

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 49 • 2022

ISSN 2422-5703 (En línea)

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

editoresasagai@asagai.org.ar

EDITORIA ASOCIADA

Dra. Marcela Perez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Argentina

maperez@fich.unl.edu.ar

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Carlos Costa

Departamento de Geología

Universidad Nacional de San Luis

Argentina

costa@unsl.edu.ar

Lic. Luis Mario Giaconi

Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)

Universidad Nacional de La Plata

Argentina

lmgiaconi@gmail.com

Dr. Mauricio Giambastiani

Universidad Nacional de La Rioja

Argentina

mgiambastiani@unlar.edu.ar

Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo

Departamento de Geodinámica

Universidad Complutense de Madrid

España

vallejo@geo.ucm.es

Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé

Departamento de Engenharia Geotécnica

Politécnico do Porto

Portugal

hic@isep.ipp.pt

Dr. Clemente Irigaray Fernández

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Granada

España

clemente@ugr.es

Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental

Universidade Federal de Santa Maria

Brasil

malvamancuso@ufsm.br

Dra. Ofelia Tujchneider

Departamento de Hidrología y Ambiente

Universidad Nacional de El Litoral.

Santa Fe

Argentina

pichy@fich1.unl.edu.ar

Dr. Marcelo E. Zeballos

Área de Geotecnia

Departamento de Construcciones Civiles

Universidad Nacional de Córdoba

Argentina

marcelo.zeballos@unc.edu.ar

SECRETARIA

Dra. María Paula Bunicontro

IGEBA (CONICET-UBA)

Argentina

secretaria.editores@asagai.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 2022 - 2026

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Rubén Alvaro López</i>
SECRETARIA	<i>María Paula Bunicontro</i>
TESORERO	<i>Fabio Sergio Luna</i>
VOCAL TITULAR	<i>María Victoria Altinier</i>
VOCAL TITULAR	<i>Silvia Edith Castro Godoy</i>
VOCAL TITULAR	<i>Claudina Di Martino</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Enzo Andrés Vergini</i>
REVISORA DE CUENTAS TITULAR	<i>María Beatriz Ponce</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José Gabriel Salminci</i>
REVISORA DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Cristina Dapeña</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
Pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo contemplando las características del sistema hidrogeológico local. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina	Lanzaro, María Verónica	1
Análisis de las inundaciones en la cuenca superior y media del río Luján, provincia de Buenos Aires	Molero, Vanesa - Pereyra, Fernando X. - Marcomini, Silvia	15
Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la prospección de agua subterránea en un sector costero del sudoeste bonaerense, Argentina	Ruffo, Andrés G. - Rey, Matías - Albouy, E. René - Giorgi, Juan Manuel - Carrica, Lucía - Bastianelli, Nerea	29
Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos	Useche, Danny J. - Aiassa, Gonzalo M. - Arrua, Pedro A. - Eberhardt, Marcelo G.	37

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.

Aims and objectives

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

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

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

Authors Copyrights

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

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



Pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo contemplando las características del sistema hidrogeológico local. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina

Technical guidelines for the design of works with underground use considering the characteristics of the local hydrogeological system. The case of the city of Santa Fe, province of Santa Fe, Argentina

Lanzaro, María Verónica 

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 13 de julio de 2022

Resumen

El entramado edilicio y de infraestructura alojado en el subsuelo urbano se encuentra sometido a condicionantes de servicio que deben ser considerados en el proyecto de toda obra subterránea para su correcta ejecución, seguridad y funcionalidad. La falta de estanqueidad puede reducir severamente la durabilidad a largo plazo de las obras y afectar gravemente su uso planificado resultando en procesos peligrosos, costosos, difíciles de resolver o irreversibles.

A partir de un relevamiento de campo se detectaron en la ciudad de Santa Fe numerosas construcciones subterráneas con patologías edilicias relacionadas con ingreso de agua subterránea estacional, obras probablemente ejecutadas en periodos de niveles freáticos más bajos a los que luego han debido soportar, desconociendo el comportamiento del sistema hídrico subterráneo y la acción que el agua subterránea pudiera ejercer sobre la estructura; presentando además inadecuadas protecciones impermeables o incluso sin ellas.

Este trabajo tiene por objeto la definición de pautas técnicas a fin de contribuir a la protección y seguridad de obras subterráneas. Para ello se realizó una indagación exhaustiva de técnicas y sistemas de impermeabilización para obras subterráneas.

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

✉ mlanzaro@santafe.gov.ar

En cuanto a los requerimientos de proyecto y métodos o sistemas de impermeabilización para obras subterráneas se estudiaron las recomendaciones de una norma de la British Standards Institution denominada “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del

agua subterránea” (BS 8102: 2009). Y en cuanto a la seguridad estructural, para la determinación de la resistencia mecánica y estabilidad de estructuras, se analizó el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201, 2005 que integra el conjunto de reglamentos de seguridad estructural de construcciones civiles en el país.

El relevamiento de campo realizado en el área de estudio, se focalizó sobre diversas obras existentes con aprovechamiento subterráneo, incluyendo infraestructura edilicia y vial, infraestructura de redes subterráneas de servicios, y se recopilaron desde el año 2015, registros publicados en medios locales relacionados con casos de problemas geotécnicos/estructurales, hundimientos, socavones, y colapso de redes de la infraestructura de servicios en la ciudad.

El estudio y la integración de estos aspectos posibilitó el desarrollo de una guía técnica para que todo proyecto de obra subterránea sea resultado de una evaluación del entorno medioambiental; del medio hidrogeológico; de un diseño estructural apropiado e incluyendo sistemas de impermeabilización adecuados a la obra en análisis. El procedimiento de evaluación desarrollado se complementó con la generación de un catálogo de materiales disponibles en el país para impermeabilización subterránea clasificados conforme a la guía propuesta.

Estos resultados contribuirán a gestionar los condicionamientos o riesgos inherentes a las obras subterráneas, asumiendo la relación compleja existente entre el uso del suelo urbano y el medio hidrogeológico local.

Palabras clave: aguas subterráneas, áreas urbanas, obras subterráneas, protecciones impermeables.

Abstract

The building and infrastructure framework housed in the urban subsoil is subject to service conditions which must be considered in the project of all underground work for its correct execution, safety and functionality. The lack of tightness can severely reduce the long-term durability of the works and seriously affect their planned use resulting in dangerous, expensive, difficult to solve or irreversible processes.

From a field survey, numerous underground constructions with building pathologies related to seasonal groundwater entry were detected in the city of Santa Fe, works probably carried out in periods of lower groundwater levels than those that later had to withstand, ignoring the behavior of the underground water system and the action that the underground water could exert on the structure; also presenting inadequate waterproof protections or even without them.

The purpose of this work is to define technical guidelines in order to contribute to the protection and safety of underground works. To this end, an exhaustive investigation of waterproofing techniques and systems for underground works.

Regarding the project requirements and methods or waterproofing systems for underground works, the recommendations of a standard of the British Standards Institution called “Code of practice for protection of below ground structures against the action of groundwater” (BS 8102: 2009). And in terms of structural safety, for the determination of the mechanical resistance and stability of structures, the Argentine Regulation of Concrete Structures CIRSOC 201, 2005 was analyzed, which integrates the set of structural safety regulations of civil constructions in the country.

The field survey carried out in the study area focused on various existing works with underground use, including building infrastructure, roads and underground service networks, and since 2015, records published in local media related to cases of geotechnical/structural problems, subsidence, sinkholes, and collapse of service infrastructure networks in the city.

The study and integration of these aspects made it possible to develop a technical guide so that every underground work project is the result of an environmental assessment; the hydrogeological environment; of an appropriate structural design and including adequate waterproofing systems for the work under analysis. The developed evaluation procedure was complemented with the generation of a catalog of materials available in the country for underground waterproofing classified according to the proposed guide.

These results will contribute to managing the conditions or risks inherent to underground works, assuming the complex relationship between the use of urban land and the local hydrogeological environment.

Keywords: groundwater, urban areas, underground constructions, waterproof protections.

INTRODUCCIÓN

El entramado edilicio y de infraestructura subterránea alojado en el subsuelo de las áreas urbanas se encuentra sometido a diversos condicionantes de servicio o de estrés por la exposición al entorno medioambiental en cuanto a la agresividad química, física y biológica; al entorno hidrogeológico; y en relación con

un diseño estructural apropiado a las particularidades del tipo de obra y a la acción que el agua subterránea pudiera ejercer sobre la misma (Chilton, 1997; Dávila Pórcel & de León Gómez, 2011; Gebremedhin, Tesfahunegn & Solomon, 2013; Lerner, 1990 y 1997; Vázquez-Suñé et al., 2005; Vázquez Suñé, Sánchez-Vila, Carrera & Marizza, 1997; entre otros).

Por otra parte, las obras subterráneas requieren parámetros elevados de calidad e ingeniería y poseen una complejidad técnico-constructiva relacionada no solo con su propia materialidad sino con las excavaciones y su cimentación profunda. En todos los casos, si se ejecuta una excavación cerca o por debajo del nivel freático existe riesgo de inundación, filtración de agua e inestabilidad para la obra y el entorno (*Foster et al., 1998*). La interacción del agua subterránea y la obra es importante no solo durante la ejecución sino también a lo largo de toda su vida útil (*Custodio, 2004; Shanahan, 2009*). Además de la seguridad estructural, se requieren protecciones adicionales, ya que la falta de estanqueidad afecta severamente la durabilidad a largo plazo y el uso planificado de las obras.

Estudios previos realizados en la ciudad de Santa Fe (*Lanzaro & D'Elia, 2021*) permitieron establecer relaciones entre el sistema acuífero que subyace a la ciudad y las construcciones subterráneas existentes, como fundaciones, recintos subterráneos y redes de la infraestructura de servicios.

El objetivo de este trabajo es definir pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo a fin de contribuir a la protección y seguridad de las obras subterráneas desde el inicio de un proyecto.

ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, capital de la Provincia de Santa Fe, se ubica en el centro-este de la República Argentina, en la región geográfica denominada llanura pampeana.

El área urbana de la ciudad, que constituye el área de estudio abarca 80,4km² (Figura 1). La ciudad está emplazada entre los valles de inundación de los ríos Paraná y Salado, con crecidas máximas históricas del río Paraná en los años 1977, 1983, 1987 y del río Salado en 1973, 2003.

La expansión urbana fue ocupando terrenos inundables de los valles de inundación, lo que llevó a generar un sistema de protección contra inundaciones que implicó el relleno de zonas bajas y modificó significativamente el drenaje natural, transformando a la ciudad en un territorio vulnerable, expuesto a riesgos hídricos por las crecidas de los ríos, lluvias intensas o ambos fenómenos. Según estudios previos, el clima de la ciudad es templado y húmedo, la temperatura media anual es del orden de 19°C y la precipitación media anual es de 1007mm (período 1901-2007). Se evidencia un aumento de la precipitación a partir de la década del '70, con precipitaciones anuales del orden de 900 a 1200mm, con persistencia de condiciones húmedas, eventos lluviosos muy intensos y arealmente concentrados (*Pagliano, 2008*).

La geología e hidrogeología del área de estudio se conoce de estudios regionales y locales, estos últimos a cargo del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral que ha implementado una red de monitoreo del agua subterránea (Figura 1). “La base de la secuencia sedimentaria de interés hidrogeológico posee arenas grises y arcillas verdes de la Formación Paraná. Superiamente, existen arenas y arenas gravosas de 30m

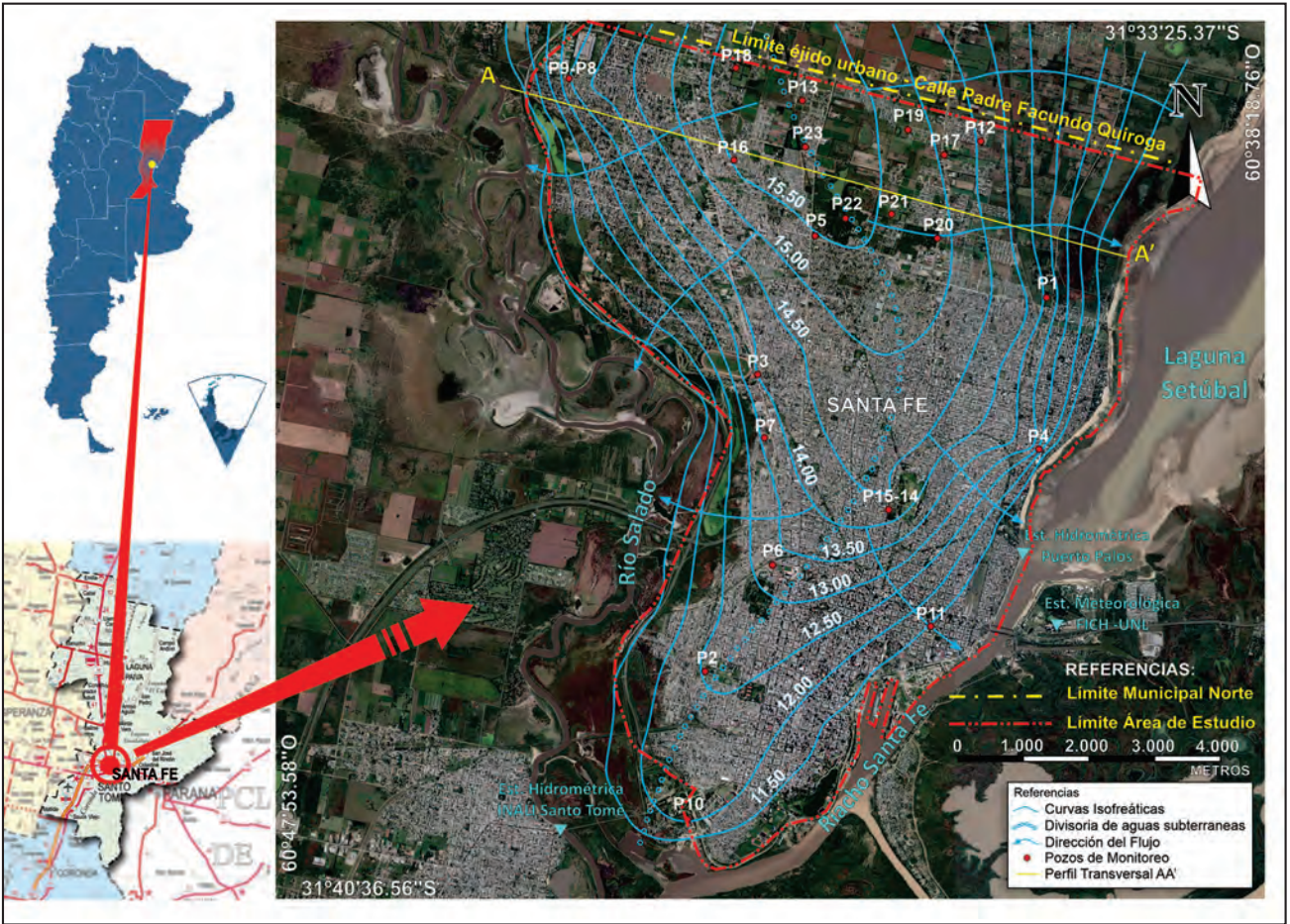


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de espesor promedio de la Formación Ituzaingó (conocida como Arenas “Puelches”). Sobre estas y hasta la superficie, se apoyan sedimentos cuaternarios de menor granulometría (arenas finas a limos, con arcillas) de origen eólico, de 6m de espesor promedio. Esta secuencia sedimentaria da lugar a un acuífero multicapa comportándose como libre con drenaje diferido” (Figura 2). La recarga del acuífero es principalmente por precipitaciones. La descarga se da hacia el río Salado y la laguna Setúbal. (D’Elia et al., 2011).

A partir de estudios locales realizados sobre áreas urbanas de alta consolidación se ha constatado que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70m y aproximadamente 8m desde el nivel del terreno durante el período 08/2008-08/2018.

Se observaron fundaciones de edificaciones y redes de cañerías de distinta jerarquía y a distintas profundidades, en gran parte alojadas en estratos de suelo en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Además, se comprobó la presencia de recintos subterráneos como las cocheras de edificios en altura en contacto con agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, sometidos a una acción de subpresión que ejerce el agua bajo la platea de fundación y a 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, cañerías como las de la red pluvial podrían correr riesgo de flotación, especialmente en momentos donde no transportan fluidos (Lanzaro & D’Elia, 2021) (Figura 3).

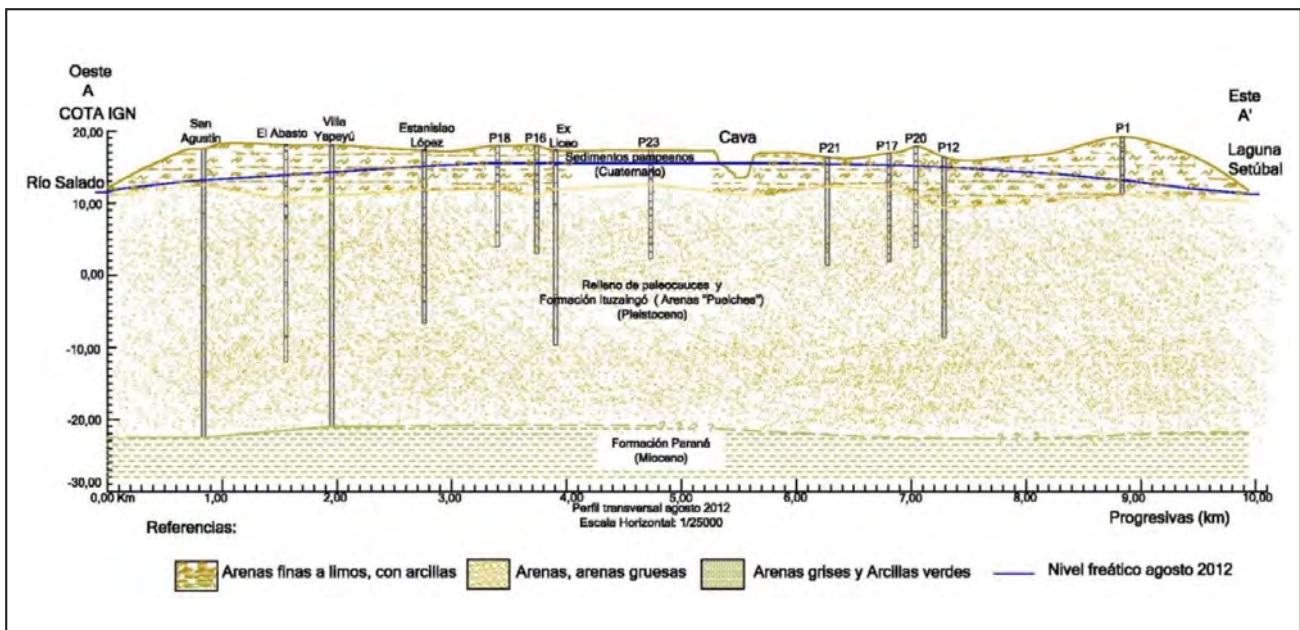


Figura 2. Perfil Estratigráfico A-A'. Fuente: D’Elia et al., 2011.

