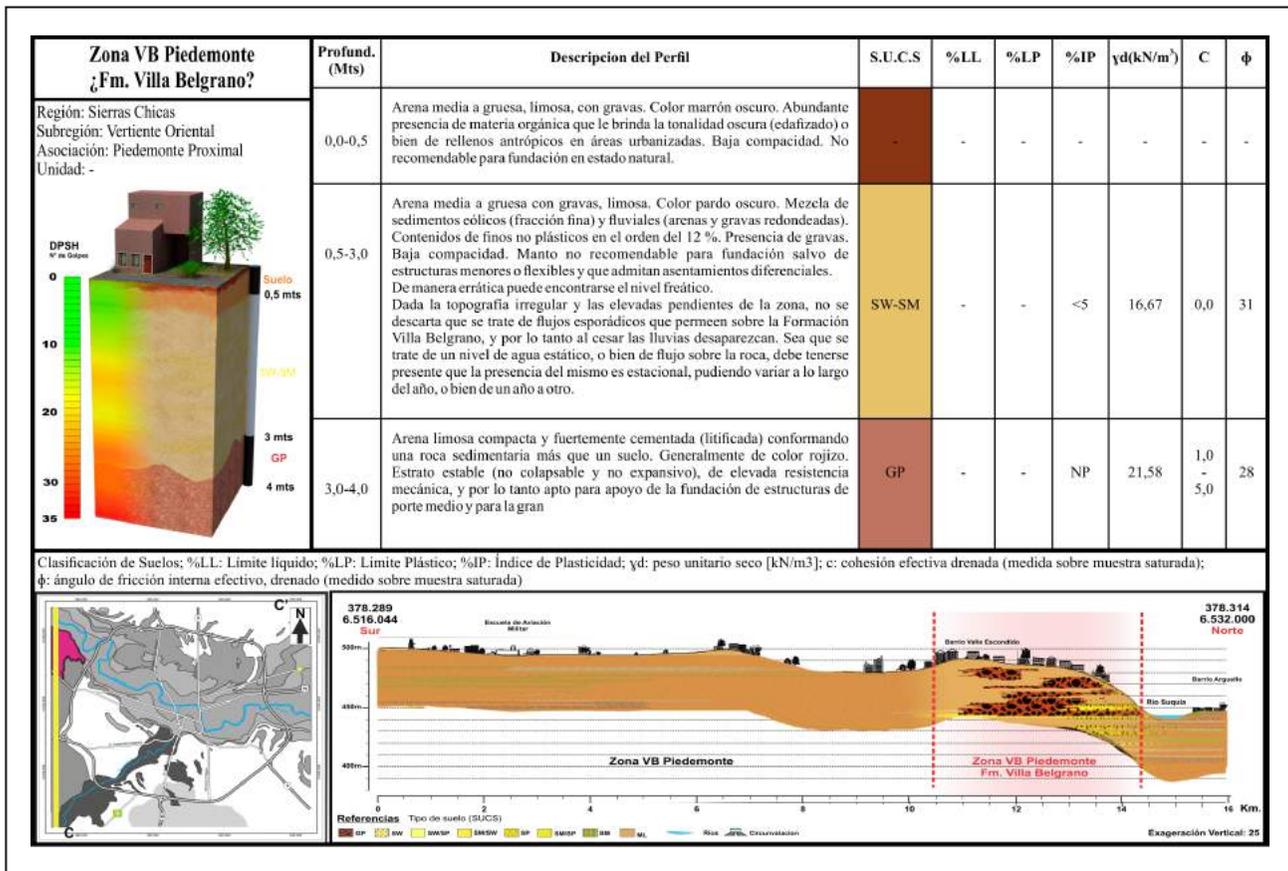


Figura 11. Piedemonte ¿Formación Villa Belgrano?.

**MAPA DE PROFUNDIDAD DE RECHAZO EN EL ENSAYO DE HINCA DINÁMICA SÚPER PESADA (DPSH)**

Este mapa se construyó tomando como base el mapa topográfico de la ciudad y una superficie imaginaria constituida por litologías que presentan un número de golpes ( $N_{DPSH}$ ) mayor a 35 en el ensayo de hincas con cono de tipo DPSH (*Dynamic Probing Super Heavy* - Hincas Súper Pesadas), el cual a los fines de este trabajo ha sido definido como  $N_{DPSH}$  de rechazo. Los lineamientos para la ejecución del ensayo de hincas dinámicas DPSH se encuentran definidos por el Comité Técnico TC-16 de la ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering). Este ensayo consiste en introducir en el terreno un cono de acero de 51 mm de diámetro y un ángulo de avance de 60 grados, mediante la aplicación de golpes con una masa de 63,5 kg arrojada desde una altura de 76 cm (misma energía de hincas que el SPT), contando la cantidad de golpes necesarios para que el cono penetre una profundidad de 20 cm en el terreno.

El mapa de profundidad de rechazo se presenta en la Figura 12a. En el mismo se indican con diferentes colores las profundidades a las cuales se produce rechazo (más de 35 golpes para penetrar 20 cm) en el ensayo de hincas DPSH.

Asimismo, en la Figura 12b, se presentan las litologías a las cuales se produce el rechazo en los diferentes sectores de la Ciudad. Puede observarse que en su mayoría las litologías que presentan  $N_{DPSH} > 35$  se corresponden con suelos granulares GP, SP, SW, SW, SM, entre otros. Sin embargo, en la Figura 12b

también se observan suelos clasificados como ML o ML / CL, los cuales dan rechazo por presentar cementación con carbonatos (toscas o limos loésicos con abundantes tosquillas), o bien encontrarse preconsolidados por desecación (Rocca, 2006).

La profundidad de rechazo ( $N_{DPSH} > 35$ ) ilustrada en la Figura 12a puede tomarse de una manera tentativa y aproximada como una aproximación a la profundidad que deberían alcanzar las fundaciones, sean superficiales o profundas, de obras de arquitectura de porte medio, como es el caso de viviendas unifamiliares y edificios de hasta 4 plantas.

**CONSIDERACIONES FINALES**

En el presente trabajo se dividió a la ciudad de Córdoba en 5 zonas geotécnicas. Las mismas se delimitaron sobre la base de las características geomorfológicas dominantes de la ciudad. Dentro del ejido urbano, más precisamente dentro del anillo de Circunvalación, se observa un dominio casi exclusivo de sedimentos modernos de origen eólico (loess) y fluvial (arenas depositadas por el río Suquia y el Arroyo La Cañada).

El sector de piedemonte proximal está conformado en su base por sedimentos gravosos (GP) que afloran principalmente en el sector noroeste de la ciudad que, dadas sus características de roca sedimentaria rojiza, podrían corresponder a la Formación Villa Belgrano. Por otro lado, en los alrededores del ejido urbano, la zona de piedemonte se caracteriza también por presentar basamento metamórfico altamente meteorizado o en ocasiones arenas cementadas, todos mantos aptos para la fundación de

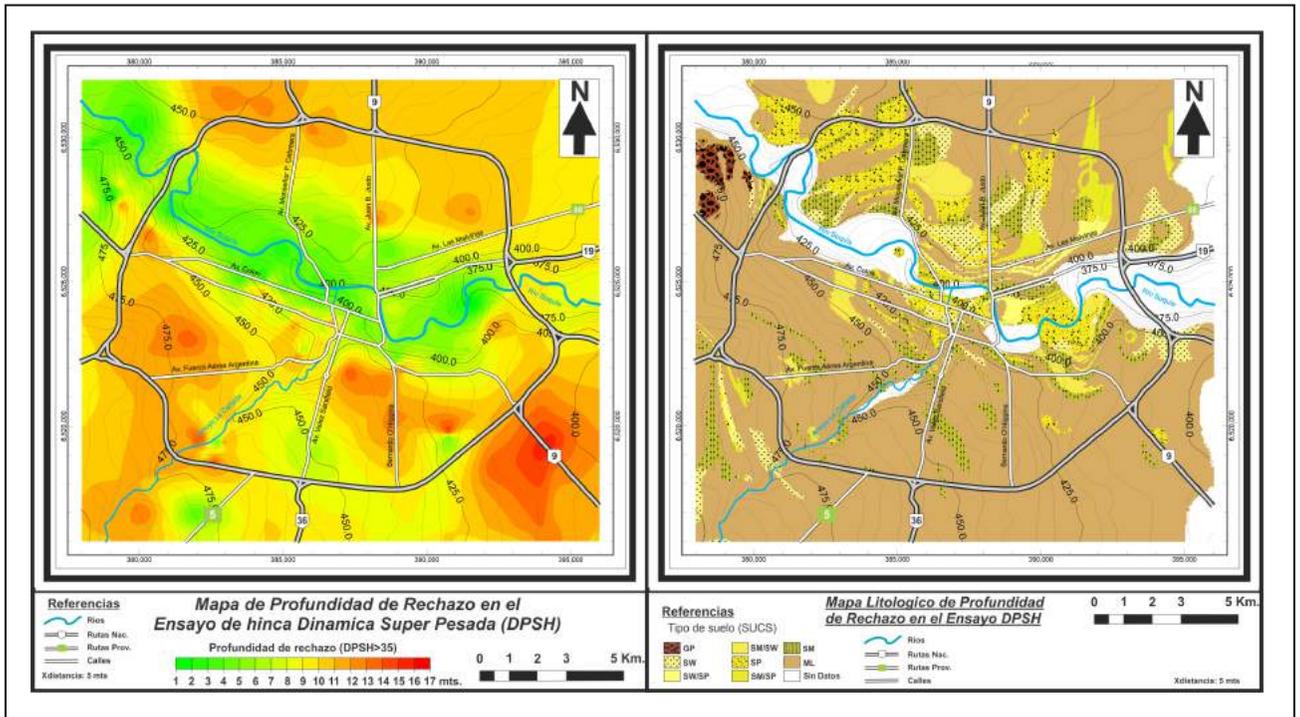


Figura 12. a) Mapa de profundidad de rechazo en la hinca con cono DPSH, b) Mapa de litologías que presentan  $N_{DPSH} > 35$  golpes.

estructuras de porte medio. Los espesores y profundidades de las mencionadas capas no son uniformes debido a la variabilidad topográfica que presenta esta unidad geomorfológica.