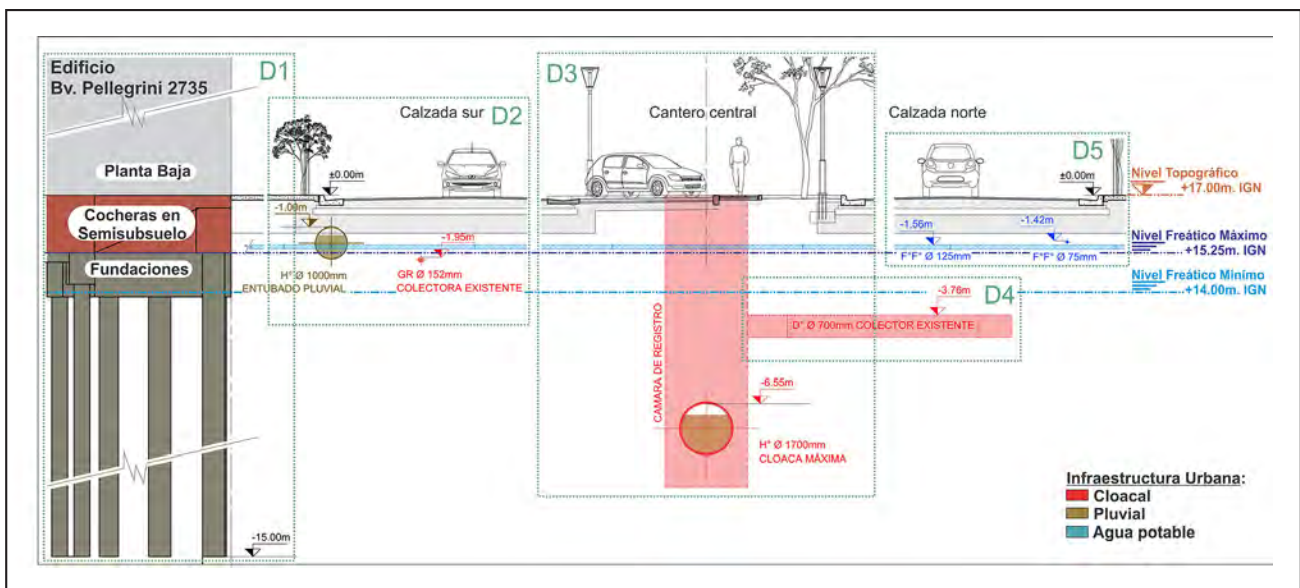


Figura 3. Subsuelo urbano y fluctuaciones de niveles freáticos. Fuente: Lanzaro & D’Elia, 2021.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de investigación se tuvieron en cuenta el marco normativo de aplicación en cuanto a lo técnico, legal, institucional, ambiental, de planificación urbana e ingeniería estructural para construcciones subterráneas; los aspectos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos incluyendo datos de mediciones de profundidades de nivel de agua subterránea, registros históricos de precipitaciones, de altura de ríos, eventos meteorológicos extraordinarios, parámetros químicos de muestras de agua subterránea, etc., a fin de conocer ciertos patrones de comportamiento y características del acuífero en el área de estudio.

Se realizó un relevamiento de campo en el área de estudio, de diversas obras existentes con aprovechamiento subterráneo, incluyendo infraestructura edilicia y vial, infraestructura de redes subterráneas de servicios, y se recopilaron desde el año 2015, registros publicados en medios locales relacionados con casos de problemas geotécnicos/estructurales, hundimientos, socavones, y colapso de redes de la infraestructura de servicios (Lanzaro, 2020).

Se contó con información de las trazas principales y secundarias de la red de la infraestructura de servicios de agua potable y cloacas; información de cuencas y subcuencas de aporte del Plan Director de Desagües Pluviales 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.

Este conjunto de datos disponibles fue sistematizado en una planilla de cálculo Excel (Microsoft, 2016). Los niveles de agua superficial y subterránea se referenciaron al “cero” del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se realizaron gráficos de la evolución de los niveles freáticos en el tiempo y su relación con los cuerpos de agua superficiales y con las precipitaciones locales; y se determinaron las fechas que se correspondían con períodos de niveles de agua subterránea máximos y mínimos. Contando con los datos del monitoreo de niveles del agua subterránea en los 23 pozos de monitoreo relevados por el GIG-FICH-UNL en la ciudad, se realizó un análisis espacial de los niveles freáticos para las fechas de niveles extremos a través de la elaboración de mapas de curvas isofreáticas utilizando el software Surfer 13 (Golden Software LLC, 2016). Estos mapas de curvas isofreáticas máximas y mínimas obtenidos, se integraron con las curvas de niveles topográficos de la ciudad, todas referidas al cero de IGN.

Mediante la utilización del software ArcGIS Desktop 10.5 (Esri Inc., 2016) se posicionaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) los resultados del relevamiento de construcciones con aprovechamiento subterráneo en la ciudad y los registros de casos de hundimientos, colapso de redes de la infraestructura de servicios y de problemas geotécnicos / estructurales lo que permitió reconocer las áreas de mayor ocurrencia de afectación en la infraestructura de servicios, información relevante a los fines de indagar en las causas que pudieran haber dado origen a las mismas y también para establecer relaciones con las fluctuaciones de niveles freáticos en sus distintos ciclos, con los tipos de suelo de cada sector y el grado de urbanización y consolidación urbana.

Sobre la base de los mapas de niveles freáticos extremos obtenidos, se realizó un análisis de mayor detalle en un sector de alta consolidación urbana de la ciudad seleccionado que

posibilitó generar un corte longitudinal del sector urbano seleccionado donde se incluyeron de manera georreferenciada los niveles isofreáticos máximos y mínimos, y los niveles topográficos (Lanzaro & D’Elia, 2021).

Sobre la base de información disponible del área de estudio, su sistematización e integración, se realizó una indagación exhaustiva de técnicas y sistemas de impermeabilización para obras subterráneas que posibilitó un nuevo análisis bajo un enfoque orientado a la definición de pautas y lineamientos para instrumentar acciones concretas en el desarrollo edilicio y urbano.

Este nuevo análisis sirvió de base para el desarrollo de una guía técnica para que todo proyecto de obra subterránea sea resultado de una evaluación del entorno medioambiental; del medio hidrogeológico; de un diseño estructural apropiado e incluyendo sistemas de impermeabilización adecuados a la obra en análisis. También se generó un catálogo de materiales disponibles en el país para impermeabilización subterránea clasificados conforme a la guía propuesta.

Se estudiaron las recomendaciones de la Norma BS 8102: 2009 “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del agua subterránea” (British Standards Institution, 2009), en cuanto a los requerimientos de proyecto y métodos o sistemas de impermeabilización para obras subterráneas. Y en cuanto a la seguridad estructural, para la determinación de la resistencia mecánica y estabilidad de estructuras, se analizó el (Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. CIRSOC 201, 2005) que integra el conjunto de reglamentos de seguridad estructural de construcciones civiles en el país.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La indagación técnica realizada, junto con la consideración de conceptos de mecánica de suelos, hidrogeología e ingeniería estructural relacionados con obras subterráneas, permitió establecer los principales factores y etapas que deben ser incluidos en cada proyecto, y ha dado lugar al desarrollo de una guía que brinda orientación sobre el cumplimiento de requisitos técnicos para una correcta ejecución de obras subterráneas. La Guía Técnica para el diseño de obras subterráneas define una secuencia de condicionantes que deben ser abordados (comprendidos y evaluados) para producir una protección óptima para cada obra subterránea (Figura 4).

La *Evaluación Preliminar (A)* incluye la caracterización de los condicionantes externos y específicos del medio en que se implanta la obra, considerando la influencia del entorno medioambiental y del medio hidrogeológico, el tipo de obra proyectada y su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea durante toda la etapa de ejecución y de su vida útil, de lo que surgirá el tipo de exposición al agua y a la humedad a que estará sometida la obra, y la sollicitación mecánica para la que deberá estar calculada su estructura resistente (Figura 5).

La evaluación del *entorno medioambiental e hidrogeológico* debe incluir la indagación sobre la presencia de sustancias agresivas en el agua y suelo de contacto (principalmente sulfatos y cloruros), las posibles variaciones de temperatura, la presencia de influencias biológicas agresivas y de gases en el suelo (estas tres últimas no son relevantes en el área de estudio).

A su vez, corresponde evaluar el tipo de obra proyectada y su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea durante el proceso de ejecución y a lo largo de toda la vida útil. En razón de ello, se debe evaluar el tipo de suelo, su permeabilidad y resistencia mecánica (aspectos que son considerados en los



Figura 4. Guía Técnica propuesta: secuencia de evaluación.

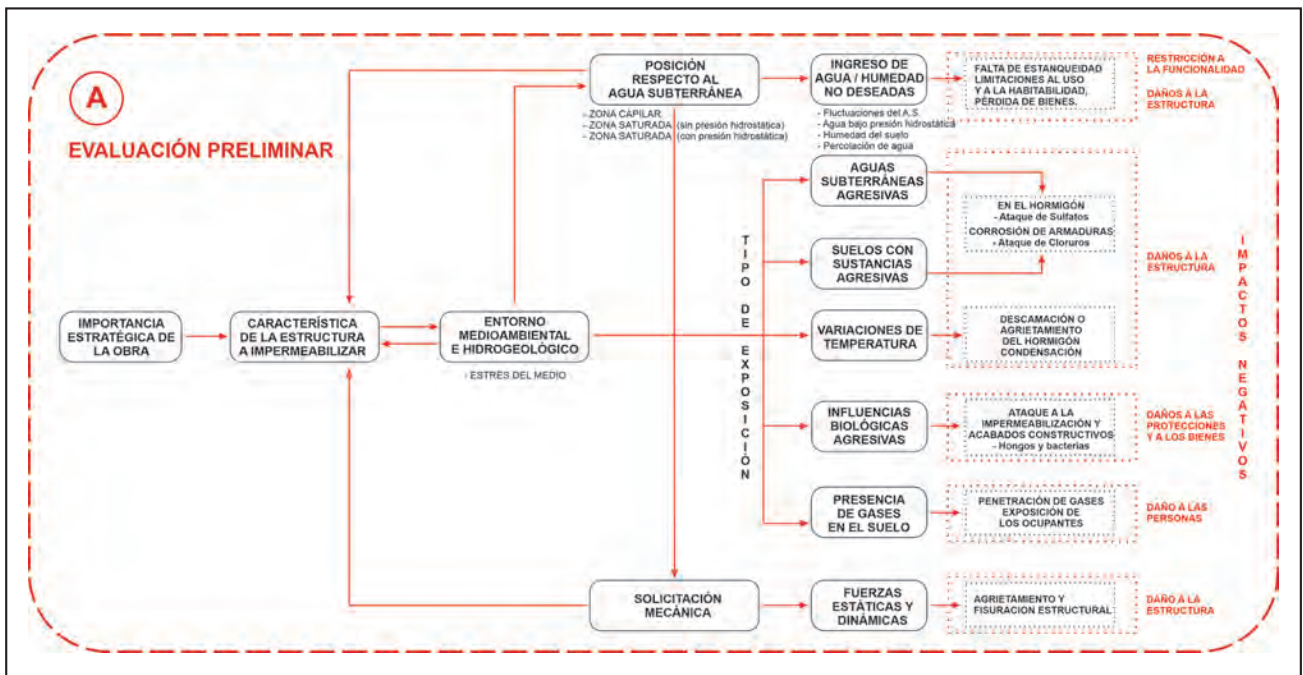


Figura 5. Guía Técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo. Evaluación Preliminar. Fuente: Lanzaro, 2020.

estudios geotécnicos), y especialmente la acción del agua subterránea sobre la estructura, la cual surgirá de la posición de la obra respecto de los niveles freáticos y de cuyo análisis se determinará el riesgo de filtración o inundación, siendo primordial establecer el rango probable de fluctuaciones a lo largo del tiempo (Figura 6).

Todos estos aspectos, especialmente los relacionados a la ubicación de la obra respecto a los niveles freáticos, también influirán en la *solicitud mecánica* que deberá soportar la obra, por lo cual una adecuada evaluación de los mismos posibilitará generar un diseño estructural apropiado que considere empujes hidrostáticos de subpresión, empujes laterales, asentamientos, peso propio, sobrecargas de uso, cargas de viento si correspondiera, levantamiento de fondo, flotación, etc., según sea el tipo de obra.

En la Figura 6 se pueden observar las situaciones probables de posicionamiento de una obra subterránea respecto del nivel freático. En el primer caso, la construcción se encuentra inmersa completa o parcialmente, aunque sea de manera intermitente. Esta situación trae como consecuencia que todos los intersticios o poros del suelo estén llenos de agua, lo que presiona contra los muros de la construcción (1), correspondiendo una

impermeabilización con técnicas de estanqueidad. En el segundo caso, la construcción está permanente y completamente por encima del nivel freático. Esta situación trae como consecuencia que el terreno no esté saturado de agua, y el agua en contacto con los muros de la construcción no ejerce presión sobre ellos (2). La acción del agua se limita al movimiento ascendente por capilaridad (3). La impermeabilización requerirá tratamiento superficial de los muros subterráneos y piso inferior; y tratamiento impermeable para bloquear el ascenso por capilaridad de la humedad en lo alto de los muros soterrados.

Para cada caso presentado, existe una serie de medidas a tomar en cuanto a las técnicas de impermeabilización a adoptar, basadas en el modo y en el tipo de impermeabilización en cuanto a los puntos siguientes:

- *Impermeabilización en franja capilar (3):* Debe ser efectuada en toda construcción subterránea, ya que se deben cerrar los poros del hormigón para evitar que la humedad llegue al interior por capilaridad. Se recomienda la utilización de: Pinturas y morteros impermeables. Escasamente membranas.

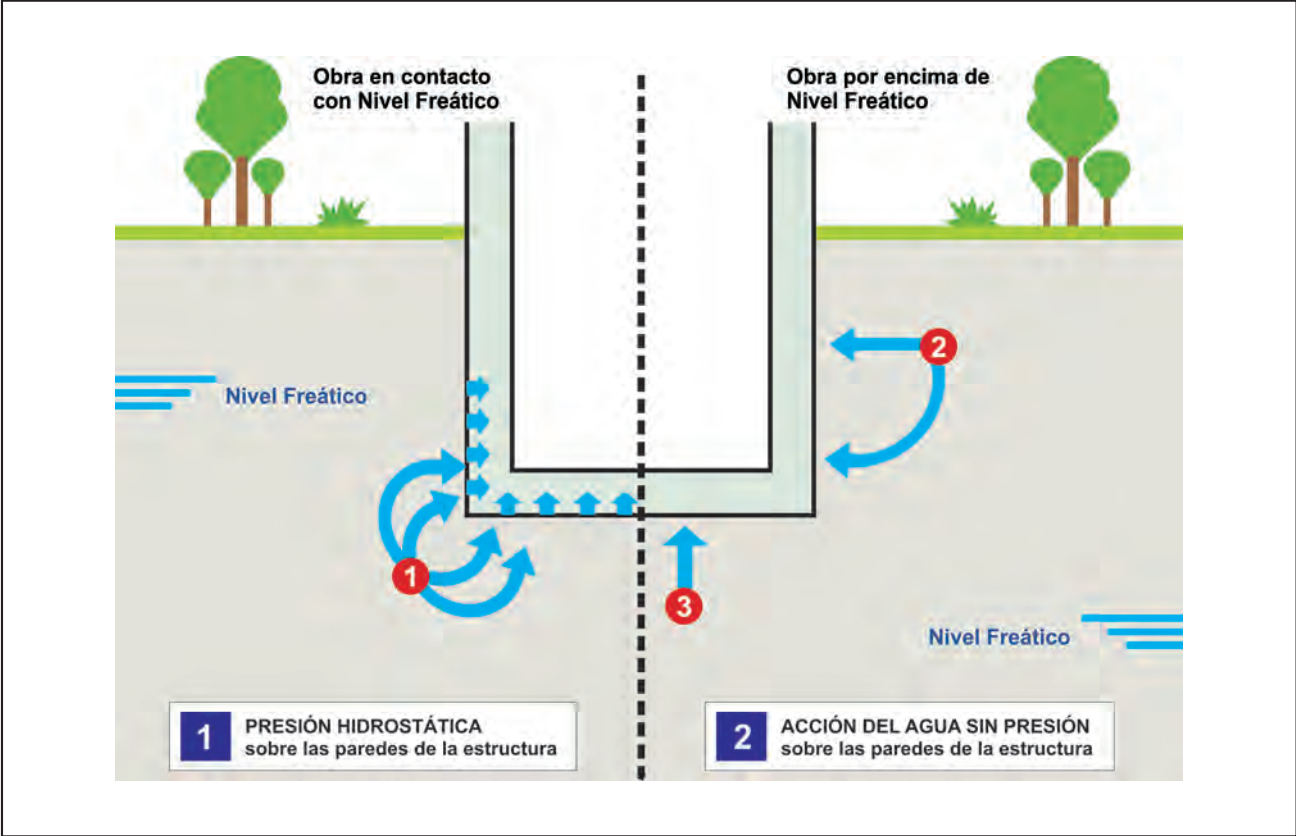


Figura 6. Acción que ejerce el agua sobre una estructura subterránea. Fuente: Lanzaro, 2020.