Hacia el suroeste, también en la asociación piedemonte proximal y en dirección al centro de la ciudad se encuentra las terrazas pertenecientes al Arroyo La Cañada, que mayoritariamente están compuestas por alternancia de capas de arenas limosas (SM) con mantos de limos loésicos (ML). Los limos loesoides, en ocasiones presentan abundante cantidad de cementación carbonática conformando toscas de elevada rigidez y capacidad portante, y no susceptibles a sufrir colapso por humedecimiento. En este sector no solo hay aporte del arroyo, sino también del piedemonte de las Sierras de Malagueño. En su curso hacia el centro de la ciudad, el Arroyo La Cañada desemboca en el Río Suquía, donde los mantos de arenas se mezclan dando un perfil de arenas bien graduadas (terrazas del río) intercalado con arenas limosas (terrazas del arroyo), conformando el perfil característico del casco céntrico de la ciudad.

El río Suquía, en su paso por la ciudad, presenta cuatro niveles de terrazas asimétricas que se encuentran a distintas profundidades y corresponden a las paleoformas fluviales. Estas paleoformas responden a distintos emplazamientos del cauce producto del acortamiento y estrangulamiento de meandros, como así también a movimientos neotectónicos del río a lo largo de su historia geológica. Estos paleocauces y antiguas terrazas se encuentran mejor representadas en el sector norte de la ciudad. Las terrazas que se encuentran a mayor profundidad (del orden de 12 a 14 m) corresponden con las más antiguas, luego siguen las que se encuentran entre los 6 y 8 m, un tercer nivel se encuentra alrededor de los 3 m, y finalmente se presenta el lecho actual con las terrazas recientes que no superan el metro de profundidad y se encuentran en la zona ribereña.

La planicie loésica ocupa gran parte del ejido urbano. El material que la constituye es sumamente problemático por su inestabilidad frente al humedecimiento al momento de construir. Esta zona ha sido dividida en dos, una conformada por un perfil de loess que supera los 14 metros, y otra con litología similar, pero con presencia de la napa freática entre los 2 y 13 m de profundidad. El sector en el cual se encuentra el nivel freático es acotado y en general se asocia a la presencia de barrios con altas densidades ocupacionales y carentes, hasta hace poco tiempo, de obras de infraestructura cloacal. Por otro lado, este sector tiene el aporte hídrico proveniente de las Sierras de Malagueño y Los Cerrillos y pertenecería a la cuenca del Río Xanaes.

A partir de la zonificación geotécnica y de los datos aportados por los estudios de suelo, se construyó el mapa de profundidad de rechazo y el de la litología que presenta  $N_{DPSH} > 35$  golpes. Estos mapas permiten planificar la investigación geotécnica para todo tipo de obras civiles. Si bien, las litologías en las que se alcanza el rechazo en la hinca Súper Pesada corresponden mayoritariamente a suelos granulares de compacidad media a elevada, también se puede observar que el rechazo a la hinca se produce en un extenso manto de loess que corresponde a la Formación Pampeana. El mismo se trata de un loess retransportado que fue sometido a procesos de desecación y que en ocasiones presenta elevados contenidos de cementación carbonática, ambos fenómenos que favorecen su estabilidad frente al humedecimiento y capacidad portante, tornándolos en aptos para el apoyo de fundaciones de obras medianas.

En base a lo expuesto es posible sintetizar las siguientes conclusiones:

El análisis del subsuelo de la ciudad de Córdoba revela una gran heterogeneidad en los depósitos que la componen. Estos contrastes litológicos ponen en evidencia que para cada obra civil se requiere un análisis exhaustivo y pormenorizado

realizado por especialistas para determinar las características y rasgos fundamentales del comportamiento del suelo. La construcción del mapa geotécnico aquí presentado procura orientar la planificación de estudios geotécnicos para obras civiles, y de ninguna manera pretende desestimar la necesidad de ejecución de ensayos in-situ para cada obra y sitio en particular.

Finalmente, el mapa aporta información valiosa para el emplazamiento de futuros emprendimientos urbanísticos y para la ampliación del ejido urbano.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias a la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico brindado a través del subsidio al proyecto Consolidar (33620180100574CB) y al Laboratorio de Geotecnia de la F.C.E.F. y N. de la U.N.C. por el espacio y equipamiento. Por otro lado, se agradece a los evaluadores cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AITCHINSON, G. D. (1973).  
Structurally Unstable Soils; State of the Art.  
*Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscú, 161 - 190.*
- ARGÜELLO, G. L., DOHRMANN, R. Y MANSILLA, L. (2012).  
Capítulo I Loess of Córdoba (Argentine) Central Plain, present state of knowledge and new results of research, New York,  
*En Rossi y Miranda (eds.) Educational, Geographical and Cultural Issues, 1-49.*
- BODENBENDER, G. (1890).  
La cuenca del Valle del Río Primero en Córdoba. Descripción geológica del valle del Río Primero desde la Sierra de Córdoba hasta la Mar Chiquita.  
*Boletín de la Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, 12, 5-55.*
- CANTÚ, M. P. (1992).  
Provincia de Córdoba.  
El Holoceno de la Argentina: Argentina,  
*Cadinqua I, 1-16.*
- DIARIO LA VOZ DEL INTERIOR, 2012.
- FOGLIA, M. E. (1989).  
Procesos de modernización en Córdoba.  
*Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.*
- FRANCISCA F. M., ROCCA R. J., DAHBAR P. Y VERRA M. (2008).  
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.  
*Memorias del XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2008), La Plata, Argentina.*
- FRENGUELLI, J. (1957).  
Geografía de la República Argentina.  
*Neozoico T. II, tercera parte, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Buenos Aires.*
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L. Y OTEO, C. (2002).  
Ingeniería geológica.  
*Pearson Educación.*
- MOLL, L. Y ROCCA, R. J. (1991).  
Properties of Loess in the Center of Argentina.  
*IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Chile, Vol. 1.*
- QUINTANA SALVAT, F., BARBEITO, O. Y MENSÓ, R. (2001).  
Carta de Peligrosidad (Amenaza) de Inundación, Erosión y Anegamiento para las Acciones de Prevención -Ciudad de Córdoba-,  
*Ed. Municipalidad de Córdoba.*
- REGINATTO, A. (1970).  
Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba.  
*2da Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Córdoba, Argentina.*
- REPORT OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (ISSMFE) (1989).  
Technical Committee on Penetration Testing of Soils -TC 16 with Reference Test Procedures  
CPT - SPT - DP - WST.
- RINALDI, V. A., ROCCA, R. J. Y ZEBALLOS, M. E. (2007).  
Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess.  
*Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 2259-2286.*

- Rocca R. J. (2006).  
 Confiabilidad de las estimaciones de colapsibilidad de la ciudad de Córdoba.  
*Memorias del XVIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2006). Vol I, San Juan, Argentina.*
- ROCCA, R. J. Y QUINTANA CRESPO, E. (1999).  
 Geotechnical zonation of Cordoba city (Argentina) using cluster analysis.  
*Proceedings of the XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz Iguazu, Brasil, Vol II, 659-666.*
- ROCCA, R. J., QUINTANA CRESPO, E., ABRIL, E. G., Y GOIO, M. G. (1995).  
 Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba.  
*Asoc. Arg. Geol. Aplicada a la Ingeniería, Publicación Especial, 3, pp. 322-340.*
- ROCCA, R. J., TERZARIOL, R. E., ZEBALLOS M. E. 2013.  
 Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, Buenos Aires, N° 30, pp. 67 - 76.*
- SANABRIA, J. A. Y ARGÜELLO, G. (2003).  
 Aspectos geomorfológicos y estratigráficos en la génesis y evolución de la Depresión Periférica, Córdoba.  
*II Congreso Argentino del Cuaternario y Geomorfología. Actas: 177-184, Tucumán, 2003.*
- SANTA CRUZ, J. (1972).  
 Geología al Este de la Sierra Chica (Córdoba) Valle del Río Primero.  
*Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba, 1-34.*





# Identificación y cuantificación del índice de carga contaminante al acuífero freático en el balneario Pehuen-có, Buenos Aires, Argentina

## Identification and quantification of the subsurface contaminant load into the phreatic aquifer in Pehuen-có, Buenos Aires, Argentina

Ruffo, Andrés Gabriel <sup>1,2</sup> ✉ - Rey, Matías <sup>1,2</sup> - Albouy, René <sup>2,3</sup>

Recibido: 20 de abril de 2021 • Aceptado: 14 de junio de 2021

### Resumen

*El agua es un bien escaso e indispensable para la vida humana y de gran importancia en el desarrollo socioeconómico de una región, razón por la cual, la gestión sustentable del recurso hídrico cobra especial relevancia. La localidad costera de Pehuen-Có, ubicada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, posee como única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano la alojada en el acuífero freático del cordón costero medanoso. El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un inventario de fuentes potenciales de contaminación, para luego determinar el índice de carga contaminante (ICC) de las mismas y plantear mejoras para la preservación y protección del recurso hídrico por parte de las autoridades y la población en general. De esta manera, utilizando la metodología propuesta por Foster et al. (2002), se logró identificar actividades y procesos con una mayor probabilidad de generar contaminación al acuífero y plantear mejoras para la preservación y protección del recurso hídrico. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que todas las actividades consideradas poseen un ICC de moderado a elevado. Dadas las características geológicas e hidrogeológicas del área y de acuerdo al análisis efectuado en este estudio, queda en evidencia la falta de protección del único recurso de agua disponible para consumo humano en la localidad.*

**Palabras clave:** Pehuen-Có, carga contaminante, acuífero freático, cordón costero medanoso.

### Abstract

*Water is a scarce and essential resource for human life, of great importance in the socioeconomic development of a region, which is why the sustainable management of hydric resources is especially relevant. In the coastal town of Pehuen-Có, located in the southwest of the province of Buenos Aires, the only source of water supply for human consumption is the phreatic aquifer of the coastal dune chain. The objective of*

1. CONICET. CCT Bahía Blanca. Camino La Carrindanga Km 7 (8000) Bahía Blanca.

✉ andres.ruffo@uns.edu.ar

2. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Buenos Aires.