- *Impermeabilización en zona saturada, sin presión hidrostática (2):* Se debe desviar el agua para que no se genere presión. En general, el agua desviada se recoge en un drenaje longitudinal en la misma obra subterránea. Se recomienda la utilización de: Morteros hidrófugos. Membranas.
- *Impermeabilización en zona saturada, con presión hidrostática (1):* La obra está totalmente sumergida, se requiere una impermeabilización flexible y cerrada, y resistente a la presión del agua subterránea. Durante la construcción es necesario deprimir el nivel freático o eliminar el agua subterránea mediante técnicas con aire comprimido. Se recomienda la utilización de: Membranas. Escasamente morteros hidrófugos.

En este punto se reitera que para la elección del material de impermeabilización es de relevante importancia conocer la composición química del agua y del terreno de contacto ya que ciertas sustancias disueltas en ambos pueden atacar la impermeabilización.

A partir de la determinación de la posición de la obra subterránea respecto de los niveles freáticos, y como parte de la evaluación preliminar, es fundamental el *Análisis de las posibles situaciones de ingreso de agua o humedad no deseadas* que pueden devenir en las obras subterráneas, entre ellas:

- La capa freática, cuyo nivel puede fluctuar, debido a causas naturales por efecto de las precipitaciones y/o de altos niveles del agua en cursos superficiales cercanos; o debido a causas antrópicas como el cese de bombeo, riego, fugas en cañerías, etc., haciendo que el agua se

eleve por encima del nivel subterráneo más bajo del recinto subterráneo.

- La escorrentía de aguas subterráneas contra o infiltrando los tabiques exteriores de las partes soterradas del recinto.
- El ascenso capilar de la humedad, que puede hacer que el agua subterránea suba por los muros hasta el nivel de las áreas subterráneas en servicio de un edificio cuando está en contacto con y bajo la presión de un suelo saturado de agua.
- La percolación de agua dada por la recarga del acuífero mediante la infiltración en el suelo de contacto con la obra de aguas superficiales, precipitaciones o tareas de riego.

Estas cuatro primeras situaciones mencionadas se pueden remediar con sistemas adecuados de impermeabilización y de protección ante la presencia de agua. Por otra parte, existen factores que no son fruto de la filtración del agua subterránea a través de los tabiques exteriores de un edificio, pero suelen ser otras causas del deterioro de los materiales y de inconvenientes en cuanto al uso y funcionalidad de los edificios:

Las precipitaciones que por acción del viento golpean contra las fachadas de los edificios, pudiendo penetrar a través de las paredes y, dependiendo de la estructura del edificio, alcanzar las superficies interiores de los muros subterráneos bajo la fuerza de la gravedad o por atracción capilar.

La condensación del vapor de agua contenido en el aire húmedo en contacto con los muros fríos (insuficientemente aislados), en locales o instalaciones sin suficiente ventilación.

La fuga o vertido accidental de cañerías (suministro de agua, instalación cloacal, instalación pluvial, etc.) especialmente cuando las cañerías están integradas en la estructura del edificio.

En caso de que los aspectos y factores citados en la evaluación preliminar no sean evaluados e integrados al proyecto de una obra subterránea, se dará lugar a *impactos negativos* que afectarán el uso, la estanqueidad y la durabilidad, reduciendo la vida útil de toda la estructura.

Los impactos negativos ante diferentes niveles de *exposición al agua no deseada* (fluctuación del agua subterránea, presión hidrostática, humedad del suelo, percolación de agua o aguas abiertas) podrán dar lugar a restricciones a la funcionalidad ya que la falta de estanqueidad generará limitaciones al uso y a la habitabilidad, y hasta la posible pérdida de bienes materiales, y simultáneamente podrán provocar daños a la estructura. La *exposición a sustancias agresivas en aguas y suelos de contacto* podrá generar daños a la estructura como es el caso de los sulfatos que atacan al hormigón y los cloruros que corroen a las armaduras. La *exposición a variaciones de temperatura* podrá dar lugar a patologías de descamación o agrietamiento del hormigón y a situaciones de condensación. La *exposición a influencias biológicas agresivas* podrá dañar las protecciones de la obra y los bienes interiores ante el ataque de hongos y bacterias sobre las impermeabilizaciones y acabados constructivos. La *presencia de gases en el suelo* podrá afectar a los usuarios ante exposición por penetración de los gases al interior de los recintos. Asimismo, en caso de que la evaluación de la sollicitación mecánica no hubiera sido apropiada, podrá darse lugar a la aparición de *fuerzas estáticas desiguales* (debido a la carga, a asentamientos o levantamientos) y de *fuerzas dinámicas* (debido a asentamientos, explosiones, o movimientos importantes de la estructura) que impactarían negativamente en la resistencia y estabilidad de la estructura provocando patologías de agrietamiento y fisuración estructural.

Luego de conocidos y evaluados los condicionantes que ejerce el medio en que se emplaza la obra subterránea en estudio, habiendo analizado su posición respecto a los niveles probables del agua subterránea en el tiempo, conociendo las técnicas de impermeabilización apropiadas para cada caso y previendo las posibles situaciones de ingreso de agua o humedad se propone realizar una *Evaluación Específica (B)* para seleccionar el sistema de impermeabilización que requiere la obra en su situación particular. A partir del estudio del programa de necesidades de la obra, que define el destino de uso y en consecuencia los grados de estanqueidad, la durabilidad y la inversión prevista; se selecciona el sistema de impermeabilización que cumpla con las prestaciones esperadas en cuanto a la presión hidrostática detectada, al tipo

de barrera impermeable necesaria, al nivel de protección a la estructura, y a la durabilidad del sistema (Figura 7).

El grado de impermeabilización de toda estructura subterránea, incluidos muros, piso y cimientos, debe ser adecuado al uso interior previsto y al equipamiento a ubicar. Para definir la estrategia de impermeabilización adecuada y el tipo de sistema para un proyecto específico, se adoptaron las recomendaciones de la *Norma BS 8102: 2009* “Código práctico para la protección de estructuras subterráneas frente a la acción del agua subterránea”.

Como premisas básicas de la evaluación deben considerarse las condiciones y requerimientos del proyecto del propietario o comitente en cuanto a la funcionalidad, ya que el uso determinará el grado de estanqueidad necesario; en cuanto a la vida útil o durabilidad y en cuanto al costo total de la obra incluyendo el costo de mantenimiento.

La norma mencionada establece recomendaciones útiles y proporciona orientación sobre los métodos para tratar y prevenir la entrada de agua desde el suelo circundante a una estructura debajo del nivel del suelo. Para ello, clasifica la habitabilidad según cuatro niveles o grados de estanqueidad los cuales se definen por las condiciones de funcionamiento o habitabilidad requeridos para cada uso previsto. A la hora de evaluar los requerimientos del destino de cada obra subterránea, será de gran utilidad la consulta de la Tabla 1 que contiene un detalle de las utilidades que brinda cada nivel de estanqueidad, las condiciones de habitabilidad que proporcionan y el tipo de edificación compatible con cada nivel de protección.

Otro aspecto importante de los requerimientos del proyecto que condiciona la selección apropiada del tipo de impermeabilización que requiere cada obra subterránea es conocer el *rendimiento* de cada tecnología de impermeabilización con relación a su duración en el tiempo. En la Figura 8 se puede posicionar la performance de diversas tecnologías frente a los condicionamientos de servicio de una obra subterránea.

En relación a la inversión total de la obra subterránea a ejecutar corresponde internalizar no solo los costos de construcción para toda la vida útil de la estructura, incluida la inversión inicial, sino también el costo de cualquier pérdida o daño a los bienes interiores debido al ingreso de agua, el costo de cualquier reparación y mantenimiento, más el costo de cualquier tiempo de inactividad durante tales trabajos. De acuerdo con esto, en la Figura 9 se presenta un esquema donde se visualiza la inversión inicial por cada tipo de impermeabilización y aún para casos sin protección impermeable. Asimismo, se observa en contraste a la inversión inicial, aquella requerida para mantenimiento,

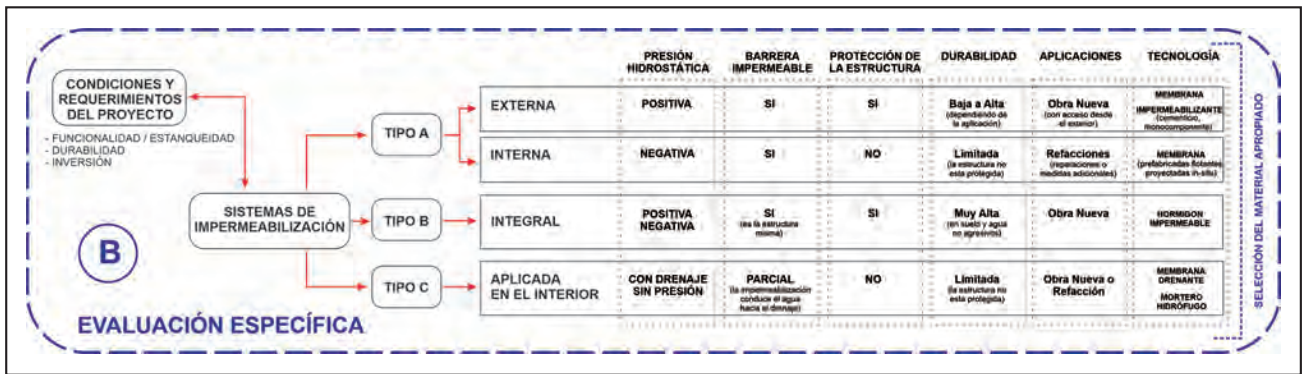


Figura 7. Guía Técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo. Evaluación Específica. Fuente: Lanzaro, 2020.

Tabla 1. Grados de estanqueidad en obras subterráneas. Fuente: Norma BS 8102:2009.

Grado	Uso	Condiciones	Estructuras
1	Utilidad básica	· Sin penetración de agua. · Algo de humedad. · Vapor tolerable dependiendo del uso.	Cocheras subterráneas, talleres, salas de máquinas, fosos de ascensores, etc.
2	Mejor utilidad	· Sin penetración de agua. · Ambiente seco. · Puede requerir ventilación dependiendo del uso.	Cocheras subterráneas, áreas de almacenamiento, talleres, salas eléctricas, etc.
3	Habitable	· Sin penetración de agua. · Ambiente absolutamente seco. · Con ventilación y deshumidificación.	Unidades residenciales y oficinas ventiladas, restaurantes y zonas comerciales, instalaciones recreativas.
4	Grado 3 Habitable + plus	· Uso con ventilación y acondicionamiento de aire. · Protección ante la penetración de gases. · Protección ante agentes químicos y biológicos.	Unidades residenciales y de oficinas, salas de informática, archivos, áreas e instalaciones especiales como laboratorios.

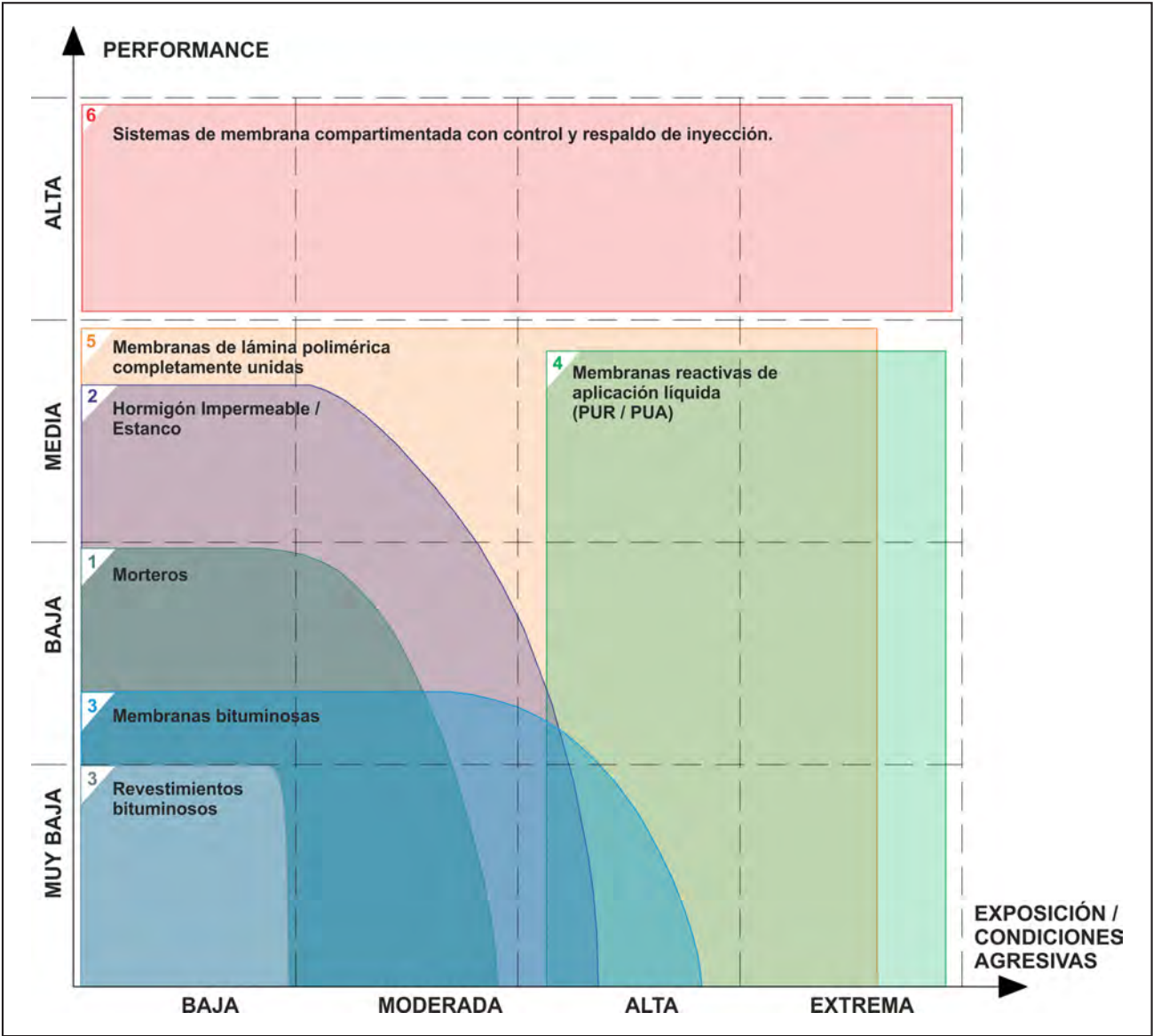


Figura 8. Rendimiento de tecnologías de impermeabilización. Fuente: Sika S.A., 2018.

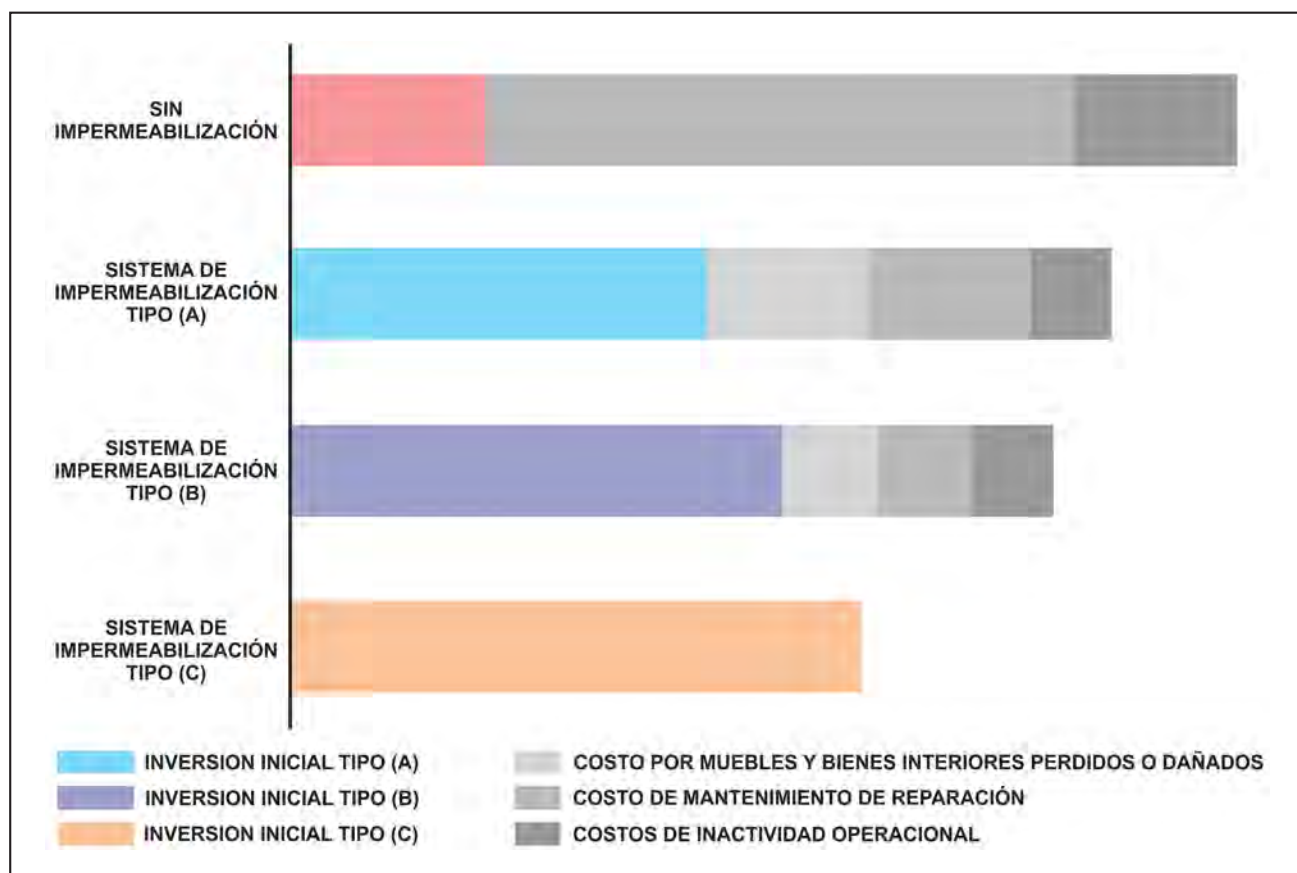


Figura 9. Inversión inicial para cada sistema de impermeabilización. Fuente: Sika S.A., 2018.

reparaciones, pérdidas e inactividad operacional. Esta lógica debe estar presente tanto en proyectistas y ejecutores de la obra, y fundamentalmente en los propietarios, a fin de evitar situaciones indeseables en el futuro.

Por todo lo mencionado, es posible comprender que el sistema de impermeabilización incide directamente en el tiempo de vida útil de la estructura, pudiendo establecerse las siguientes relaciones:

- Sin impermeabilización = Vida útil promedio de 10 años.
- Bajo grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 20 años.
- Medio grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 45 años.
- Alto grado de impermeabilización = Vida útil promedio de 100 años.

La impermeabilización de los distintos tipos de obras subterráneas tiene una gran importancia tanto técnica como económica; y contribuye considerablemente a la calidad y a la durabilidad de estas. Por otra parte, será importante no tener exigencias innecesariamente elevadas que no estén en relación con el uso de la obra, porque ello tendrá importantes consecuencias, tanto para las especificaciones técnicas como para el costo de la obra.

Para dotar a una obra del nivel de estanqueidad determinado en los requerimientos del proyecto, y dar solución a los condicionantes externos y específicos evaluados en relación con el

entorno y con la posición de la obra respecto a los niveles del agua subterránea, existen distintos *Métodos o Sistemas de Impermeabilización*. La norma BS 8102: 2009 identifica tres métodos o sistemas de impermeabilización diferentes (Figura 10), los que se describen a continuación:

• *Sistema de impermeabilización externo (tipo A):*

Barrera impermeable aplicada a las superficies externas que están expuestas al agua subterránea (lado positivo). La estructura está protegida contra la entrada de agua y también contra sustancias o influencias agresivas. Para algunos materiales, como los morteros y recubrimientos de aplicación posterior, se requiere el acceso a las superficies externas para su aplicación después del hormigonado.

• *Sistema de impermeabilización interno (tipo A):*

Barrera impermeable aplicada en las superficies internas de la estructura (lado negativo). Estos sistemas no evitan el daño a la estructura por ingreso de agua, ni el daño al hormigón y armaduras debido a sustancias químicas agresivas. En general, estos sistemas se aplican como revestimientos o recubrimientos de membrana laminar, y se recomiendan para trabajos de renovación, en los que no es posible acceder a las superficies directamente expuestas.

• *Sistema de impermeabilización integral (tipo B):*

Es un sistema de impermeabilización integrado en la estructura de hormigón. La penetración de agua líquida

es detenida por la propia estructura y no puede pasar al recinto interior. Los productos típicos son aditivos para hormigón estanco combinado con sistemas apropiados de sellado de juntas para conexiones, juntas de construcción y juntas de movimiento.

· *Sistema de impermeabilización aplicado internamente (tipo C):*

El sistema dirige la penetración de agua en un sistema de drenaje y un colector de recolección, luego por bombeo se descarga el agua del recinto hacia el exterior del edificio. El drenaje asegura la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes o canaletas longitudinales que deben tener el diámetro suficiente y sus aberturas

de entrada proporcionales al agua de filtración esperada. Estos sistemas no evitan el daño a la estructura por la entrada de agua, ni el daño al hormigón y armaduras debido a sustancias químicas agresivas.

La norma recomienda, para aquellos casos donde los riesgos evaluados se consideren altos o las consecuencias de no lograr el entorno interno requerido sean demasiado altas, que se considere el uso de *sistemas duales*, por ejemplo, la protección Tipo A más la Tipo B. El nivel de exigencia de cada obra subterránea determinará el nivel de medidas de precaución a tomar frente a la penetración de agua, pero en todos los casos es recomendable usar un hormigón de baja permeabilidad, ya que arreglar una fuga puntual es más sencillo que detener un problema generalizado sobre el paramento de hormigón.

Tabla 2. Tecnologías de impermeabilización en estructuras subterráneas. Fuente: Norma BS 8102:2009.

Ubicación	Procedimiento	Tecnología / Materialidad
HORMIGÓN	Impermeabilización de la masa con aditivos hidrófugos, reductores de agua, superplastificantes, reductores de retracción	· Modificación de la estructura capilar del hormigón. · Tecnología de bloqueo de poros. · Tecnología por cristalización.
JUNTAS	Control y sellado de juntas y pasadores en uniones. Juntas de construcción y de dilatación.	· Perfiles preformados. · Perfiles hidro-expansibles. · Inyecciones puntuales / Mangueras de inyección. · Cintas adhesivas.
ENVOLVENTE	Barreras impermeables.	Revestimientos / recubrimientos: · cementicios. · asfálticos / bituminosos. · preformados.

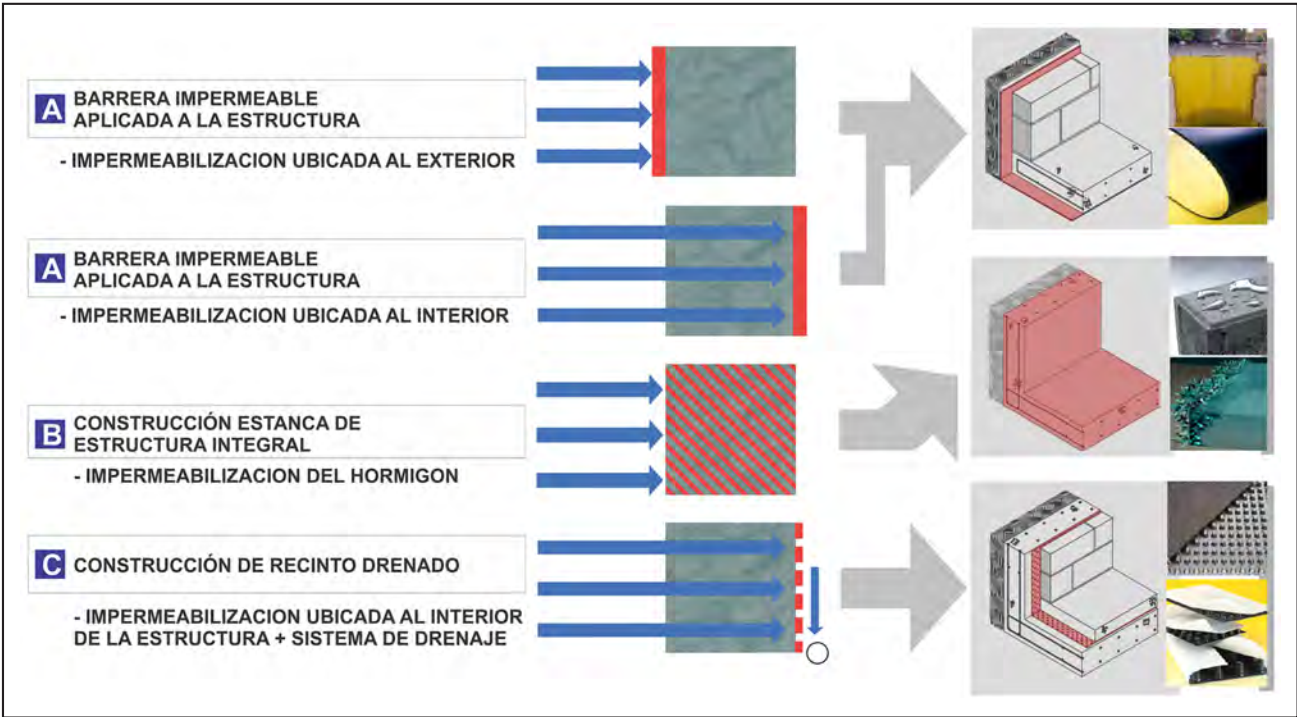


Figura 10. Sistemas de impermeabilización para obras subterráneas. Adaptado de la Norma BS 8102: 2009.

CATÁLOGO DE MATERIALES

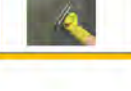
Producto impermeabilizante / Línea de producto en BSA Argentina (https://bsa.com.ar/)	TIPO DE SISTEMA / TECNOLOGÍA	CONCEPTO DE IMPERMEABILIZACIÓN / ESTRATEGIA	GRADO DE ESTANQUEIDAD	NIVEL DE PROTECCIÓN AL HORMIGÓN Y ARMADURAS	NIVEL DE RESISTENCIA AL AGUA	PERFORMANCE CARACTERÍSTICA	NIVEL DE SEGURIDAD	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	REPARACIÓN EN CASO DE FUGAS	CONDICIONES DE APLICACIÓN	VENTAJAS
 BSA® Waterproof Concrete Aditivo impermeabilizante para concreto. Se aplica en el momento de la colocación del concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	BSA 100	Impermeabilización por membrana	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.
 BSA® Protect	BSA 100	Membrana de alta impermeabilidad	Grado 1	Alto	Alta protección	Puntaje de granito: 100 Durabilidad: 10 años Resistencia al agua: 100% Resistencia al fuego: 100% Resistencia al ruido: 100%	Alto	Por excavación local de la obra	Reparación por aplicación de la misma pasta	Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto. No requiere ningún tipo de mantenimiento.	Alta resistencia. No requiere ningún tipo de mantenimiento. Se aplica en cualquier tipo de obra de concreto.

Figura 11. Ficha técnica tipo de materiales para impermeabilización subterránea. Fuente: Lanzaro, 2020.

Cada sistema de impermeabilización presenta cualidades técnicas propias, las cuales se deben ponderar en función de la protección que se requiere en cada caso, evaluando si es apto para la obra que se proyecta, analizando la protección que suministra y la durabilidad de la protección impermeable en sí misma y el nivel de protección que le otorga a la estructura (hormigón y armaduras) en el tiempo.

Para la materialización de cada tipo de sistema de impermeabilización en estructuras subterráneas existen distintas tecnologías, las cuales se resumen en la Tabla 2.

Habiendo definido los condicionantes externos y específicos que inciden sobre la obra subterránea y comprendido los conceptos básicos en cuanto a la técnica de impermeabilización que requiere cada caso siguiendo la secuencia planteada para la etapa de la Evaluación Preliminar (A); y habiendo considerado los requerimientos del proyecto y seleccionado el tipo de sistema de impermeabilización óptimo de acuerdo a lo previsto en la etapa de Evaluación Específica (B), se podrán seleccionar los materiales que otorguen la solución de protección impermeable deseada mediante la consulta del compendio desarrollado: *Catálogo de Materiales disponibles* (C) en el país, sujeto a actualización, que abarca una amplia variedad de materiales, tanto para el sistema primario de protección como para reparaciones y componentes auxiliares para uniones, refuerzos, etc.

Las fichas técnicas del Catálogo de Materiales para impermeabilización subterránea y sus complementos se han agrupado por líneas de producto, cubriendo todos los posibles casos de aplicación que se requieran para el nivel de protección deseado en cada obra.

El Catálogo respeta la lógica de la Guía Técnica propuesta a través de las siguientes variables de análisis: tipo de sistema/

tecnología; concepto de impermeabilización/ estrategia; grado de estanqueidad; nivel de protección del hormigón y armaduras; nivel de resistencia al agua; performance característica, nivel de seguridad, método de excavación de la obra; reparación en caso de filtraciones, condiciones de aplicación y ventajas (Figura 11).

En virtud de todos los aspectos previamente presentados, es posible afirmar que, para cualquier caso, no es posible establecer reglas universales para la protección óptima de una obra subterránea porque los factores que influyen son muchos y variados. Por eso es muy importante contar con una Guía Técnica a seguir a fin de tener en cuenta los factores fundamentales durante la planificación y el proyecto de toda obra subterránea, entre ellos:

- Condiciones del terreno, del medio hidrogeológico y tipo de construcción.
- Previsión sobre las fluctuaciones de niveles de agua en el tiempo.
- Tipo de exposición a que puede estar sujeta la impermeabilización y la estructura.
- Grado de impermeabilización requerido según el uso previsto.
- Elementos necesarios y específicos de la impermeabilización.

CONCLUSIONES

El sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe se encuentra en permanente interacción con las estructuras, construcciones y redes de infraestructura alojadas en el subsuelo urbano, situación que demanda obras subterráneas capaces de hacer frente a esa exposición.

La guía técnica para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo permitirá que los proyectos de obras subterráneas incluyan los factores fundamentales para alcanzar los niveles de protección requeridos. Aunque, la efectividad de las protecciones también dependerá de la buena ejecución de la obra, lo cual demandará mano de obra calificada, adecuado control de calidad del proceso constructivo y de cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto y recomendaciones del fabricante de cada material.

Los recintos subterráneos insuficientemente impermeabilizados necesitan una importante inversión en mantenimiento debido a los desperfectos tanto de las instalaciones mecánicas como al deterioro de la estructura de hormigón del recinto. Por estas razones resulta esencial realizar un estudio previo para poder escoger el mejor tipo de impermeabilización que se le va a aplicar a la estructura y así evitar gastos innecesarios.

Los riesgos inherentes a las obras subterráneas deben ser identificados, analizados, mitigados y gestionados adecuadamente. La incertidumbre geotécnica resultante de la falta de conocimiento de las condiciones hidrogeológicas; de la falta de consideración de las fluctuaciones del agua subterránea en el tiempo; de la respuesta impredecible del terreno ante las excavaciones; y de la compleja interacción suelo-estructura, influye en la seguridad estructural de toda obra, pero especialmente en aquellas subterráneas, tanto en su etapa de ejecución como a lo largo de toda la vida útil.

A nivel urbano, la complejidad de interacciones, los problemas y las necesidades de gestión relacionados con las aguas subterráneas y el entramado edilicio y de infraestructura que se encuentra alojado en el subsuelo, demanda su regulación; para protección del recurso hídrico y del suelo ante posible contaminación; para brindar seguridad estructural a las nuevas construcciones tomando medidas que apunten a la durabilidad de los materiales, a proveer el nivel de habitabilidad requerido para cada tipo de recinto subterráneo; para dotar de seguridad a las obras linderas existentes; y para que la prestación de los servicios públicos sea eficiente y sustentable minimizando las fugas y colapsos de la infraestructura.

Las pautas técnicas de la guía son factibles de ser implementadas a nivel local a fin de avanzar hacia la regulación del subsuelo de la ciudad, pudiendo ser integradas al Código de Habitabilidad Ordenanza N° 12.783/2021 que recientemente ha reemplazado al Reglamento de Edificaciones, Ordenanza N° 7.279/76, para que la aprobación técnico-administrativa de proyectos que contengan obras subterráneas cumplan estándares mínimos que provean seguridad y habitabilidad a las mismas. Es de destacar que el conjunto de conocimientos, metodologías y recomendaciones presentadas son válidas para el proyecto, ejecución y puesta en servicio de obras subterráneas en otros entornos urbanos que enfrenten similar problemática.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

La conceptualización; indagación técnica; relevamientos de campo; análisis de datos; redacción y preparación del borrador original; redacción, revisión y edición del manuscrito final estuvieron a cargo de la autora del artículo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

La Autora declara que no existe ningún conflicto de interés.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (2009). BS 8102: 2009.

Code of practice for protection of below ground structures.
England.

CHILTON, J. (1997).

Groundwater in the urban environment. Volume 1: Problems, processes and management.
XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 1-682). Nottingham: Balkema.

CUSTODIO, E. (2004).

Hidrogeología urbana: Una nueva rama de la ciencia hidrogeológica.
Boletín Geológico y Minero, 115, Número Especial, 283-288.

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., C 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.

GEBREMEDHIN, B., TESFAHUNEGB, A., & SOLOMON, G. (2013).

Implications of groundwater quality to corrosion problem and urban planning in Mekelle area, Northern Ethiopia.
Momona Ethiopian Journal of Science - Vol 5, 51-70.

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.
- LANZARO, M. V., & D'ELIA, M. P. (2021).
Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, (46), 25-42. Recuperado a partir de <https://www.editoriasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/article/view/197>
- LERNER, D. N. (1990).
Groundwater recharge in urban areas.
Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas (págs. 59-65). Duisburg: IAHS - International Association of Hydrological Sciences .
- 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.
- 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. Recuperado a partir de <https://www.inti.gob.ar>.
- 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.
- SIKA S.A. (2018).
Hormigón: Estructuras Subterráneas Impermeables.
(Boletín del Departamento de desarrollo tecnológico de Sika®).
https://arg.sika.com/content/dam/dms/ar01/7/Hormigon_EstructurasSubterraneas_2018.pdf
- 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.
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., SÁNCHEZ-VILA, X., CARRERA, J., & MARIZZA, M. (1997).
Rising groundwater levels in Barcelona: Evolution and effects on urban structures.
En C. e. 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. 267-271). Nottingham: Balkema.