3. CGAMA, CIC, San Juan 670, Bahía Blanca, Buenos Aires.

this work is to carry out an inventory of potential sources of contamination and the determination of the subsurface contaminant load index of these sources, and to propose improvements for the preservation and protection of water resources by the authorities and the population in general. Thus, using the methodology proposed by Foster et al. (2002), it was possible to identify activities and processes with a higher probability of generating contamination to the aquifer and to propose improvements for the preservation and protection of the water resource. The results obtained show that all the activities considered have a moderate to high contaminant load index. Given the geological and hydrogeological characteristics of the area and according to the analysis carried out in this study, the lack of protection of the only water resource available for human consumption in the zone is evident.

**Keywords:** Pehuen-Có, contaminant load, phreatic aquifer, coastal dune chain.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El agua es un bien escaso e indispensable para la vida humana, de gran importancia en el desarrollo social, productivo y económico de una región. La falta de acceso al agua potable es considerada una de las principales causas de enfermedades en el país y el mundo (Peranovich, 2019) y su disponibilidad se relaciona íntimamente con la calidad de vida de la población (UNESCO, 2019).

En la provincia de Buenos Aires y particularmente en el sudoeste bonaerense, gran parte de los pueblos y ciudades se abastecen de agua subterránea (Kruse, 2015). En este contexto, los estudios que relacionan las actividades antrópicas con la posible contaminación de los acuíferos toman relevancia.

Distintas investigaciones realizadas en el área costera de la provincia de Buenos Aires exponen escenarios donde, tanto la falta de redes cloacales como la presencia de basurales a cielo abierto son frecuentes (Espinosa et al., 2009; Merlotto et al., 2012; Lexow et al., 2016). Esta situación repercute negativamente en la calidad y preservación del recurso hídrico subterráneo.

En la localidad de Pehuen-Có, la única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano corresponde al acuífero freático, la cual se realiza mediante captaciones particulares. A su vez no existe un sistema de saneamiento de efluentes (cloacas) ni sectores adecuadamente acondicionados para depositar residuos sólidos urbanos.

Teniendo en cuenta estos dos factores, contar con un inventario de fuentes potenciales de contaminación, así como la estimación de los valores de su índice de carga contaminante (ICC) es de gran utilidad. En este sentido, se debe tener en cuenta el concepto de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, definido por Foster (1987) como el conjunto de características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un inventario de fuentes potenciales de contaminación, para luego determinar el ICC de las mismas y plantear mejoras para la preservación y protección del recurso hídrico por parte de las autoridades y la población en general.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### Ubicación geográfica y características climáticas

La localidad balnearia de Pehuen-Có (Figura 1), ubicada dentro del Partido de Coronel de Marina Leandro Rosales, es la principal villa turística de este distrito del sudoeste bonaerense. Se emplaza sobre una superficie aproximada de 7,3 Km<sup>2</sup>. El ingreso al balneario se realiza por la Ruta Provincial N°113, la cual conecta con la Ruta Nacional N°3. Se ubica sobre una franja de dunas litorales cuyo eje principal posee dirección este-oeste, siendo su extensión norte-sur de aproximadamente 6 Km. Según los últimos datos disponibles, presenta 681 habitantes

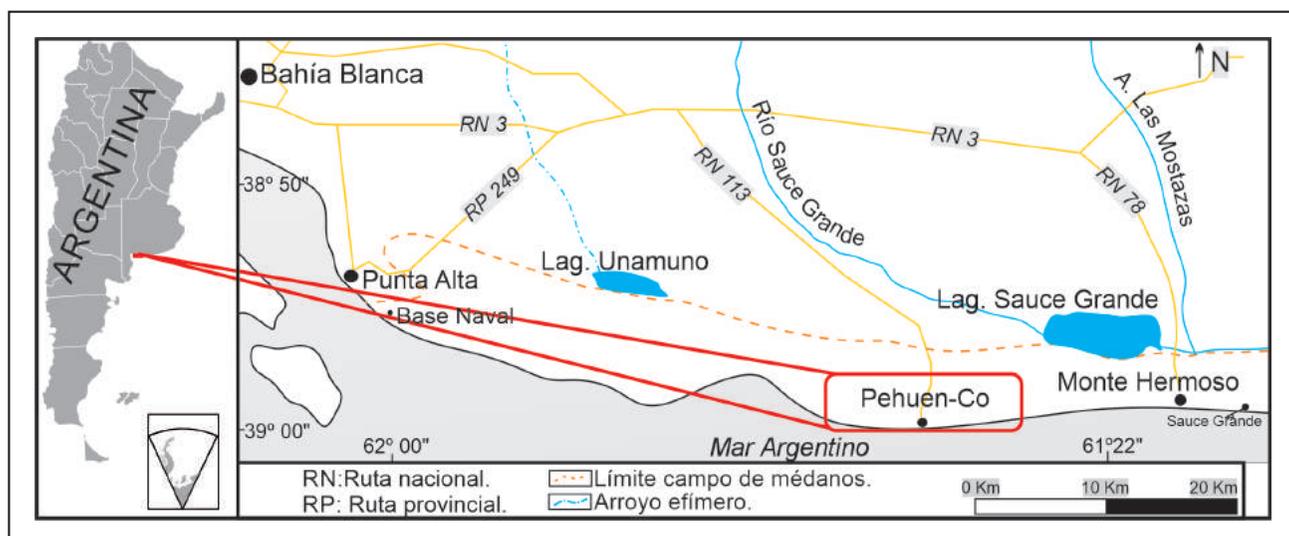


Figura 1. Área de estudio.

permanentes (INDEC, 2010), pudiendo superar los 10.000 habitantes durante la estación estival (Revista Hábitat, 2014). No posee servicios públicos de distribución de agua y red cloacal en el 100% de las partidas.

La principal actividad comercial del balneario es el turismo estival y el comercio relacionado a este. La infraestructura de servicios es limitada, contando con una sola estación de servicio ubicada en el ingreso a la villa. En lo que respecta a la recolección de residuos sólidos urbanos, esta es responsabilidad del municipio, acumulándose los mismos en un basural a cielo abierto, ubicado al noreste del área urbana, sin tratamientos previos.

Según los índices climáticos de *Thornthwaite* (1948) el clima de la región se clasifica como C1 d B'2 a', es decir subhúmedo mesotermal. La temperatura media anual ronda los 14,7 °C, siendo la media mínima de 7 °C en el mes de Julio y la media máxima de 27 °C en Enero. La precipitación media anual es de 732 mm (1982-2017), presentando máximos en Marzo (89 mm) y mínimos durante el mes de Junio (31 mm).

### Geología e hidrogeología

Las rocas y sedimentos que afloran en el sector costero de la Provincia de Buenos Aires, están vinculadas genéticamente con las variaciones del nivel del mar, sucedidas durante el Pleistoceno-Holoceno, encontrándose depósitos tanto continentales como marinos (Aramayo et al., 2002).

De acuerdo con lo descrito por *Zavala* (1993), iniciando la secuencia sedimentaria se encuentra la Formación Monte Hermoso (Plioceno inferior a Plioceno medio), compuesta por limolitas arcillosas, limolitas arenosas, areniscas finas y brechas matrix sostén, correlacionables con los "Sedimentos Pampeanos" descritos por *Fidalgo et al.* (1975). Sobre dicha unidad se encuentra la Formación Puerto Belgrano, de posible edad Pleistocena superior, formada por areniscas finas, medias y gruesas bien seleccionadas. Los depósitos que continúan la columna estratigráfica corresponden a la Formación Punta Tejada (Pleistoceno superior- Holoceno medio), la cual se subdivide en tres miembros informales. Su base está compuesta por brechas con intraclastos arcillosos (Miembro inferior), continuando con conglomerados

clasto sostén (Miembro medio) y culminando la secuencia con depósitos arenosos con gravas dispersas (Miembro superior). Sobre lo anterior se encuentra depositada una cubierta arenosa moderna, la cual compone los médanos actuales.