Análisis de las inundaciones en la cuenca superior y media del río Luján, provincia de Buenos Aires

Analysis of the floods in the upper and middle basin of the Luján river, province of Buenos Aires

Molero, Vanesa¹ - Pereyra, Fernando X.^{2,3} - Marcomini, Silvia^{1,4}

Recibido: 25 de agosto de 2021 • Aceptado: 16 de mayo de 2022

Resumen

Las inundaciones en la cuenca del río Luján son eventos geológicos recurrentes que han adquirido una gran importancia en estos últimos años debido, esencialmente, al aumento de la población en los tramos superior y medio de la cuenca. La zona estudiada se encuentra el sector noreste de la provincia de Buenos Aires, al NO de la Región Metropolitana Bonaerense (60°-59°O y 34°- 35° S). En el presente trabajo se analizan los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y edafológicos que determinan la ocurrencia de las inundaciones en el área. Asimismo, se han considerado los principales factores demográficos y la variación temporal y espacial de la ocupación y uso urbano de la tierra. En función de los puntos señalados se han identificado las principales causas, tanto antrópicas como naturales, que determinan la extensión, magnitud e impacto de las inundaciones en la cuenca del río Luján. Dichos análisis fueron empleados también para la zonificación de áreas con diversos grados de susceptibilidad a las inundaciones, mediante la confección de un mapa de susceptibilidad, en el cual se determinaron tres grados: alto, medio y bajo. Algunas de las principales inundaciones de la región tuvieron lugar en los años 1885, 1985, 1993, 2014 y 2015 y están relacionadas con eventos de precipitaciones intensas. Numerosas intervenciones humanas en la cuenca han implicado la reducción de la planicie aluvial, la rectificación del curso y la presencia de numerosos puentes de escasa luz, las que se suman a la construcción de canales aliviadores, albardones (y su posterior disección), ocupación de la planicie aluvial, relleno de zonas anegables e impermeabilización de suelo natural, entre otras. Finalmente, se espera que la información obtenida en este trabajo contribuya a la implementación de medidas, tanto estructurales como no estructurales.

1. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Buenos Aires, Argentina.

2. Universidad Nacional de Avellaneda, Departamento de Ambiente y Turismo, Buenos Aires, Argentina.

3. Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) - Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

4. CONICET- Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Buenos Aires, Argentina.

molervog@gmail.com

Palabras clave: causas - inundaciones - río Luján - zonificación susceptibilidad

Abstract

Floods in the Luján river basin are recurrent geological events that have acquired great importance in recent years, essentially, due to the increase in population in the upper and

middle sections of the basin. The studied area is located in the northeast sector of the province of Buenos Aires, NW of the Buenos Aires Metropolitan Region (60 ° -59 ° W and 34 ° - 35 ° S). In the present work, the geological, geomorphological, hydrological, and edaphic aspects that determine the occurrence of floods in the studied area are analyzed. Likewise, the main demographic factors and the temporal and spatial variation of urban land use and occupation have been considered. Based on these points, the main causes, both anthropic and natural, that determine the extension, magnitude, and impact of the floods in the Luján river basin have been identified. Those analyzes were also used for flood susceptibility zoning through the preparation of a susceptibility map, in which three susceptibility scales were determined: high, medium, and low. Some of the main floods in the region took place in the years 1885, 1985, 1993, 2014 and 2015 and are related to events of intense rainfall. Numerous human interventions in the basin have involved the reduction of the alluvial plain, the rectification of the course and the presence of numerous low-light bridges, which are added to the construction of relief channels, ridges (and their subsequent dissection), occupation of the alluvial plain, filling of flooded areas and waterproofing of natural soil, among others. Finally, the information obtained in this paper is expected to contribute to the implementation of both structural and non-structural measures.

Keywords: *causes - floodings - Luján river - susceptibility zonification.*

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en la Argentina constituyen uno de los principales peligros naturales por su recurrencia, extensión y su impacto tanto social como económico. Los efectos de las inundaciones en la provincia de Buenos Aires son especialmente notorios. En esta región se suma a las condiciones naturales (tanto geológicas como climáticas), la alta densidad poblacional, los intensos y variados usos de la tierra y la superposición espacial y temporal de los mismos. Si bien las causas y efectos de las inundaciones en las grandes ciudades como AMBA (Área Metropolitana Bonaerense) en el Gran La Plata han sido estudiadas por numerosos investigadores (Pereyra, 2004, 2014; Marcomini y López, 2011, Fucks et al., 2017) no han merecido igual interés las inundaciones en las cercanas cuencas de los ríos Luján, Arco y Arrecifes. El presente trabajo se focaliza en el análisis de las causas y efectos de las inundaciones de la cuenca principal del río Luján.

Esta cuenca, y en particular las localidades de Luján y Mercedes, han experimentado numerosas inundaciones en su historia, entre las que se cuentan, como de mayor magnitud, las registradas en los años 1885, 1985, 1993, 2014, 2015, entre otras. Las inundaciones se producen, básicamente, por el desbordamiento del río homónimo. Si bien las mismas se han sucedido en la ciudad de Luján desde el momento de su fundación, en los últimos años, los efectos de estas se han incrementado, afectando notoriamente a toda la población.

El objetivo de este trabajo es analizar las causas de las inundaciones, tanto naturales como antrópicas, así como su sinergia, prestando especial atención a los efectos que generan las modificaciones antrópicas realizadas sobre el sistema fluvial. Para establecer la influencia en la magnitud y extensión de las inundaciones se tuvo en cuenta la relación entre la geomorfología, los suelos presentes, y la influencia de las acciones antrópicas sobre el relieve. Estas alteraciones han potenciado en los últimos años las inundaciones incrementando los efectos devastadores en el área, generando grandes pérdidas económicas y humanas.

La cuenca del río Luján, está ubicada al noreste de la Provincia de Buenos Aires, (60°-59°O y 34°- 35° S, (Figura 1). En este trabajo, se abarca la cuenca del río Luján, desde sus nacientes en la localidad de Suipacha hasta las cercanías del cruce con la Ruta Nacional N°8, en el partido de Pilar.

La cuenca del río Luján se divide en función de sus características geológicas y geomorfológicas, en una cuenca principal que posee tres tramos: superior, medio e inferior, y una cuenca baja o distal. La cuenca principal se extiende desde sus nacientes hasta las cercanías de la Ruta Nacional N°9 (Autopista Panamericana) y posee características netamente fluviales, mientras que la cuenca baja se emplaza desde la RN9 hasta la desembocadura del río de la Plata y responde a ambientes estuariales y deltaicos del Holoceno. El presente trabajo se desarrolla en la cuenca principal.

En esta contribución se han abordado los principales aspectos demográficos, los usos del suelo y diferentes acciones antrópicas más relevantes y se han confeccionado una serie de mapas temáticos (geomorfológico y de susceptibilidad). Finalmente, se ha realizado una zonificación de susceptibilidad de inundaciones como base para el ordenamiento territorial de la cuenca del río Luján. Se espera que el conocimiento aportado en este trabajo contribuya a apoyar la toma decisiones fundadas y efectivas para la mitigación de los efectos de las inundaciones en la cuenca, y a la implementación de medidas tanto estructurales como no estructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las inundaciones en la cuenca del río Luján están en relación directa con el régimen de precipitación. Por ello se analizaron los datos de precipitaciones anuales para las localidades de Mercedes, Luján y San Fernando. Los mismos fueron otorgados para Mercedes por la estación meteorológica de la Chacra Experimental de Mercedes, provincia de Buenos Aires (1970 a 2019), para Luján por la estación meteorológica de la Universidad de Luján (1988 a 2017), y para San Fernando por el Servicio Meteorológico Nacional (1999-2019). Para determinar las inundaciones históricas se recurrió al archivo histórico del Museo Udaondo. Por su parte, la información edafológica se obtuvo de las cartas de suelos del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) y de Pereyra y Ragas (2021).

Los efectos de la urbanización sobre las inundaciones se evaluaron mediante el análisis de la evolución urbana y poblacional obtenida de cartografía histórica y registros periodísticos de la ciudad de Luján. Asimismo, se consultaron otras fuentes para otros sectores de la cuenca, así como numerosas fuentes periodísticas

La identificación de las diversas unidades geomorfológicas se realizó utilizando las Cartas imagen satelitaria de la República Argentina, en escala de 1:50.000, y las cartas Topográficas de la misma escala, ambas del IGN (Instituto Geográfico Nacional), de toda la extensión de la cuenca. Posteriormente, se digitalizó la información y mediante la herramienta QGIS se realizaron dos mapas, uno geomorfológico y otro de susceptibilidad de inundación, ambos basados en el análisis de la cartografía generada previamente y el trabajo de campo. La confección del mapa de susceptibilidad de inundaciones y los grados establecidos en el mismo fueron determinados a partir del análisis y la interrelación entre las características geomorfológicas, edafológicas y la observación directa de la zona junto a la información recopilada de artículos periodísticos y archivos fotográficos históricos, lo que permitió determinar regiones y geoformas inundables, ubicadas en las cotas más bajas (en general menos a 15 m y aquellas comprendidas entre 15 y 20 m). Esta información se volcó en el programa QGIS, por medio del cual, se otorgó una coloración determinada para cada grado asignado. Se establecieron así, tres grados, alto, medio y bajo. El grado alto se identificó con una coloración azul oscura, y abarca cotas menores a 15 m. El grado medio, está representado en el mapa con coloración celeste oscuro, comprendiendo las cotas entre 15 y 20 m. El grado bajo es de color celeste claro, cuyas cotas quedan por encima de los 20 m. De esta forma, las diversas geoformas presentes en la cuenca, y sus suelos asociados, quedaron agrupadas dentro de los distintos grados de susceptibilidad.

Finalmente, un factor relevante es la ocurrencia relativamente frecuente de precipitaciones diarias e incluso horarias anómalas, con valores que pueden superar en una hora la media mensual

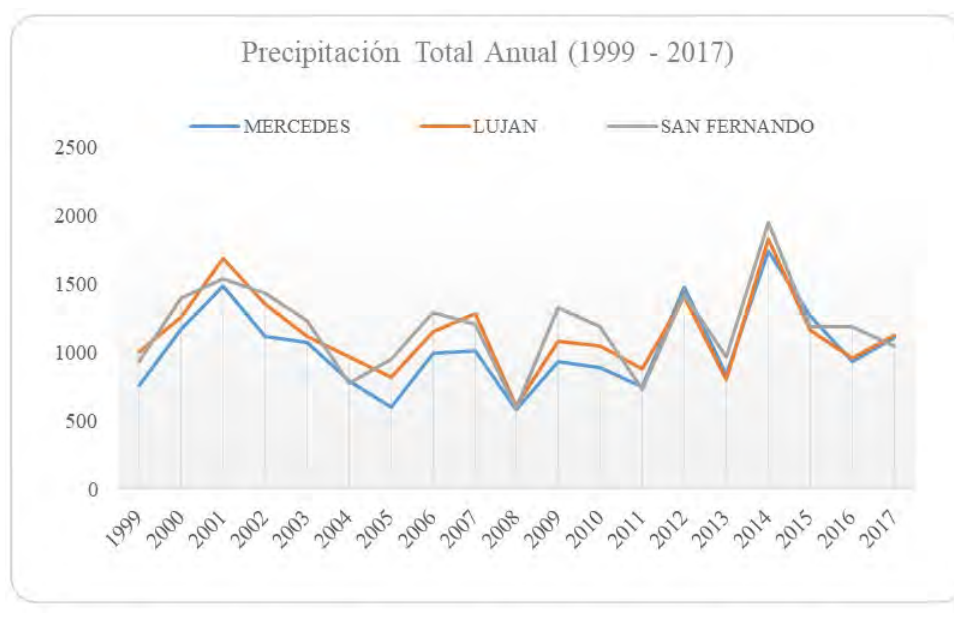


Figura 2. Gráfico de precipitación total anual 1999-2017 para Mercedes, Luján y San Fernando.

e incluso precipitaciones diarias que superan la media de varios meses juntos. Si bien la zona se caracteriza por no presentar estación seca, las mayores precipitaciones suelen ocurrir en los meses de verano y otoño, si bien pueden darse en casi cualquier momento.

Hidrología

La cuenca del río Luján, ocupa una superficie de 2.856 km², abarcando los partidos de Chacabuco, Carmen de Areco, Suipacha, Mercedes, Gral. Rodríguez, Luján, San Andrés de Giles, Exaltación de la Cruz, Pilar y Belén de Escobar. Posee una topografía suave con alturas máximas hacia el oeste de 60 m s.n.m., que descienden hacia el sureste hasta alcanzar el nivel del mar (Brea et al., 2007). El río posee una extensión de 128 km hasta su desembocadura en el río de la Plata, en el Partido de San Fernando. Su caudal medio es 5,37 m³/seg (Evaluación ambiental de los recursos hídricos del Sistema Metropolitano Bonaerense, 1981) y los cursos que forman la red de drenaje son mayormente permanentes. Posee una dirección sudoeste-noreste que en su tramo final se hace paralelo al paleoacantilado que bordea la planicie loésica. Sus principales tributarios los recibe en su tramo inferior en el ambiente del Delta, y son los arroyos Garín, Escobar, Claro y de las Tunas. Incluye sectores de los partidos de Suipacha, Mercedes, Luján, Pilar, Gral. Sarmiento, San Andrés de Giles, Campana, Escobar y Tigre. En el tramo inferior, aledaño al cruce de la Autopista Panamericana, el río Luján ocupa una amplia planicie baja, anegable, que se formó originariamente como un pequeño estuario durante la última ingresión marina, ocurrida entre 7000 y 3000 años AP.

El comportamiento hidrológico de la cuenca del río Luján no es homogéneo en sus tres tramos. En los tramos superior y medio el comportamiento de sistema fluvial es de tipo effluente debido a la proximidad de los cursos con el nivel freático, el cual no se encuentra a gran profundidad, y aflora estacional o temporariamente. En la planicie loésica, el nivel freático se encuentra a mayor profundidad, oscilando entre 4 y 6 m generalmente, presentando notorias fluctuaciones como respuesta

períodos de lluvias, o secas, las que tendrán injerencia al momento de definir las áreas con mayor susceptibilidad en los eventos de inundación.

Suelos

Los suelos de la región son esencialmente Molisoles y, en mucha menor medida, Alfisoles y Entisoles. Los suelos de la cuenca superior son predominantemente Argialboles típicos y Argiudoles típicos. En la cuenca media, predominan los Argiudoles típicos, seguidos por los Endoacules típicos. Según su ubicación, poseen un rol importante en la dinámica del agua, sobre todo en las características de infiltración y escorrentía.

Para el caso de la planicie loésica, los suelos predominantes son los Argiudoles vérticos y típicos, con un epipedón mólico y un potente horizonte argílico (Bt) subsuperficial que condiciona su permeabilidad y velocidad de infiltración. Asimismo, la ocurrencia de niveles de calcretes Ckm ("toscas") también limitan la infiltración. Los Argialboles se diferencian de los anteriores por presentar además horizontes álbicos (E), entre los A y Bt, y aparecen en las zonas de ligeras pendientes que marginan la planicie loésica.

Los suelos de las planicies aluviales, terrazas fluviales, bajos y cubetas de deflación que conforman complejos hidromórficos, son suelos que no poseen capacidad de infiltración, debido a la presencia de un nivel freático aflorante o muy somero, y por lo tanto el agua que precipita en esa zona, escurre, conformando escorrentía superficial. Los rasgos hidromórficos más notorios en la zona son la presencia de moteados y colores gley, los cuales son indicadores de áreas potencialmente anegables. Predominan, en estos casos, los Endo y Epiacules y Udifluentes, seguidos de Acuentes, Natracules y Natracualfes. En la Tabla 1, se observa la relación entre geoformas, formaciones superficiales y suelos en la zona estudiada.

Medio antrópico

A partir de los datos de los censos de 1991, 2001 y 2010 (INDEC), para los partidos de Mercedes, Luján y Pilar, los cuales

Tabla 1. Unidades geomorfológicas, formaciones geológicas y suelos dominantes, de los tramos superior y medio de la cuenca del río Luján.

Unidad Geomorfológica	Geología	Suelos Dominantes
Terrazas fluviales y Planicies Aluviales	Formaciones Luján, La Plata y Aluvio actual	Complejos Hidromórficos (Acuales, Fluventes y Acuentes)
Laterales de Planicie Loésica	Formaciones Ensenada, Buenos Aires y La Postrera	Argialbol Típico y Argiudol típico
Planicie Loésica	Formaciones Ensenada, Buenos Aires y La Postrera	Argialbol típico y vértico
Bajos	Formaciones Buenos Aires y La Postrera y Depósitos Lacustres	Complejos Hidromórficos (Acuales, Fluventes y Acuentes)
Cubetas de Deflación	Formaciones Buenos Aires y La Postrera y Depósitos lacustres	Complejos Hidromórficos (Acuales, Fluventes y Acuentes)

se tomaron como representativos de la cuenca del río Luján, es notable el aumento poblacional que se sucedió entre los años 1991 y 2010. De los tres partidos tomados como representativos, es el de Pilar el que mayor población posee, siendo ésta unas tres veces superior a la de Luján y Mercedes (Tabla 2).

Tabla 2. Población por municipio. Fuente INDEC, Censo Nacional de Población y Vivienda 1991, 2001, 2010.

	Población - Municipio		
	1991	2001	2010
Mercedes	55.613	59.870	63.284
Luján	80.645	93.992	106.273
Pilar	130.187	232.463	299.077

En líneas generales, muchos asentamientos nuevos se ubicaron en sectores anegables ocupando la planicie de inundación del río. De esta manera, se ven muy afectados en los momentos de crecidas del río, trayendo consigo pérdidas económicas, y generando muchos inconvenientes en la población.

La cuenca superior se caracteriza por presentar zonas principalmente rurales, aumentando la urbanización hacia la cuenca inferior y baja. Los usos del suelo en la zona a lo largo de la cuenca son variados, siendo los mismos agropecuarios en la cuenca superior, y hacia la zona de la cuenca media e inferior, se distinguen áreas industriales y de actividad agropecuaria intensiva, tales como avícola, horticultura.

El aumento poblacional modifica los usos del suelo, afectando así, los espacios naturales, sitios patrimoniales y sitios de producción rural tradicional. De esta manera, comienza el conflicto de la competencia entre los usos del suelo, afectando directamente las actividades desarrolladas por las poblaciones locales (Buzai, et al. 2019). En líneas generales, la intensificación de la urbanización ha generado un aumento de la impermeabilización de los suelos (por construcciones o por compactación), lo que ha elevado significativamente el escurrimiento superficial, aumentando la frecuencia y magnitud de las inundaciones. En tal sentido, en las últimas décadas es evidente el reemplazo de tierras rurales por nuevos asentamientos urbanos de tipo barrios cerrados o barrios precarios, los cuales se localizan esencialmente en las zonas de influencia fluvial. En el primero, especialmente evidente en el Partido de Pilar, los nuevos barrios se asientan en terrenos nivelados y elevados por encima de las cotas de inundación lo que implica el traslado de la problemática de los anegamientos a otras zonas en las cuales se han preservado sus rasgos

originarios y que antes eran menos vulnerables. Por el contrario, en los barrios precarios y carenciados, los efectos de las inundaciones son repetidos y dramáticos.

RESULTADOS

Geología

Las características principales de la geología de la cuenca fueron estudiadas en primer lugar por Florentino Ameghino, a fines del siglo del XIX y principios del siglo XX, sentando las bases fundamentales del conocimiento geológico y paleontológico de la región. Si bien numerosos geólogos trabajaron en la zona, se han utilizado como antecedentes inmediatos los aportes de Toledo (2011), Fucks et al. (2008) y Blasi et al. (2010), Frenguelli (1945, 1957), Fidalgo (1973), Tófaló et al. (2005) y la Hoja Geológica José C. Paz (Pereyra et al., 2021, en prensa), realizada por el SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino).

La estratigrafía de la zona de estudio está dominada por sedimentos eólicos y fluviales, que constituyen las diversas formaciones de la región agrupadas, principalmente, en los ciclos Pampeano y Postpampeano (Ameghino, 1889). Los primeros se ubican en las regiones más elevadas (perfil de la Cantera Olivera) mientras que el Postpampeano es fácilmente observable en las barrancas del río (perfil de Barrancas de río Luján). Estratigráficamente, el Pampeano está compuesto por las Formaciones Ensenada y Buenos Aires. Se trata de sedimentos loésicos que, en total, pueden superar los 40 m de potencia, de edad pliocena superior a pleistocena superior. A su vez, el Postpampeano incluye unidades fluviales, eólicas y litorales marinas, de edades pleistocenas superior a holocenas.

En la cuenca principal se reconocen depósitos principalmente fluviales (Formación Luján y Formación La Plata, “lujanense y platense” de Ameghino, respectivamente) y eólicos de la Formación La Postrera, esencialmente compuesta por loess retransportado localmente.

Existe un hiatus entre las Formaciones Buenos Aires y Luján, correspondiente a un período de denudación. Este último rellena los valles que se labraron sobre el pampeano superior, posee tosca rodada y su coloración es blanca y verdosa. En este trabajo se tomó como base la denominación de las Formaciones asignadas por Ameghino, y se apoyaran las descripciones en el trabajo realizado por Toledo (2011) y Pereyra et al. (2021).

En el sector correspondiente a la planicie loésica se han reconocido las Formaciones Ensenada en la base y Buenos Aires en el sector superior (Figura 3). Ambas unidades están integradas por sedimentos limosos friables. La base del perfil (unidad C1)

posee sedimentos limosos de coloración castaño-oscuro, con un espesor de 0,8 metros aproximadamente. Por encima de estos depósitos se reconoce un calcrete de coloración blanquecina de unos 0,60 metros (C3). Continuando la secuencia se observa un nivel de loess de coloración pardo amarillento con moteados de coloración grisácea y negra, posiblemente de materia orgánica. El espesor del mismo es de 1,4 metros. El tope del perfil (C4) constituye otro nivel de calcretes con un espesor de 2,20 metros. Los niveles C1, C2, C3 y C4 observados en el perfil de la Tosquera, pertenecen a la Formación Buenos Aires (Ameghino, 1889).

El perfil estratigráfico realizado en el puente Luis Gogna (Figura 4) comienza desde la base hacia el tope con un banco areno limoso, de coloración rojiza, masiva de un metro de espesor (L1). Por encima continúa un nivel de grava fina de coloración verdosa integrado por clastos de tosca principalmente (L2) con laminación horizontal. La grava tiene una matriz arenosa, con moteados amarillentos y rojizos. Esta unidad presenta un sector basal, con mayor proporción grava de 50 cm de espesor. Sobreyace la secuencia un banco de 60 cm de espesor (L3), formado por arena gravosa con mayor proporción de arcillas. La secuencia continua con un paleosuelo (L4), de coloración verdosa, posible Bt, con cutanes y moteados, el cual indicaría un suelo hidromórfico, con un espesor de 20 cm, aproximadamente. Esta secuencia, según el perfil realizado por Ameghino, se correspondería con el Lujanense y Luján Verde Superior (Toledo, 2011).

La secuencia continúa con limos con abundantes conchillas de moluscos de coloración grisácea de unos 50 cm de espesor (L5) a la cual se superpone un banco de 50 cm de espesor de

limos, ligeramente rojizos, con antiguos moteados. (L6). El perfil culmina (L7) con arenas de coloraciones castañas de 100 cm de espesor. En el perfil descrito, los niveles L1, L2, L3 y L4, pertenecerían al Lujanense (Ameghino, 1889), los L5 y L6 formarían parte del Platense, mientras que L7 corresponde con el aluvio actual.

Geomorfología

El modelado del paisaje es en general el resultado de la combinación de una serie de procesos geomórficos actuantes en la interfase atmósfera-litósfera. El accionar, intensidad y las mutuas relaciones entre los diversos procesos son función de los diferentes factores, principalmente la geología y el clima. Las formas de relieve son importantes porque condicionan distintos aspectos, en especial en lo referente a la circulación del agua, el balance infiltración/escorrimento y la erosión y acumulación, así como las características del nivel freático. Por lo tanto, son elementales para abordar diversas acciones de mitigación como, por ejemplo, establecer pautas de ordenamiento territorial. En el área de estudio, se pueden diferenciar tres ambientes geomorfológicos: A. ambiente eólico, B. ambiente fluvial y C. antiguo ambiente litoral-marino y deltáico. Este último no es considerado en la presente contribución ya que excede a los objetivos de este trabajo. Según los diferentes ambientes geomorfológicos, se agrupan las principales unidades geomorfológicas en cada uno de ellos: A. ambiente eólico: 1) planicie loésica, 2) cubetas de deflación (actualmente ocupadas por lagunas); B. ambiente fluvial: 1) terrazas y planicie aluvial y 2) laterales de valles.

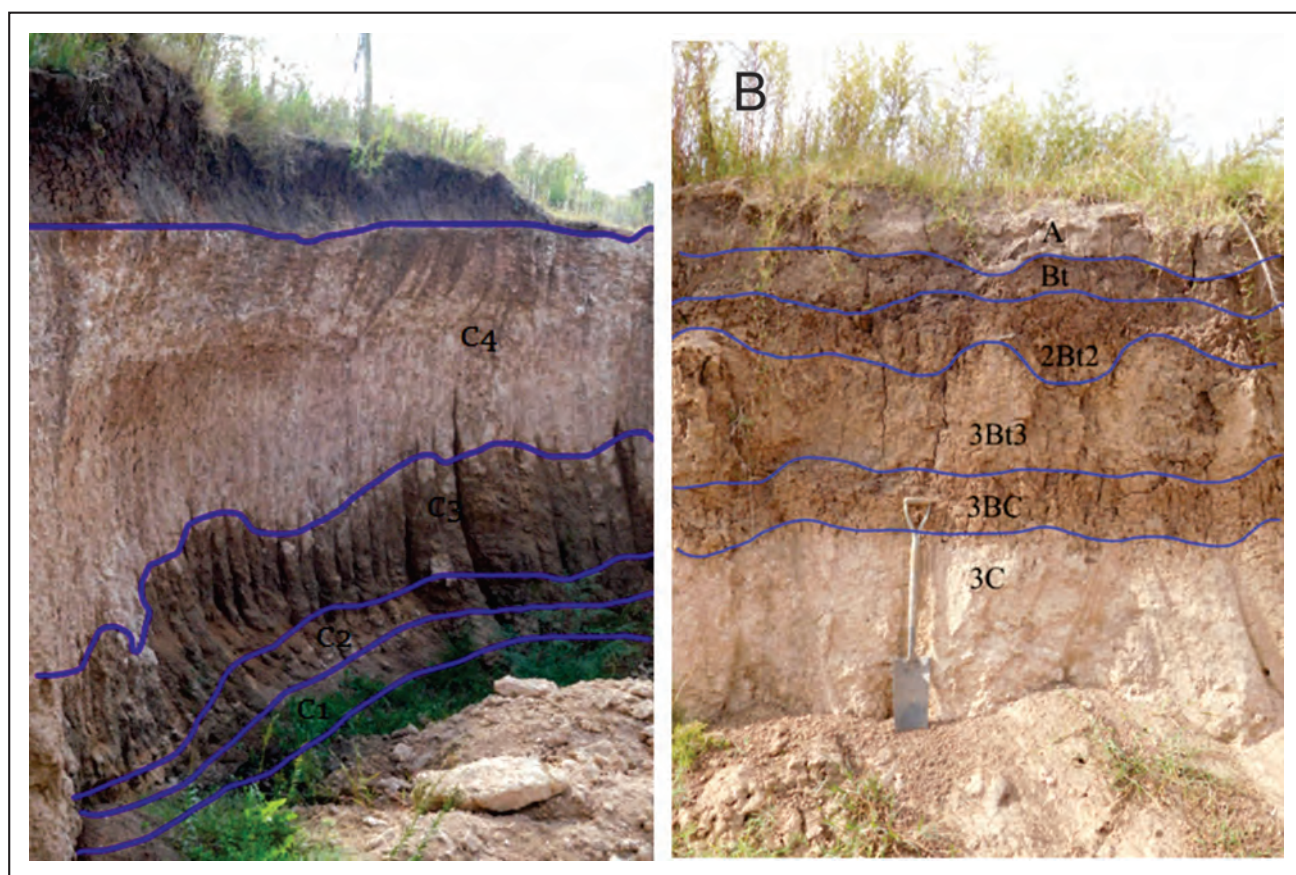


Figura 3. Geología y suelos en la planicie loésica en la cantera Tosquera "Olivera". (Lat. 34°37'42.52"S y Long. 59°14'14.63"O).

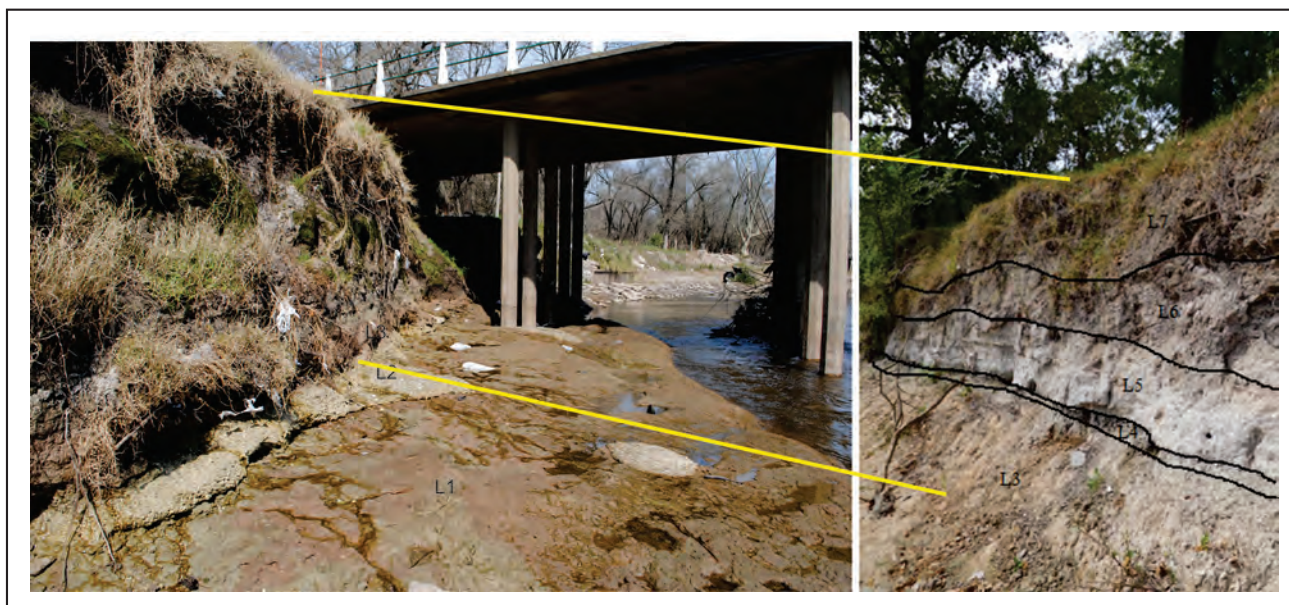


Figura 4. Perfil estratigráfico de la barranca de Río Luján en las inmediaciones de la Basílica de Nuestra Señora de Luján. Izq.: sector inferior del perfil; Der.: sector superior.

El Neógeno y el Cuaternario se caracterizaron por la alternancia de eventos de climas secos y fríos, con climas húmedos y cálidos. Esta alternancia es la que provocó el depósito de diversos materiales, y condicionó el accionar de los diferentes procesos geomorfológicos, de tal manera que para los momentos de climas secos y fríos tuvieron lugar los eventos de acumulación de loess, y hacia zonas periféricas se acumulaban arenas eólicas, mientras que en momentos de climas húmedos y cálidos, predominaron los procesos pedogenéticos, con una limitada acción fluvial que ha modificado parcialmente las morfologías eólicas debido al bajo relieve relativo de la zona. Consecuentemente, se observan en el área numerosos niveles de paleosuelos cuaternarios, con importantes niveles de calcretes o tosa (Ckm) y horizontes argílicos (Bt). Estos niveles influyen en varias características del relieve, por ejemplo, constituyendo resaltos dentro de los cursos fluviales. Las ondulaciones características de la región son el resultado de la acumulación discontinua y episódica de loess. En los momentos de acumulación de loess la red de drenaje preexistente fue cubierta por dicho material, llegando en ciertos lugares a desaparecer.

El sustrato de la región se encuentra a pocos cientos de metros y las litologías terciarias se acuñan hacia el norte. De esta manera, la evolución morfológica se vio afectada por posibles movimientos de reactivación tectónica del basamento. Los pulsos tectónicos de la orogenia Andina y desarrollo de las cuencas adyacentes generaron basculamientos y movimientos de distintos bloques. Esto provocó que los estratos terciarios y cuaternarios se ubiquen a diferentes profundidades, mientras que, en superficie, se observa que la red de drenaje posee un control estructural en el sector. Por su parte, las variaciones del nivel mar fueron importantes para el desarrollo de la red fluvial y el grado de disección del ambiente loésico.

La pendiente regional de la zona de estudio es muy baja e inclina hacia el litoral atlántico y los ríos Paraná y de la Plata. La planicie loésica está modificada parcialmente por el accionar del proceso fluvial y por las ingresiones marinas cuaternarias en la zona costera, destacando la formación de un paleoacantilado

(la "barranca" del Paraná), fuera del área estudiada. En la figura 5 se observa el mapa geomorfológico.

El proceso eólico, en su accionar, genera una de las geoformas características de la zona de estudio, y es la denominada planicie loésica. Tal como se dijera, los eventos de acumulación generados por los procesos eólicos fueron rápidos y de naturaleza episódica, seguidos de largos períodos de estabilidad geomórfica. El depósito del loess generó el "ahogamiento" del relieve fluvial preexistente al acumularse en forma mantiforme, cubriendo el relieve previo. Además, presenta una suave ondulación en la dirección del transporte del material. Esta característica se acrecentó debido al accionar del proceso fluvial, el cual ha tendido a encauzarse siguiendo estas depresiones aproximadamente coincidentes con el diseño de la antigua red de drenaje (siguiendo la pendiente regional, hacia el Paraná-de la Plata). Si bien su génesis se debe al accionar eólico, los procesos fluviales que actuaron y actúan en la planicie loésica son los que caracterizan el paisaje de la Pampa Ondulada.

La planicie loésica conforma una región relativamente alta, con cotas de 30 y 20 m s.n.m, delimitando la divisoria de aguas en esta región. Son terrenos planos o suavemente ondulados, constituidos esencialmente por depósitos loésicos "Pampeanos" es decir, compuestos por las Formaciones Ensenada-Buenos Aires. Como se mencionó previamente, los eventos de acumulación eólica fueron seguidos de largos períodos de estabilidad geomórfica. Fue en esos períodos de estabilidad, donde las condiciones bioclimáticas favorecieron una activa pedogénesis, generando numerosos paleosuelos de diferentes tipos, observables en los perfiles de los depósitos pampeanos y postpampeanos. Estos suelos, se componen de diversos horizontes, pero fueron los horizontes argílicos y los petrocálcicos los que tuvieron una actuación particular, comportándose como superficies estructurales de control para la erosión eólica. Los calcretes fueron especialmente importantes, ya que no sólo controlaron la deflación eólica sino también la incisión fluvial, particularmente con los niveles presentes en la Formación Ensenada mucho más cementados que los niveles calcáreos de la Formación Buenos Aires.