El acuífero del cual se abastece la localidad de Pehuén-Có se encuentra alojado en las arenas que forman el cordón costero (Región Costera, según la clasificación de Regiones Hidrogeológicas propuesta por *Auge*, 2004). Dichos sedimentos se emplazan sobre una capa de limos loésicos (Fm. Monte Hermoso/ Sedimentos Pampeanos), la cual actúa como hidroapoyo del sistema. Ambas unidades son constituyentes de la Sección hidroestratigráfica Epiparaniana (*DYMAS*, 1974). Este acuífero libre es recargado por los excesos hídricos producidos por la precipitación, los cuales se estiman en un 32 % de las precipitaciones anuales, siendo el clima un factor determinante para el funcionamiento del sistema. Dicho valor fue estimado mediante la realización de balances de agua en el suelo, utilizando el software BALSHORT V3 (*Carrica*, 1993), a partir de la serie de precipitación diaria de Coronel Rosales (2000-2017) y las características edafológicas del área.

La potencia de la zona no saturada suele ser inferior a los 5 m. Los mayores espesores se relacionan con las crestas de los médanos, donde superan levemente los 10 m, mientras que puede ser inexistente en los bajos interdunales, donde es frecuente la presencia de humedales relacionados al afloramiento del nivel freático (*Ruffo et al.*, 2017). Debido a la elevada permeabilidad y porosidad eficaz del medio arenoso (5 a 10 m/día y 10 a 15 % respectivamente) (*Custodio y Llamas*, 1976), cualquier fluido que sea vertido en el suelo, en cantidades suficientes, sería capaz de llegar al acuífero freático. Atendiendo a lo anterior, *Ruffo et al.* (2017) clasifican la vulnerabilidad intrínseca del acuífero como alta.

Regionalmente el flujo subterráneo presenta su nivel de descarga en el mar, no obstante lo cual, localmente sigue dos direcciones opuestas, una hacia el mar y otra hacia la llanura continental. De esta manera el acuífero costero es limitado por una interfase agua dulce/agua salada hacia el mar y otra interfase agua dulce/agua salobre hacia la llanura (Figura 2).

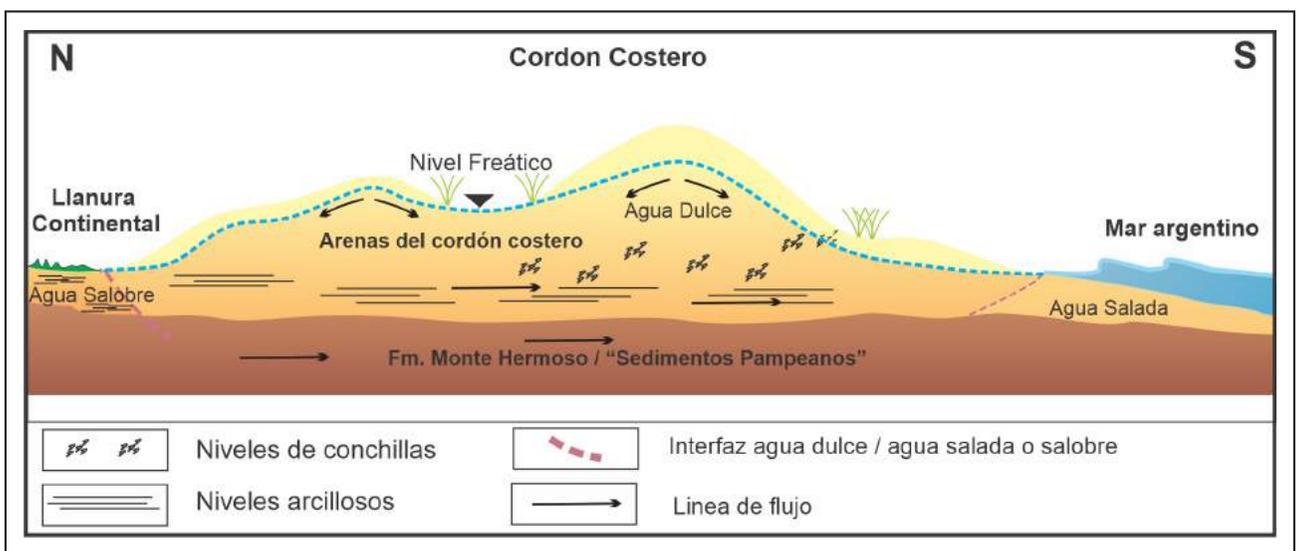


Figura 2. Modelo hidrodinámico del acuífero costero (modificado de *Ruffo et al.*, 2018).

### METODOLOGÍA

El inventario sistemático de las actividades potencialmente contaminantes se realizó siguiendo lo sugerido por USEPA (1991), identificándolas y ubicándolas espacial, areal y temporalmente (período de funcionamiento). A su vez, dichas actividades fueron categorizadas como difusas, multipuntuales y puntuales, según los criterios propuestos por Foster et al. (2002). El tipo de inventario y su grado de detalle deben estar en virtud del objetivo final del trabajo, tamaño del área considerada, la variedad de actividades en la misma y la disponibilidad de datos existentes, entre otros.

La caracterización del índice de carga contaminante (ICC), para cada una de estas actividades, fue realizado en función de cuatro características fundamentales y semi-independientes (Foster et al., 2002), como se muestra en la Figura 3:

- La clase de contaminante involucrado, definida por su persistencia en el ambiente subterráneo (por actividad bacteriológica y reacciones químicas) y su coeficiente de retardo (relacionado con el flujo del agua subterránea en el ambiente).
- La intensidad de la contaminación, definida por la concentración de cada contaminante considerado (en relación a valores guía de la OMS) y la proporción de la recarga involucrada en el proceso.
- El modo en que el contaminante es descargado al subsuelo, definido por la carga hidráulica (incremento sobre la tasa de recarga natural o sobrecarga hidráulica)

y respecto a la distancia relativa al nivel freático, donde el efluente o lixiviado es descargado o generado.

- La duración de la aplicación de la carga contaminante, definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo (ya sea intencional, incidental o accidental) y por la duración de la aplicación de dicha carga en el subsuelo.

La carga hidráulica, en el caso de los desechos sólidos urbanos, se encuentra en relación directa con las precipitaciones, la pendiente del terreno, el tipo de cobertura y el grado de humedad y densidad aparente de los residuos. Estos dos últimos parámetros no están caracterizados, sin embargo es posible efectuar una cuantificación aproximada a partir de la precipitación (Henry y Heinke, 1996).

Para efectuar la valoración de los índices, la ubicación de los puntos dentro de los cuadros queda definida por el tipo de actividad (puntual, multipuntual o difusa y duración de la carga) y el contaminante analizado siguiendo los campos expuestos en la figura 3. En el caso del modo de disposición del contaminante, es necesario conocer tanto la carga hidráulica impuesta, como la profundidad relativa al nivel freático.

El valor del ICC se obtiene a partir de la sumatoria de los valores asignados a cada una de estas cuatro características fundamentales multiplicadas por un factor de peso homogéneo de 0,25. En base a esta valoración, el ICC de cada actividad se clasifica como reducido (0 - 0,30), moderado (0,31 - 0,60) o elevado (0,61 - 1). En los gráficos Clase de contaminante y Modo de disposición cada cuadrante tiene una calificación

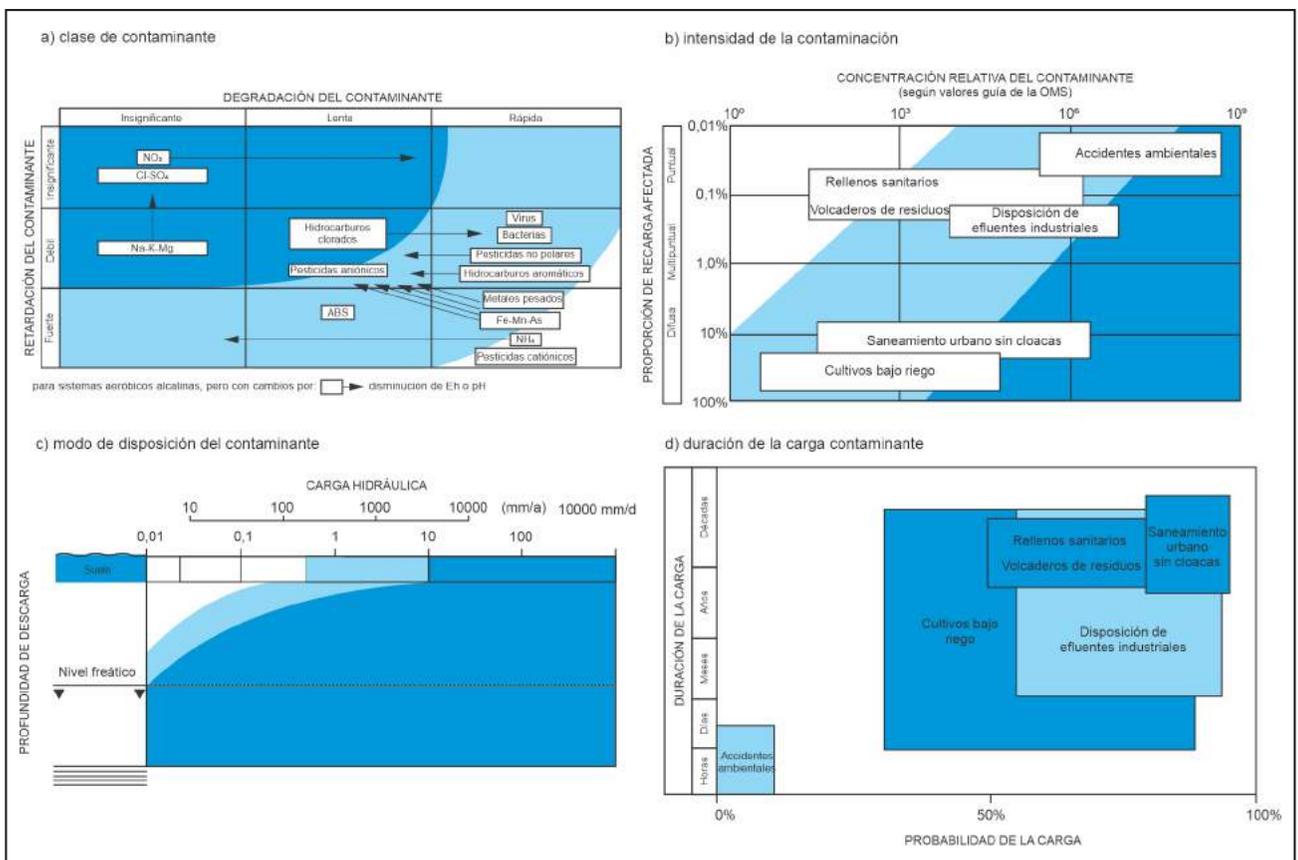


Figura 3. Caracterización de la carga contaminante según sus características fundamentales (Foster et al., 2002).