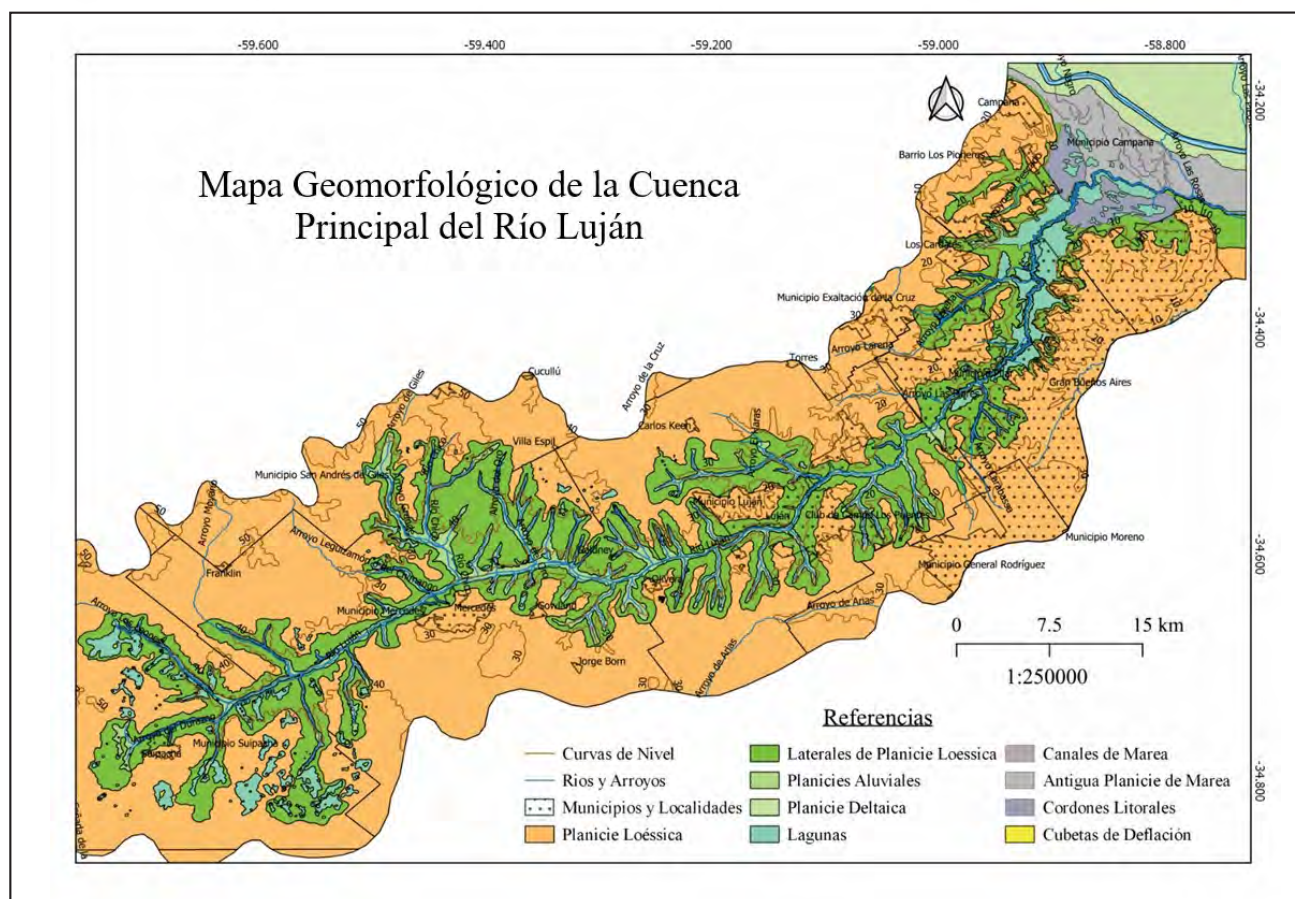


Figura 5. Mapa geomorfológico de la cuenca alta y media del río Luján.

En ciertos sectores de la planicie, se observan unas geoformas redondeadas, que pueden estar o no anegadas, y que pueden presentar cierta linealidad. Estas geoformas son antiguas cubetas de deflación y se formaron en los períodos de clima seco. Muchas de ellas se formaron a partir de depresiones de las antiguas vías de escurrimiento obliteradas parcialmente por el depósito de loess. Las cubetas han ido evolucionando hasta constituir ambientes lacustres y palustres a costa de los climas húmedos que se sucedieron, conformando lagunas, además de ubicarse actualmente en zonas bajas anegadizas.

El río Luján posee hábito meandriforme, con laterales bastante abruptos y estables dada la naturaleza cohesiva de los sedimentos limosos que acarrea. Presenta a grandes rasgos una planicie aluvial de escaso desarrollo, la cual a su vez se encuentra muy intervenida antrópicamente. Es posible diferenciar al menos dos niveles de terrazas en diferentes sectores de su recorrido, especialmente en sectores ubicados entre Mercedes y Luján y aguas abajo, en las cercanías del cruce con RN N°8. Las terrazas involucran a los sedimentos "lujanenses" y "platenses", en el sentido de Ameghino, y no superan la centena de metros de ancho. La zona de la Basílica de Luján, Museo y plaza se ubica en uno de estos niveles de terraza, de unos 10 metros, aproximadamente (Hoja 3560-11-4, Carta Topográfica, IGN).

El perfil longitudinal del río Luján posee resaltos controlados por interposición de bancos de tosca que actúan como límite para la incisión vertical. Los cursos tributarios poseen características similares al troncal y generalmente, en los mayores, al igual que el río Luján, su base suele estar labrada en la Formación Ensenada.

Entre la planicie loésica y la planicie aluvial se encuentra una geoforma de transición, denominada laterales de valle. Se trata de una superficie más o menos continua paralela al curso fluvial, con una pendiente hacia el mismo, bien marcada, como se observa en la zona de Olivera. Se trata de una geoforma de erosión hídrica debida a pequeños cursos fluviales y al flujo no encausado, a los que se suman procesos gravitacionales de tipo reptación de suelos.

Análisis de las inundaciones

Causas y extensión de las inundaciones en la cuenca superior y media

Al generarse importantes precipitaciones en la cuenca de aporte y en el resto del área se producen importantes crecidas en el río. En el caso del río Luján, el escurrimiento responde al modelado fluvial, por lo tanto, el agua que desborda se encuentra con la planicie aluvial, lugar que ocupara el agua de desborde en mayor o menor extensión según la magnitud de la crecida. Este punto es vital, ya que, si el valle de inundación es ocupado por el inminente crecimiento demográfico el agua no tiene otro lugar y, por lo tanto, afectara a la población que allí se asiente. La magnitud y la frecuencia de las inundaciones están íntimamente relacionadas con la intensidad y distribución de las precipitaciones, la capacidad de infiltración y naturaleza de los materiales superficiales y de las características del paisaje. Es por esto que el aumento de población ha incrementado la posibilidad de inundación, dado que el aumento de terreno edificado incrementa considerablemente la escorrentía superficial y muy poca agua puede infiltrar sobre el suelo.

Las causas de las inundaciones en la zona estudiada son una conjunción de diversos factores naturales y humanos (Tabla 3). Las causas naturales incluyen las características climáticas y geológicas-geomorfológicas, entre ellas se destacan precipitaciones frecuentes de gran intensidad, existencia de una red de drenaje poco integrada, existencia de bajos anegables, presencia de capa freática alta y, en menor medida, el proceso de tapón ejercido por las sudestadas en las desembocaduras. La cuenca principal no posee el problema de la sudestada de forma directa, pero si se pueden sentir los efectos de esta como consecuencia de algún evento de esas características en su tramo inferior, trasladándolos aguas arriba, en especial hacia su tramo medio (ej. ciudad de Luján).

Numerosas inundaciones han afectado la región (Tabla 4). Tomando como referencia la ciudad de Luján (que es que la que más información concentra), se desprende que las principales inundaciones ocurrieron en los años 1885, 1985, 1993, 2014, 2015. Se han recopilado datos históricos de las distintas precipitaciones y del nivel alcanzado por el cauce en dichos eventos, desde 1800 hasta la actualidad (Tabla 4). Como se observa en la tabla anterior, desde fines del siglo XIX ya había registros de inundación. En septiembre de 1884 las aguas del río llegaron a la basílica con una precipitación de 245 mm, evento que se repitió en 1885 con una precipitación de 340 mm. Otras inundaciones importantes ocurrieron en 1900 (456,4 mm en siete días), 1903, 1911, 1912, 1914 (389,5 mm), 1933 (300 mm en 2 días), 1959 (del 1 al 20 de abril 349 mm), 1967 (232 mm, en 3 días), alcanzando el río una altura de 5,80 m.

Durante la década del ochenta, Luján sufrió una de sus principales inundaciones históricas. En mayo de 1985 cayeron unos 295,4 mm, lo cual ocasionó una crecida del río de 6,25 metros, dejando a la ciudad de Luján inundada desde la Ruta 7 hasta la Basílica. En esa oportunidad la cantidad de evacuados fue de 4.000. En noviembre del mismo año se registró una segunda inundación, en donde 160 hectáreas fueron alcanzadas por el agua, con más de 19.000 personas afectadas, 300 evacuados y 6.000 auto evacuados. En esta ocasión la Basílica quedó rodeada por un espejo de agua, de unos 0,80 m de altura. Tanto el centro, la terminal de ómnibus y el museo sufrieron anegamientos, alcanzando el agua en esos lugares unos 2 m de altura. Se generaron grandes pérdidas en los documentos del museo y material de archivo. En esta ocasión, el agua afectó sectores que estaban a 200 metros de la ribera del río.

En 1993 la altura registrada del río fue de unos 5,25 metros, generándose un ascenso de unos 20 cm por hora, y una precipitación de 140 mm. Otros eventos de inundación importantes se registraron en los años 2014 y 2015. Para 2014, en los meses de octubre y noviembre se registró una de caída de agua de unos 110-120 mm y una altura del río de 4,26 m. A comienzos de agosto de 2015, un temporal con intensas lluvias afectó varias regiones de la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe, Entre Ríos, y Córdoba. Este fenómeno provocó inundaciones en diversas cuencas, entre ellas la del río Luján. En esta ocasión el río alcanzó un nivel máximo de 5,43 m, generando grandes anegamientos y afectando principalmente los barrios ubicados en las zonas ribereñas.

En base al análisis de los planos brindados por el Museo Udaondo y el estudio de imágenes satelitales y fotos aéreas de diferentes épocas, las principales alteraciones antrópicas reconocidas a lo largo de la cuenca del río Luján que potencian el efecto de las inundaciones son: 1) intervenciones en zonas anegables, (relleno en sectores anegables, construcción de albardones y ocupación de la planicie aluvial); 2) cambio de drenaje superficial (rectificaciones, dragados, entubamientos), 3) cambios en el uso del suelo (cuenca) relacionados con la compactación, degradación y cambios en el tipo de actividad agrícola y su reemplazo por barrios cerrados y urbanizaciones), estos cambios implican, en primer lugar, el efecto de impermeabilización de las superficies del suelo (asfaltado y forestación del suelo) y 4) construcción de obstáculos al escurrimiento y flujo, como puentes y terraplenes de rutas y vías férreas.

En numerosos sectores de la cuenca se observa el incremento de cota por relleno en sectores anegables (planicie aluvial). A partir de las cartas topográficas de la cuenca del río Luján, se obtiene que la zona de ribera queda comprendida entre las cotas de 10 y 20 m. Varios de esos sectores han sido rellenados para poder elevar el terreno y para el asentamiento de viviendas. En otros casos, las viviendas se ubican sobre zonas bajas anegables. Según los planos, se observó que el aumento poblacional se desarrolló en el centro de la ciudad, pero con el correr del tiempo, se extendieron hacia la ribera y bajos. Los rellenos redujeron el ancho de la planicie aluvial limitando la sección del cauce durante las inundaciones. Alteraciones similares se reconocen también en la construcción de barrios privados en el tramo inferior del río Luján.

Tabla 3. Causas de las inundaciones en la cuenca superior y media del río Luján.

Causas de Inundaciones		Acciones, Procesos y Factores
Naturales	Climáticas	Grandes precipitaciones Sudestadas
	Geológicas- y Geomorfológicas	Suelos y materiales superficiales poco permeables Bajas pendientes regionales Crecidas del río Paraná en la zona del Delta
Antrópicas		Impermeabilización por urbanización Remoción de la cubierta vegetal Rectificación de cursos Obstrucción de cursos Ocupación de zonas anegables Remoción de la cobertura edáfica y compactación de los materiales superficiales. Acumulación de residuos en los cauces Puentes viales y ferroviarios con escasa luz, los que los convierte en diques.

Tabla 4. Eventos extremos en la cuenca del río Luján, precipitaciones asociadas y alturas del nivel de agua por encima del normal en la ciudad de Luján (Fuentes La Verdad, 1; El Telar, 2; Ladrán Sancho, 3; Página 12, 4; La Perla del Plata, 5; El Civismo 6; Presente, 7; El Tiempo, 8)

Fecha de la inundación (fuente)	Precipitación (mm)	Altura de Río (m)
1884 (1 y 2)	245	-
1885 (1 y 2)	340	-
1888 (1 y2)		-
1890 (5)	-	-
1900 (2)	456,4 (7 días)	
1932 (6)	-	-
1933 (2)	300	-
1950 (6)	-	6,35
959 (2)	349	-
1962 (6)	-	-
1967 (6)	400 (5 días)	5,8
1968 (6)	200 (2 días)	-
1982 (6)		3,90-3,83
1984 (6)		4,84 - 4,27
1985 (6)	mayo: 295,4	6,25 - 6,40
1986 (6)	213 (en 2 días) 108 (en 1 día)	4,79
1988 (6)	298	5,52
1991 (6)	-	3,68
1993 (6)	140	5,25
1995 (6)	-	4,16
1998 (6)	-	2,50
2000 (6)	-	3,95
2001 (6)	-	4,42
2003 (6)	-	4,04
2006 (6)	117	4,86
2012 (6)	-	5,12
2014 (7)	110-120	4,26
2015 (4)	+ 200	5,43
2017 (2)	70	1.80
2018 (2)		2.90
2018 (2)	120	-
2020 (2)	50	-

Un método empleado para contener la inundación en la ciudad de Luján fue la construcción de albardones de tierra bordeando los márgenes del río. El primer albardón habría sido inaugurado en 1889 en la zona de la ribera de la basílica, y aparece en el plano de 1912. La función de los albardones es la de contener el cauce en momentos de desborde. Para que esta función sea efectiva, los albardones no deben ser disectados en su longitud. Sin embargo, el corte del albardón para la construcción de un paso de vehículos en la calle Lavalle fue la principal causa de la catástrofe de 1967 en la ciudad de Luján. La nota periodística describe que las aguas entraban con tanta violencia que removieron los cimientos de la pasarela recién inaugurada, y por lo tanto se desmoronó. Esta pasarela, se volvió a inaugurar en 1968, pero

en una de las inundaciones de ese mismo año, con una caída de agua de 200 mm, nuevamente volvió a colapsar. En estos cortes del albardón durante la inundación, el flujo de agua aumenta la velocidad y posee mucha energía, incrementando la erosión en las bases de estas estructuras y la susceptibilidad de la inundación en estos sectores.

En la ciudad de Luján el relleno artificial de la planicie disminuye la sección transversal natural del río incrementando la altura del pelo de agua durante la inundación. De esta manera, frente a un mismo caudal de crecida, el nivel de inundación será mayor, potenciando las superficies de terreno inundables. Esta situación se reproduce aguas abajo de la citada localidad.

La impermeabilización de las superficies del suelo es especialmente debida a la pavimentación por la expansión urbana. Esta conlleva un aumento de la escorrentía superficial y una disminución de la infiltración durante el pico de las crecidas (Marcomini y López, 2011). Además, la escorrentía superficial favorece la erosión a medida que el agua fluye.

Finalmente, otro aspecto importante es la construcción de obstáculos al escurrimiento y flujo, entre los que destacan los numerosos puentes, tanto viales como ferroviarios. Los puentes en la ciudad de Luján datan de 1890. Algunos han sido modificados y otros demolidos, pero en general son los principales conectores de los habitantes de la ciudad. Una de las problemáticas que trae la construcción de los puentes es que, al momento de crecida, quedan retenidos todos aquellos materiales que el río arrastra consigo, acumulándose basura en ese lugar. Esto genera una disminución del perfil transversal del cauce, una disminución local del caudal, propiciando el desborde del río aguas arriba.

Considerando los efectos producidos por las inundaciones en la ciudad de Luján desde su fundación, se observa que los mismos han ido aumentando a medida que las modificaciones antrópicas se incrementaban sobre el sistema fluvial. Estas modificaciones fueron realizadas sobre el lecho del río y en sus planicies. En este último punto, se incluyen los asentamientos poblacionales generados por la expansión urbana no planificada, y los grandes emprendimientos inmobiliarios (barrios cerrados).

Todas estas modificaciones realizadas sobre el ambiente natural generaron un aumento significativo de los efectos de las inundaciones en toda la cuenca del río Luján.

Mapa de zonas de susceptibilidad de inundación de la cuenca de río Luján

Los efectos de la naturaleza sobre las poblaciones humanas y sus diversas actividades económicas son múltiples y variados. El accionar de los procesos naturales muchas veces puede alcanzar una importante extensión, magnitud y violencia generando grandes pérdidas. Un determinado fenómeno natural es un proceso que se genera en la naturaleza y que posee una determinada probabilidad de ocurrencia. Este fenómeno o acontecimiento, posee una localización, magnitud o intensidad y frecuencia.

El riesgo en una comunidad determinada, en este caso para la zona de estudio en la cuenca del río Luján, incluye la amenaza o peligrosidad natural, la exposición dada por la localización de la población y su vulnerabilidad. Para el caso particular de las inundaciones, el aumento de los daños generados no implica un incremento de la frecuencia o intensidad del evento, sino que puede significar un incremento de la exposición por un aumento de la urbanización en las zonas aledañas a los cursos fluviales, o en otros casos, por un aumento en la vulnerabilidad (por ejemplo, el establecimiento de la población socialmente más vulnerable) (Figura 6).