determinada. En los casos correspondientes a Intensidad y Duración, el valor relativo se calcula mediante interpolación lineal. Los aspectos teóricos y prácticos sobre la persistencia y movilidad de las sustancias consideradas y su relación con el medio físico, tanto en la zona no saturada como en la zona saturada (acción bacteriana, adsorción, solubilidad, capacidad de intercambio catiónico, hidrólisis, etc.), resultan de gran importancia al efectuar estas valoraciones.

## RESULTADOS

El inventario realizado permitió identificar cuatro actividades potencialmente contaminantes, a saber: Estación de servicio (Es), basural a cielo abierto (Bca), posibles derrames accidentales (Da) y falta de servicio cloacal en la totalidad del área urbana (Usc) (Figura 4). Estas actividades fueron clasificadas como fuentes puntuales en los primeros casos y como difusa-multipuntual en el último.

### Fuentes de contaminación difusa – multipuntual

Áreas residenciales urbanas sin servicios de cloacas (Usc)

El consumo de agua, así como el volumen de desechos líquidos se ve condicionado por la estacionalidad poblacional que presenta el balneario. Los datos de Aguas Bonaerense S.A (ABSA) para la provincia de Buenos Aires indican una dotación promedio de 300 L por habitante (ABSA, 2019). Por lo tanto, el consumo de agua durante la temporada estival es aproxima-

damente 1400 % mayor que el resto del año. Esto implica que la carga hidráulica que recibe el acuífero desde los pozos sépticos, en temporada alta, se verá significativamente incrementada respecto al resto del año.

Considerando los datos expuestos, la carga hidráulica al acuífero resulta de 0,03 mm/día para la temporada baja (USCTB) y 0,41 mm/día para la temporada estival (USCTA) (Figura 5). La descarga en pozos negros suele ocurrir dentro de los primeros dos metros de la zona no saturada.

Datos correspondientes a análisis fisicoquímicos y bacteriológicos actuales e históricos, brindados por el Municipio de Coronel Rosales y particulares, exponen con frecuencia niveles de contaminación bacteriológica en los pozos de explotación tanto domésticos como públicos. Los valores de coliformes totales en algunos casos superan los 2400 MNP /100 ml y se detecta presencia de pseudomonas, sumado a valores de nitratos superiores a 45 mg/L. Por su condición de limitante para el consumo humano (C.A.A., 1969) y su movilidad en el subsuelo, en el presente trabajo se tomará como indicador de contaminación el ion nitrato (NO<sub>3</sub>).

### Fuentes de contaminación puntual

Basural a cielo abierto (Bca)

Este se encuentra emplazado al noreste de la localidad, dentro del área urbana, sobre una superficie aproximada de 5 Has. Según información local, el mismo tendría una antigüedad de 40 años en el mismo sitio, migrando su cabecera de recepción



Figura 4. Identificación de actividades potencialmente contaminantes.

en sentido noreste, debido a recurrentes quejas de los habitantes por la proximidad a sus propiedades. Los residuos son vertidos sin ningún tipo de clasificación ni tratamiento, directamente sobre las arenas del cordón costero medanoso previamente excavadas. Es posible encontrar desechos orgánicos, plásticos, aceites, baterías, chatarra, restos de poda, inertes, entre otros. Debido a la elevada permeabilidad del sustrato, los lixiviados generados en el mismo se infiltran llegando al nivel freático, constituyendo una fuente puntual y continua de contaminación.

De esta manera, considerando el área sin escurrimiento superficial por sus características psamíticas, la carga hidráulica se estima en 1mm/día (50% de la precipitación anual).

Debido a las variadas fuentes de contaminantes existentes en el basural, se propone como indicadores los nitratos (BCA1) y metales pesados (BCA2) (Figura 5).

### Estaciones de servicio (Es)

Las estaciones de servicio son una de las fuentes antrópicas de mayor contaminación de las aguas subterráneas (Lexow et al., 2016), sobre todo debido a que, si bien las regulaciones existentes (aplicadas por la Secretaría de Energía a partir de 1993) han mejorado, las fugas de combustible son situaciones que se dan con cierta frecuencia, más aún en pequeños centros urbanos donde el control y monitoreo es menor.

En la localidad existe únicamente una estación de servicio, ubicada en la entrada a la misma. De acuerdo con los datos brindados por residentes de la localidad, posee una antigüedad de 35 años, aunque fue remodelada y acondicionada hace 20

años. La causa más probable de contaminación en estos casos es la rotura de los tanques de almacenamiento subterráneos (dentro de los primeros 4 m de la zona no saturada) o sus cañerías, provocando el vertido y transporte por disolución de hidrocarburos a la zona no saturada y posteriormente al acuífero. Por lo anteriormente expuesto, se considerará una carga hidráulica de 0,64 mm/día (equivalente a la recarga por agua de lluvia) y una posibilidad de ocurrencia de 0,057 año<sup>-1</sup> (USEPA, 1986), utilizando como indicador los hidrocarburos livianos (Figura 5).

### Derrames accidentales (Da)

Dentro de esta categoría se puede considerar el transporte de sustancias peligrosas y altamente contaminantes, como pueden ser plaguicidas, combustibles, aceites, químicos, etc., teniendo en cuenta tanto rutas y caminos como terminales de carga y descarga. Estos eventos son de un gran impacto puntual pero escasa probabilidad de ocurrencia, con una afectación inmediata. Para el caso de estudio se consideró un derrame producido por un camión de transporte de plaguicidas retenidos en la zona no saturada, por lo que su transporte se daría por lixiviación en la recarga en tránsito (Figura 5).

De acuerdo a lo anterior, las valoraciones de las variables semi-independientes de cada indicador considerado, según el caso, son expuestas en la Figura 5.

En la Tabla 1 se muestran los valores de ICC calculados mediante la sumatoria de cada característica semi-independiente multiplicada por un factor de 0,25. Los valores obtenidos se clasifican de moderados a elevados.

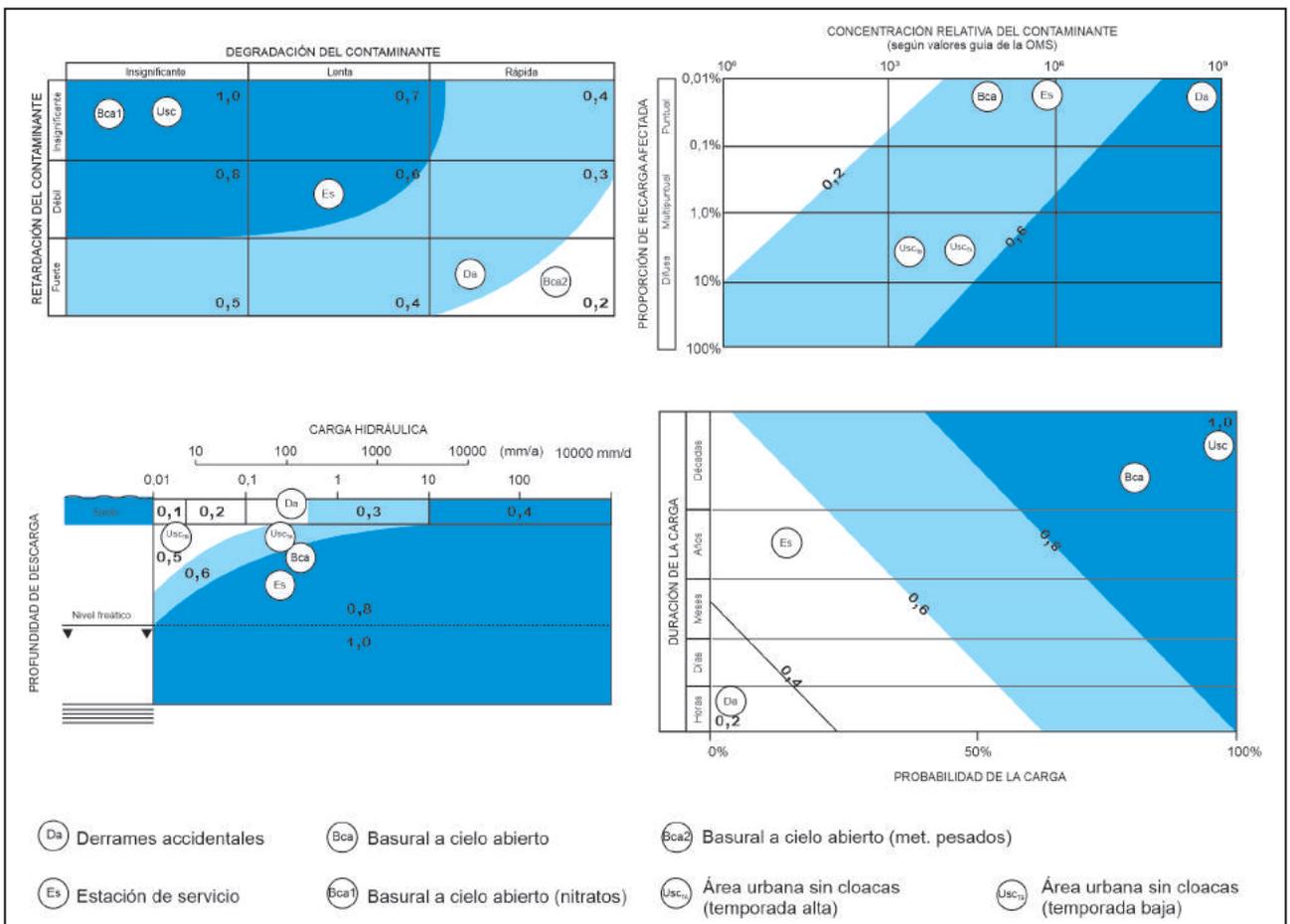


Figura 5. Caracterización de las cargas contaminantes inventariadas.

Tabla 1. Caracterización de las cargas contaminantes.

Tipo de Actividad		Contaminante considerado	Clasificación del contaminante				ICC	
			Clase	Intensidad	Modo	Duración	Valor calculado	Clasificación
Bca	Bca1	NO <sub>3</sub>	1	0,3	0,8	0,9	0,75	Elevado
	Bca2	Metales pesados	0,2	0,3	0,8	0,9	0,52	Moderado
Usc	Usc <sub>TA</sub>	NO <sub>3</sub>	1	0,5	0,6	1	0,78	Elevado
	Usc <sub>TB</sub>	NO <sub>3</sub>	1	0,4	0,5	1	0,73	Elevado
Es		Hidrocarburos livianos	0,6	0,4	0,8	0,5	0,58	Moderado
Da		Plaguicidas	0,2	0,7	0,3	0,2	0,35	Moderado

## CONCLUSIONES

A partir del análisis del inventario de actividades potencialmente contaminantes y su valoración según la metodología propuesta, se expone que todas las actividades consideradas poseen un ICC de moderado a elevado.

Las actividades que presentan una mayor problemática, en base a su clasificación, son el basural a cielo abierto y la falta de redes cloacales. Con respecto al primero, la ausencia de una barrera impermeable o geotextil, sumado a falta de control y separación de los residuos, representa un desafío que debería ser abordado cuanto antes. La utilización de pozos “negros” (en muchos casos sin cámaras sépticas) por la totalidad de los inmuebles, implica una fuente de contaminación multipuntual-difusa, que se incrementará con el aumento poblacional del área. Cabe destacar que en este caso, tanto en temporada baja como alta, el ICC clasifica como elevado.

La única actividad que posee un monitoreo periódico es la estación de servicio, de acuerdo a la legislación vigente de la Secretaría de Energía. Esto expone la falta de control sobre el

resto de las actividades inventariadas, lo cual implica un riesgo no solo ambiental, sino a la salud pública (OMS, 2019).

Dadas las características geológicas e hidrogeológicas del área y de acuerdo al análisis efectuado en este estudio, queda en evidencia la falta de medidas de protección del único recurso de agua disponible para consumo humano en la localidad. Dicha situación atenta contra el acceso y disponibilidad al agua potable y al saneamiento por parte de la población, el cual es considerado un derecho humano básico (COHIFE, 2003; ONU, 2010).

Como medidas para la preservación y protección del recurso hídrico se plantea la necesidad de contar con un relleno sanitario impermeabilizado, donde los residuos sólidos sean depositados de manera controlada, sumado a campañas de reciclado y clasificación de residuos urbanos. A su vez, se recomienda la instalación de biodigestores y/o cámaras sépticas que permitan un pretratamiento básico de los efluentes domiciliarios, antes de ser descargados en la zona no saturada.

Los lineamientos básicos aquí expuestos pueden resultar extrapolables a numerosas localidades que presenten características geológicas, hidrogeológicas similares y utilicen el recurso hídrico subterráneo para abastecimiento de su población.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ABSA, 2019.

Cuidemos el agua, ABSA cambia con vos.

Folleto Online En: [https://www.aguasbonaerenses.com.ar/recursos/articulos\\_archivos/528\\_1923.pdf](https://www.aguasbonaerenses.com.ar/recursos/articulos_archivos/528_1923.pdf). Último ingreso 18/02/2020.

AUGE, M., 2004.

Regiones Hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fé. Ciudad de La Plata. 112 pp.

EBook: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/RegionesHidrogeol.pdf>.

ARAMAYO, S.A., SCHILLIZI, R.A., Y GUTIÉRREZ TÉLLEZ, B.M. 2002.

Evolución paleoambiental del Cuaternario en la Costa Atlántica del sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Rev. Soc. Geol. España* 15 (1-2): 95-104.

CARRICA, J., 1993.

Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI:243-248*.

CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO, 1969.

Ley 18.284, Capítulo XII: “Bebidas hídricas, agua y agua gasificada”, artículo 982 (actualizado en 2019). 60 pp. Ministerio de Salud y Acción Social, Argentina.

Disponibile en: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/caa\\_capitulo\\_xii\\_aguas\\_actualiz\\_2019-11.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/caa_capitulo_xii_aguas_actualiz_2019-11.pdf)

- COHIFE (CONSEJO HÍDRICO FEDERAL), 2003.  
Principios rectores de política hídrica de la Argentina.  
*Fundamentos del Acuerdo Federal del Agua*. 20 pp.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, 1976.  
Hidrología Subterránea,  
*Ediciones Omega, Barcelona*. ISBN 84-282-0446-2
- DYMAS, 1974.  
Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000.  
*DYMAS (CFI-PBA), La Plata, Inédito*.
- ESPINOSA, M., BOCANEGRA, E., DEL RÍO, J. L., ZAMORA, A. 2009.  
Evaluación de la calidad del agua subterránea en Mar de las Pampas, provincia de Buenos Aires.  
Contaminación y protección de recursos hídricos.  
*VI Congreso Argentino de Hidrogeología. Santa Rosa, La Pampa*.
- FIDALGO, F., COLADO, U.R. Y DE FRANCESCO, F. O., (1975).  
Sobre intrusiones marinas cuaternarias en los partidos de Castelli, Chascomús y Magdalena  
(Provincia de Buenos Aires).  
*5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 225-240, Carlos Paz*.
- FOSTER, S., 1987.  
Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy.  
*Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands*.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M., PARIS, M., 2002.  
Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies.  
*World Bank, WMATE. Washington, 101 pp*.
- HENRY, J.G. Y HEINKE, G.W., 1996.  
Ingeniería Ambiental.  
*Segunda Edición. Prentice Hall. México. 778 pp*.
- INDEC, 2010.  
Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010.  
*Disponible en: <https://www.indec.gob.ar/>*.
- KRUSE, E. 2015.  
Uso del agua subterránea y desarrollo sustentable.  
*Núcleos; Buenos Aires; p. 30- 36*.
- LEXOW, C., DI MARTINO, C., LAFONT, D., ALBOUY, R., MARCOS, A., 2016.  
Identificación y cuantificación de la carga contaminante al acuífero freático en la localidad de Monte Hermoso.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 37: 37-44. Buenos Aires*.
- MERLOTTO, A., PICCOLO, M. C. Y BÉRTOLA, G. R. 2012.  
Crecimiento urbano y cambios del uso/ cobertura del suelo en las ciudades de Necochea y Quequén,  
Buenos Aires, Argentina.  
*REVISTA DE GEOGRAFÍA NORTE GRANDE, 53: 159-176. ISSN 0718-3402*.
- O.M.S (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD), 2019.  
Seguridad del paciente Agua, saneamiento e higiene en los centros sanitarios.  
*Informe del Director General. 72.ª Asamblea Mundial de la Salud. Disponible en: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/328713/A72\\_27-sp.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/328713/A72_27-sp.pdf)*.
- O.N.U. (ASAMBLEA GENERAL DE NACIONES UNIDAS), 2010.  
Resolución A/RES/64/292. El derecho humano al agua y saneamiento. Aprobada el 28 julio 2010.  
*Disponible en: [https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S)*.
- PERANOVICH, A. (2019).  
Enfermedades transmitidas por el agua en Argentina y Brasil a principios del siglo XXI.  
*Saude soc. vol.28 no.2 São Paulo Apr./June 2019*.
- REVISTA HÁBITAT. 2014.  
Hábitat.  
*Publicación anual de la Sociedad de Fomento "Amigos de Pehuén-Có. N°42. Diciembre*.

- RUFFO, A. G., BASTIANELLI, N Y LAFONT, D., 2017.  
Gestión del recurso hídrico subterráneo en la localidad balnearia de Pehuen-Có (Provincia de Buenos Aires). *Peligro a la contaminación del acuífero freático. "Cuarto Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la provincia de Buenos Aires". Universidad Nacional de Quilmes año 2017. Disponible en <https://digital.cic.gba.gob.ar/>.*
- RUFFO, A. G., ALBOUY, R., BASTIANELLI, N., CARRICA J., 2018.  
Humedales en la franja de médanos costeros entre monte hermoso y Pehuen Co, provincia de Buenos Aires, Argentina. Tipificación hidrológica. *"XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, X Congreso Argentino de Hidrogeología, VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea". E-Book: El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Humedales Vinculados al Agua Subterránea. Salta 2018. ISBN 978-987-633-537-9. 133-140.*
- THORNTHWAITE, C. W., (1948).  
An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev. Vol. 38. 55-94. En Custodio y Llamas 1976. Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, Barcelona. ISBN 84-282-0446-2. 323-324.*
- UNESCO, (2019).  
WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO."*
- USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY), 1986.  
Hazardous waste tank failure model: Description of methodology. *EPA 530-SW- 86-012.*
- USEPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY), 1991.  
Guide for conducting contaminant inventories for public drinking water supplies: technical assistance document. *Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington D.C.*
- ZAVALA, C. 1993.  
Estratigrafía de la localidad de la Farola de Monte Hermoso (Plioceno - Reciente). Provincia de Buenos Aires. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos Actas Tomo II: 228 - 235.*



# 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.; Marcinius, 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 & A.P. Cunha (Eds.), *7th International Congress International Association of Engineering Geology*, (vol III: 2059-2064). Rotterdam, Holanda: Balkema.

- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo 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 01-04-2021):**

**Para Argentina:**

- Compra de número vigente: **1750** Pesos
- Compra de número atrasado: **2300** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **500** 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 01-04-2021):**

**Para Argentina:**

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **3500** Pesos
- Suscripción Instituciones: **14000** Pesos
- Compra de número atrasado: **2300** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **500** 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*



**8 - 10 de Septiembre de 2021 · 8th - 10th September 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)**

**Tercera Circular / Third Newsletter**

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

### Invitación

El Comité Organizador tiene el gusto de invitarles a participar de la 1º Conferencia Regional Sudamericana de IAEG y 2º Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, a desarrollarse con modalidad VIRTUAL del 8 al 10 de septiembre de 2021.

El desarrollo del evento en modalidad virtual ha sido una decisión que se ajusta a las recomendaciones y protocolos establecidos por las autoridades sanitarias. La imposibilidad de llevar adelante un evento presencial nos ha obligado a ajustar la totalidad de las actividades originalmente previstas en el evento (Reunión del Comité Ejecutivo y del Consejo de la International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), cursos y excursiones). Sin embargo, consideramos que la virtualidad propiciará un grato encuentro de distintos colegas nacionales y extranjeros, aumentando la diversidad de trabajos, temáticas y ponencias.

El programa incluye la presencia de conferencistas de diversas nacionalidades y la presentación oral de artículos por parte de sus autores.

El lema elegido, GEOLOGÍA APLICADA AL DESARROLLO DE LA SOCIEDAD, se vincula con la idea de que toda ciencia se valida cuando aporta a la mejora en la calidad de vida de quienes habitamos este planeta. Esta idea ha sido recibida de buen modo por la comunidad que nos ha respaldado mediante el envío de decenas de resúmenes y trabajos, a pesar de las dificultades que la actual situación plantea.

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

### Invitation

*The Organizing Committee is pleased to invite you to participate in the 1st IAEG South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress of Geology Applied to Engineering and the Environment, to be held VIRTUAL from September 8 to 10, 2021.*

*Given the existing pandemic situation, the development of the event in virtual mode has been a decision that conforms to the recommendations and protocols established by health authorities. The impediment of carrying out a face-to-face event without risks has forced us to adjust all the activities originally planned for the event (Meeting of the Executive Committee and the Council of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), courses and excursions). However, we consider that virtuality will promote a pleasant meeting of different national and foreign colleagues, increasing the diversity of works, topics and presentations. The event includes the presence of speakers of various nationalities and the oral presentation of articles by their authors.*

*The chosen motto, GEOLOGY APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF SOCIETY, is linked to the idea that all science is validated when it contributes to improving the quality of life of those who inhabit this planet. This idea has been well received by the community that by sending dozens of abstracts and papers has supported us, despite the difficulties that the current situation poses.*

*The event marks the 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.*

## 1st iaeg South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress of Geology Applied to Engineering and the Environment

**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.

**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. Marcilene Dantas Ferreira**

Universidad Federal de San Carlos (UFSCar) - Centro de Ciencias Exactas y Tecnología (CCET) - Departamento de Ingeniería Civil (DECiv) - Área de Geología y Geotecnia. Coordinadora de Ubuntu- Acciones de Extensión y su relevancia técnica, ambiental y social en la práctica del Bien Común

**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**

	<b>MIÉRCOLES 8</b>	<b>JUEVES 9</b>	<b>VIERNES 10</b>
9:00 - 13:00	Apertura	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas
	Conferencia inaugural	Conferencia	Conferencia
	Coffee break	Coffee break	Coffee break
	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas
13:00 - 14:30	Almuerzo		
14:30 - 18:00	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas
	Conferencia	Conferencia	Conferencia
	Coffee break	Coffee break	Coffee break
	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas	Sesiones técnicas
			Clausura

**Program**

	<b>9/08 WEDNESDAY</b>	<b>9/09 THURSDAY</b>	<b>9/10 FRIDAY</b>
9:00 - 13:00	Opening	Technical session	Technical session
	Opening Conference	Conference	Conference
	Coffee break	Coffee break	Coffee break
	Technical session	Technical session	Technical session
13:00 - 14:30	Lunch		
14:30 - 18:00	Technical session	Technical session	Technical session
	Conference	Conference	Conference
	Coffee break	Coffee break	Coffee break
	Technical session	Technical session	Technical session
			Closing

**1st iaeg South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress of Geology Applied to Engineering and the Environment**

**Comité Académico / Academic Committee****Coordinadores / Coordinators****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)

**Dr. Ing. Marcelo E. Zeballos**

Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Construcciones Civiles. Área de Geotecnia. Universidad Nacional de Córdoba

**Miembros/Members****Gonzalo Aiassa**

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba

**Pedro Arrúa**

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba

**María Heloisa Barros de Oliveira Frascá.**

MHB Serviços Geológicos

**Germán R. Bértola**

Universidad Nacional de Mar del Plata

**Jorge Carrica**

Universidad Nacional del Sur Bahía Blanca

**Alberto Tomás Caselli**

Universidad Nacional de Río Negro

**Helder Chaminé**

Instituto Superior de Engenharia do Porto Portugal

**Diego Fridman**

Director de Investigaciones FUNCEI (Fundación del Centro de Estudios Infectológicos).

**Paz Fernández Oliveras**

Universidad de Granada. España

**Luis Mario Giaconi**

Universidad Nacional de La Plata

**Mauricio Giambastiani**

Universidad Nacional de La Rioja

**Daniel Gonzalo Jerez**

Universidad Nacional de La Rioja

**Débora Lev**

Ministerio de Salud de la Nación- Dirección de Salud Perinatal y Niñez

**Rubén A. López**

Universidad de Buenos Aires

**Malva Mancuso**

Universidade Federal de Santa Maria Brasil

**Marcos Damián Mare**

Universidad Nacional del Comahue

**Telma Musso**

Universidad Nacional del Comahue

**Adriana Niz**

Universidad Nacional de La Rioja

**Adriana Otero**

Universidad Nacional del Comahue

**Marcela Pérez**

Universidad Nacional del Litoral

**Gisela Pettinari**

Universidad Nacional del Comahue

**Ricardo J. Rocca**

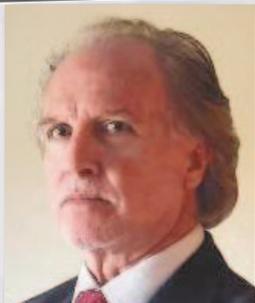
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba

**Daniel A. Sales**

Universidad Nacional de San Luis

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

Tenemos el gusto de presentarles las conferencias del evento.  
*It's a great pleasure for us to announce the conferences of the event.*

**Obras subterráneas y riesgo geológico / Underground works and geological risk**

**Dr. Raúl Sarra Pistone**

Miembro del Consejo Técnico-Científico de COBA /  
*Member of the Technical-Scientific Council of COBA,*  
*Engineering and Environmental Consultants.*  
 Presidente de la Comisión Portuguesa de Túneles /  
*President of the Portuguese Tunnel Commission*

**La geología aplicada a la ingeniería de presas 45 años de experiencia en Argentina  
 Geology applied to dam engineering 45 years of experience in argentina**
**Ing. /Eng. Juan Antonio Bustinza**

Socio Gerente TECNORED Ingeniería S.R.L /  
*Managing partner TECNORED Ingeniería S.R.L*  
 Asesor Técnico del BID / *BID Technical Advisor*


**Rocas ornamentales argentinas: belleza natural / Argentine ornamental rocks: natural beauty**

**Arquitecta/Architect Leonor M. L. Trucco**

Dirección de Geología, Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba/  
*Directorate of Geology, Ministry of Mining of the Province of Córdoba*  
 Responsable del Programa Promoción Uso de la Piedra Natural de Córdoba/  
*Responsible for the Program for the Promotion of the Use*  
*of Natural Stone in Córdoba*  
 Ex Coordinadora del PROAr. Programa Roca Ornamental  
 de Argentina (2016-2019) /  
*Ex-Coordinator of the PROAr. Ornamental Rock Program*  
*of Argentina (2016-2019)*

**Geólogo/Geologist Daniel Gonzalo Jerez**

Universidad Nacional de La Rioja / *National University of La Rioja*  
 Pan American Silver Argentina  
 Ex Director Nacional de Promoción Minera.  
 Responsable PROAr (2016-2019). /  
*National Director of Mining Promotion (2016-2019).*  
*Responsible PROAr*


**1st iaeg South American Regional Conference and 2nd Argentine Congress of Geology Applied to Engineering and the Environment**

Conferencias / *Keynote Speakers*

**Infraestructura natural o verde para enfrentar los efectos de eventos extremos, beneficios y propuesta de aplicación en Lima, Perú**

*Natural or green infrastructure to face the effects of extreme events, benefits and proposal of application in Lima, Peru*



**Dra. Sandra Villacorta-Chambi**

Universidad Charles Darwin. Australia /  
*Charles Darwin University. Australia*  
Presidenta del grupo peruano de IAEG /  
*President IAEG Peruvian National Group*

**La importancia del monitoreo eficiente en las fundaciones de presas de embalse**

*The importance of efficient monitoring in reservoir dam foundations*

**Ing./Eng Alejandro Pujol**

Consultor independiente/  
*Independent consultant*  
Especialista en seguridad de presas/  
*Dam Safety Specialist*



**Gestión Integral del Riesgo de Desastre: un enlace imprescindible entre las geociencias y la sociedad**

*Integrated Disaster Risk Management: an essential link between geosciences and society*

**Dra. Irasema Alcántara Ayala**

Investigadora y Ex-Directora del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
*Researcher and ExDirector of the Institute of Geography of the National Autonomous University of Mexico (UNAM)*



Conferencias / *Keynote Speakers*

**El riesgo hídrico en áreas con actividad hidrocarburífera de la Patagonia extrandina**  
*The water risk in areas with hydrocarbon activity in extra-Andean Patagonia*



**Lic. en Ciencias Geológicas/Geologist**  
**José Ricardo Gatica**

Profesor Adjunto de la cátedra de Geotecnia  
 para la carrera de Geología - Facultad de Ingeniería  
 Universidad Nacional de Comahue - Neuquén Capital  
*Adjunct Professor of the Department of Geotechnics  
 for the career of Geology - Faculty of Engineering  
 National University of Comahue - Neuquén Capital*

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*

## Publicación Oficial del Congreso / *Official Publication of the Congress*

### Trabajos

El acta de resúmenes y trabajos completos se publicará en formato digital y estará disponible para su descarga en la web para participantes

### Works

*The abstracts and complete works proceedings will be available for download on the website for participants.*

### Envío de Trabajos Completos / *Submission of Complete Works*



**Fechas Clave:** 28 de Junio

**Key Dates:** June 28th, 2021

Todos los autores cuyos resúmenes hayan sido aprobados podrán enviar sus trabajos completos para ser incorporados en la publicación oficial del evento. Los trabajos serán evaluados por revisores y una vez aceptados serán incorporados al libro de actas.

Los autores deberán cancelar el pago de la inscripción correspondiente para la incorporación de resúmenes y trabajos completos al libro de actas

Les recordamos que el envío de artículos debe llevarse a cabo utilizando de referencia la respectiva plantilla, ajustándose al formato indicado sin excepción.

<https://iaegsa2021.org/resumenes-y-articulos/articulos/>

Authors whose abstracts have been approved can send their complete work for inclusion in the official publication of the event. Articles will be evaluated by reviewers and once accepted they will be included in the final proceedings.

Authors must cancel the corresponding registration fee to include their abstracts and complete works in the final proceedings.

We remind you that the submission of articles should be carried out using the respective templates as a reference, conforming to the indicated format without exception.

<https://iaegsa2021.org/en/abstracts-and-articles/papers/>

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

### Montos de Inscripción

Categorías / Fechas	Inscripción Temprana Hasta 30 De Junio	Inscripción Regular Desde 1º Julio
<i>Autores Internacionales</i>	160 - US\$	200 - US\$
<i>Autores Internacionales (con convenio)</i>	120 - US\$	150 - US\$
<i>Asistentes Internacionales (con convenio)</i>	95 - US\$	120 - US\$
<i>Autores Nacionales</i>	7.000 - AR\$	8.400 - AR\$
<i>Autores Nacionales (socios/con convenio)</i>	5.600 - AR\$	6.700 - AR\$
<i>Asistentes</i>	5.000 - AR\$	6.000 - AR\$
<i>Asistentes (socios/con convenio)</i>	4.000 - AR\$	4.800 - AR\$
<i>Estudiante de grado (asistentes)</i>	2.500 - AR\$	3.000 - AR\$

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

- Socio/con Convenio: Se considera en esta categoría a aquellos participantes (autores o asistentes) que sean socios de ASAGAI, o de alguna sociedad/institución con la que se tenga un convenio vigente. En este último caso, se deberá acreditar la pertenencia con la documentación correspondiente.
- Cada inscripción habilita a: participar del evento durante los tres días de duración, acceder al libro de resúmenes y a las presentaciones a través del canal de YouTube de ASAGAI, al finalizar el evento.
- Cada autor/coautor, Nacional o Internacional, contará, además, con un certificado de participación como Expositor/a.
- Para Asistentes y Estudiantes de grado se emitirá un certificado de participación en calidad de Asistente.
- Los estudiantes de grado deberán remitir una constancia de su condición de alumnos regular a [iaegsa2021@asagai.org.ar](mailto:iaegsa2021@asagai.org.ar)
- Cada inscripción en calidad de Autor habilita al envío de un máximo de 2 (dos) artículos como primer autor.
- Cuando la cantidad de autores del artículo sean de 4 (cuatro) o más, se deberán abonar dos inscripciones. Las mismas habilitan al envío de dos artículos.

**1st IAEG South American Regional Conference and  
2nd Argentine Congress of Geology Applied to Engineering and the Environment**

**Registration Fees**

<b>Categories / Dates</b>	<b>Early Bird Registration Before/on 30th June</b>	<b>Regular Registration On/after 1st July</b>
<i>International Authors</i>	160 - US\$	200 - US\$
<i>International Authors (Associated members)</i>	120 - US\$	150 - US\$
<i>International Assistants (Associated members)</i>	95 - US\$	120 - US\$
<i>National Authors</i>	7,000 - AR\$	8,400 - AR\$
<i>National Authors (Associated members)</i>	5,600 - AR\$	6,700 - AR\$
<i>Assistants</i>	5,000 - AR\$	6,000 - AR\$
<i>Assistants (Associated members)</i>	4,000 - AR\$	4,800 - AR\$
<i>Undergraduate Students (assistants)</i>	2,500 - AR\$	3,000 - AR\$

- *Associated Member: This category includes all participants (authors or assistants) that are partner members of ASAGAI, or of any society/institution with current agreement. In the latter case, membership must be proven with the corresponding documentation.*
- *Each registration enables to: participate in the three-days virtual event, access to the abstract book and the presentations through the ASAGAI YouTube channel, at the end of the conference.*
- *Each author (national or international) will also have a certificate of participation as an Exhibitor.*
- *For Assistants and undergraduate students, a certificate of participation will be issued as Assistant.*
- *Undergraduate students must send proof of their status as regular students to [iaegsa2021@asagai.org.ar](mailto:iaegsa2021@asagai.org.ar)*
- *Each registration as Author enables the submission of a maximum of 2 (two) articles as the first author.*
- *In case that the number of authors of the article is 4 (four) or more, two registrations must be paid. They enable the sending of two articles.*

**Inscripciones:** <https://iaegsa2021.org/inscripcion/>

**Registration:** <https://iaegsa2021.org/en/registration/>

Sponsor Premium / Premium Sponsor



PAN AMERICAN  
— SILVER —

ARGENTINA

Adhieren / Sponsor



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS y NATURALES



FaIn-UNCo  
Facultad de Ingeniería



Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica



Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Córdoba



I H L L A



Asociación Chilena de  
Ingeniería Geológica



RED DE ACADÉMICOS  
POR EL DESARROLLO DE UNA  
MINERÍA SUSTENTABLE



CAMARA ARGENTINA  
DE CONSULTORAS  
DE INGENIERIA



Asociación Internacional de Hidrogeólogos



Grupo Argentino



Declarado de Interés Municipal / *Declared of Municipal Interest*



Municipalidad  
de Córdoba

## Oportunidades de Patrocinio / *Sponsors*

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 / *Commercial Contact:*

[aw@tradeshowsa.com.ar](mailto:aw@tradeshowsa.com.ar)



Página Web / *Web Page:*

<https://iaegsa2021.org/>

<https://iaegsa2021.org/en>

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2021  
Editada en Argentina

Se terminó de editar en Junio de 2021



# ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA

Ecuaciones de calibración del sensor DECAGON EC-5 para la estimación de la humedad en suelos de la Pampa Deprimida

*Fajardo González, Luisa Fernanda - Entraigas, Ilda - Dietrich, Sebastián*

Factores que determinan la química del agua en manantiales de uso humano del noroeste de Chubut

*Kusch, Rodolfo José - Pizzolon, Lino Arturo*

Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina

*Lanzaro, María Verónica - D'Elia, Mónica Patricia*

Mapa estratigráfico con fines geotécnicos de la ciudad de Córdoba

*Clariá, Juan José - Rouzaut, Sabrina - Ares, Mauricio - Eveling, Pablo*

Identificación y cuantificación del índice de carga contaminante al acuífero freático en el balneario Pehuen-có, Buenos Aires, Argentina

*Ruffo, Andrés Gabriel - Rey, Matías - Albouy, René*

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