Figura 6. A. Vista desde un avión de la ciudad y la Basílica de Luján (11/2014) (Fuente: <http://noqueremosinundarnos.blogspot.com/2014/11/imagen-satelital-de-la-inundacion-de.html>). B. Emprendimiento San Sebastián en el límite entre Pilar y Escobar (10/2014). C. Basílica de Luján: inundaciones 2014. (Fuente: <http://www.eladambuenosayres.com.ar/la-importancia-de-los-humedales-para-reducir-los-riesgos-de-desastres-naturales/>) D. ribera inundada, ciudad de Luján (09/2018) (Fuente: <https://tribunadelpueblo.com.ar/2018/09/16/por-las-fuertes-lluvias-el-rio-lujan-salio-de-su-cauce-e-inunda-la-ribera/>).

Del mapa de susceptibilidad de inundación de la cuenca del río Luján (Figura 7) surge que el grado alto de susceptibilidad se diferenció para aquellos sectores más propensos a los anegamientos en los momentos de precipitaciones, es decir, aquellos que se encuentran en las cercanías del río y sectores deprimidos. Por lo tanto, se agruparon dentro de este grupo las planicies de inundación, cubetas de deflación, canales de marea, planicie deltaica, estas últimas dos, aguas abajo, fuera del área de estudio. A este grado de susceptibilidad se le identificó con un color azul oscuro.

El grado medio de susceptibilidad se ubica en aquellos sectores que poseen cotas un poco más elevadas. Estos sectores son alcanzados por las aguas de desborde en aquellos eventos de importante intensidad de precipitación, pero en general, el agua escurre rápidamente de estas áreas y no se generan importantes anegamientos. Las geoformas que poseen grado medio de susceptibilidad son laterales de planicie loésica y la antigua planicie de marea (fuera del área estudiada). Este grado medio de susceptibilidad se evidencia en el mapa con una coloración celeste oscura.

Finalmente, el grado bajo de susceptibilidad queda establecido para aquellos sectores donde difícilmente el agua de las inundaciones alcance debido a que, además de poseer una cota elevada, mayor a 20 metros, están alejadas de la zona de desborde. De esta manera, la geoforma que corresponde a la planicie loésica. La excepción está dada por la ocasional presencia de cubetas, en las cuales el nivel freático aflora, por lo que se incluyen en los sectores de alta o media susceptibilidad, según el caso.

El mapa de susceptibilidad constituye una herramienta para la identificación de zonas con grados de susceptibilidad diferente, por lo tanto, permite plantear distintas medidas tanto estructurales como no estructurales, incluyendo en este último caso, pautas para el ordenamiento territorial y la planificación con la finalidad reducir los efectos ocasionados por las inundaciones.

CONCLUSIONES

La cuenca principal del río Luján experimenta frecuentes inundaciones, las cuales han quedado registradas en varias localidades que allí se asientan. Una de ellas es la ciudad de Luján, la cual registra eventos desde su fundación en 1885. Las inundaciones tienen una relación directa con las precipitaciones; sin embargo, las modificaciones antrópicas que se han realizado sobre el sistema fluvial las han potenciado significativamente. De esta manera, las crecidas ordinarias afectan sectores que no eran alcanzados previamente.

Las modificaciones humanas más significativas realizadas sobre el sistema fluvial se han agrupado a partir del análisis de la evolución histórica en cinco grupos. El primero incluye obras de relleno en planicies aluviales y bajos, mediante el incremento de cota y la construcción de albardones. En la ciudad de Luján fue producto del aumento demográfico, pero en el tramo inferior de la cuenca principal se da por el aumento de la construcción de barrios privados sobre la planicie aluvial. El segundo grupo corresponde a las modificaciones humanas que generaron un cambio en el drenaje superficial. En el tercer grupo se encuentran

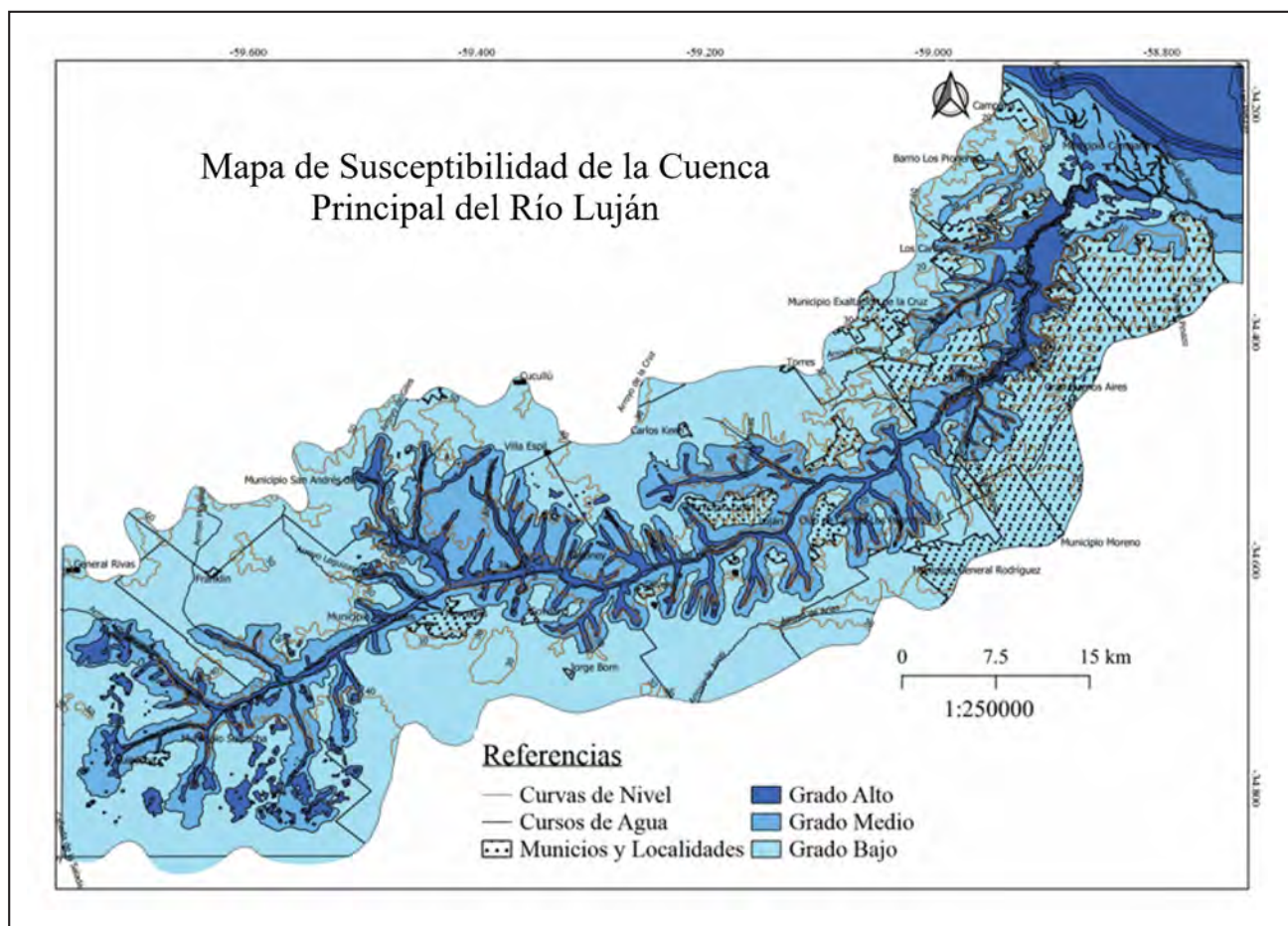


Figura 7. Mapa de Peligrosidad de la Cuenca Alta y Media del Río Luján.

las modificaciones generadas por la impermeabilización de las superficies del suelo, ya sea por asfaltado e incremento urbano o por los cambios en el uso del suelo (compactación, degradación y cambios en el tipo de actividad agrícola). El último grupo contiene las modificaciones relacionadas con la construcción de obstáculos al escurrimiento y flujo y en este punto se incluye la construcción de puentes.

Es evidente que, ante las sucesivas modificaciones sobre el ambiente fluvial natural, los efectos de las inundaciones se han ido incrementando. Esto se demuestra en los diversos registros históricos periodísticos de inundaciones donde se plasma que, ante las sucesivas modificaciones antrópicas sobre el lecho fluvial, los efectos de las inundaciones se fueron agravando, sobre todo en estos últimos años.

A partir de la caracterización geológica, geomorfológica, edáfica e hidrológica del área se realizó un mapa de susceptibilidad de los tramos superior, medio e inferior de la cuenca principal del río Luján. Se delimitaron tres grados de susceptibilidad, siendo estos, bajo, medio y alto, quedando agrupadas, en cada uno de ellos, diversas geoformas y sus suelos asociados. El grado alto contiene los sectores de cotas con valores menores de 15 metros, ubicándose en las inmediaciones de la ribera del río. El grado medio corresponde a las áreas de cotas entre 15 y 20 metros. El grado bajo se sitúa en zonas de cotas de más de 20 metros, ubicados sobre la planicie loésica.

Del mapa de susceptibilidad se desprende que, cuando se producen los eventos de inundación, si bien toda la cuenca se ve afectada, los mayores efectos se observan en los sectores de grados de susceptibilidad alta. Estas zonas están contenidas dentro del área azul oscura y ubicadas en las cercanías de la ribera donde, en varias localidades de la cuenca media e inferior, se ubican importantes asentamientos y la urbanización es importante, registrándose grandes pérdidas económicas y causando importantes problemas sociales en la región. Asimismo, cuando estos eventos alcanzan la zona de la cuenca superior, donde la actividad agropecuaria es dominante, las mismas ven sumamente afectadas por el alcance del agua.

En función del trabajo realizado, se desprende que, para lograr la disminución de los efectos nocivos de las inundaciones en la zona, es fundamental tener en cuenta las características geomorfológicas del sistema fluvial. Consecuentemente es necesario considerar los aspectos geológico-geomorfológicos en la planificación y en la toma de decisiones en lo referente a la implementación de medidas tanto estructurales como no estructurales. Estas últimas generalmente soslayadas, suelen ser las más efectivas a la hora de mitigar los efectos de las inundaciones e incluyen en primer lugar el ordenamiento territorial. Asimismo, las intervenciones hidráulicas, asentamientos habitacionales, y cualquier tipo de modificación que se realice en las inmediaciones y sobre el río deben basarse en la consideración de los aspectos propios del medio físico.

CONTRIBUCION DE AUTORÍA

“Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Vanesa G. Molero, Fernando X. Pereyra, Silvia Marcomini. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Vanesa G. Molero y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.”

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

“Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés”.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AMEGHINO, F. (1889).

Contribución al conocimiento de los mamíferos fósiles de la República Argentina.
Actas de la Academia Nacional de Ciencias de la República Argentina en Córdoba, Vol. 6, 1-298.

ANDRADE, M. (1986).

Factores de deterioro ambiental en la cuenca del Río Luján.
Instituto de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires.

BLASSI, A., CASTIÑEIRA LATORRE, L., DEL PUERTO, L., PRIETO, A., FUCKS, E., DE FRANCESCO, C., HANSON, P., GARCÍA RODRIGUEZ, F., HUARTE, R., CARBONARI, J., YOUNG, A. (2010).

Paleoambientes de la cuenca medio del río Luján (Buenos Aires, Argentina) durante el último período glacial (EIO 4-2).

Latin american journal of sedimentology and basin analysis, Vol. 17: 85-111.

BREA, J., REYNA, J., SPALLETI, P., (2007).

Diagnóstico del funcionamiento hidrológico hidráulico de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires.
Delimitación de las zonas de bajo riesgo hídrico. Laboratorio de hidráulica aplicada. Instituto Nacional del Agua. Buenos Aires.

BUZAI, G. D. (2018).

Crecimiento urbano y potenciales conflictos entre usos del suelo en el municipio de Luján.
Cuadernos Geográficos, Vol. 57: 155-176.

BUZAI, G.D.; LANZELOTTI, S. L. (2019).

Atlas de Geografía Humana de la cuenca del río Luján.
Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad de Luján. Buenos Aires.

- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F.O. Y COLADO, U.R. (1973).
Geología superficial de las Hojas Castelli, J.M. Cobo y Monasterio, Provincia de Buenos Aires.
5º Congreso Geológico Argentino. Vol. 4: 27-39.
- FIDALGO, F., COLADO, U.R. Y DE FRANCESCO, F.O. (1973).
Sobre ingresiones marinas cuaternarias en los partidos de Castelli, Chascomús y Magdalena (Provincia de Buenos Aires).
5º Congreso Geológico Argentino (Córdoba). Vol. 4: 225-24.
- FRENGUELLI, J. (1945).
El Piso Platense.
Revista del Museo de La Plata. Vol. 2: 287-311.
- FRENGUELLI, J. (1957).
Neozoico. En Geografía de la República Argentina.
Sociedad Argentina de Estudios Geográficos (GAEA). Vol. 2: 1-218.
- FUCKS, E. (2005).
Estratigrafía y geomorfología en el ámbito del curso inferior del río Luján, Provincia de Buenos Aires.
Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, 857: 239.
- FUCKS, E. Y DESCHAMPS, C.M. (2008).
Depósitos continentales cuaternarios en el noroeste de la provincia de Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. Vol. 63: 326-343.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). (2009).
Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3560.
Buenos Aires.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS (INDEC).
Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 1991, 2001, 2010.
- MARCOMINI, S.C., LÓPEZ, R.A. (2011).
Problemática ambiental del estuario del río de la Plata y Delta del Paraná.
En López, R.A., y Marcomini, S.C. (Ed.). Problemática de los Ambientes Costeros, Sur de Brasil, Uruguay y Argentina (129- 144). Buenos Aires, Argentina: Croquis.
- PEREYRA, F. X. (2004).
Geología urbana del área metropolitana bonaerense (AMBA), Argentina y su influencia en la problemática ambiental.
Serie de contribuciones técnicas - Ordenamiento Territorial. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Dirección de Geología Regional y Aplicada. Servicio Geológico Minero Argentino. Vol. 4.
- PEREYRA F. X. (2014).
Inundaciones en el área Metropolitana Bonaerense (Amba) y Gran La Plata: causas, evaluación del riesgo y ordenamiento territorial.
XI Simposio de la Asociación Internacional de Planificación Urbana y Ambiente, Vol. 11: 254-267.
- PEREYRA, F. X., TOBÍO, M. (2018).
Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires.
Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Ordenamiento Territorial, Vol. 10.
- PEREYRA, F; CASANOVA, C; PAGNANINI, F. (2021).
Hojas Geológicas 3557- I Buenos Aires, 3560- II José C. Paz.
Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. (En prensa). Buenos Aires.
- SOIL SURVEY STAFF. (2014).
Soil Taxonomy - Claves para la Taxonomía de Suelos.
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Vol. 400. Décima segunda Edición.
- TÓFALO O., ETCHICHURY M. Y FRESINA M. (2005).
Características texturales y petrofacies de depósitos neógenos, Bancalari, provincia de Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 60: 316-326.
- TOLEDO, M. (2005).
Secuencias Pleistocenas “lujanenses” en su sección tipo: Primeras dataciones C14 e implicancias estratigráficas, arqueológicas e históricas, Lujan-Jáuregui, provincia de Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 60: 417-424.
- TOLEDO, M. (2011).
El legado Lujanense de Ameghino: revisión estratigráfica de los depósitos pleistocenos-holocenos del valle del río Luján en su sección tipo.
Registro paleoclimáticos en la Pampa de los estadios OIS 4 al OIS 1. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 1: 121-167.



Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la prospección de agua subterránea en un sector costero del sudoeste bonaerense, Argentina

Electrical resistivity tomographies applied to groundwater prospection in a coastal sector of the southwest of Buenos Aires, Argentina

Ruffo, Andrés G.^{1,2} - Rey, Matías^{1,2} - Albouy, E. René^{2,3}
Giorgi, Juan Manuel^{2,3} - Carrica, Lucía^{2,3} - Bastianelli, Nerea^{2,3}

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 02 de septiembre de 2022

Resumen

El sector costero del sudoeste bonaerense, de clima árido a semiárido, presenta como rasgo distintivo una cadena de dunas litorales. Este cordón psamítico aloja un acuífero libre portador de agua apta para el consumo humano, siendo la única fuente de abastecimiento para las localidades del área. El objetivo del presente estudio es identificar las condiciones geológicas del subsuelo, que determinan la calidad y cantidad de agua subterránea disponible para el consumo, por medio de la utilización de tomografías de resistividad eléctrica. La metodología aplicada consistió en la realización y parametrización de tomografías de resistividad eléctrica del subsuelo en distintos sectores del cordón costero, junto con la interpretación de las imágenes de resistividad eléctrica generadas, teniendo en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos. Como resultados, se destaca la identificación, en las imágenes generadas, de rasgos litológicos y estratigráficos íntimamente relacionados tanto con los parámetros hidráulicos del acuífero, como con las variaciones de calidad química del agua. En este sentido, se infirió la presencia de paleocauces y variaciones laterales litológicas, entre otros aspectos. La parametrización del método permite definir intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas de la cadena de médanos. Se concluye que la metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento geológico e hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos precisos y de gran utilidad para la explotación racional del acuífero y la proyección de obras de captación de agua subterránea.

Palabras clave: Dunas Costeras, Hidrogeología, Prospección, Tomografías de resistividad eléctrica.

Abstract

The coastal sector of southwestern Buenos Aires, with an arid to semi-arid climate, is characterized by a chain of coastal dunes. This psammitic dune chain hosts a free aquifer that

1. CONICET, CCT Bahía Blanca, Argentina
2. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur,
San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.
3. CGAMA-CIC. San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.
 andres.ruffo@uns.edu.ar

carries water suitable for human consumption, being the only source of supply for the localities of the area. The objective of this study is to identify the geological conditions of the subsurface, which determine the quality and quantity of groundwater available for human consumption, through the use of electrical tomographies. The applied methodology consisted on the execution and parameterization of electrical tomographies of the subsurface in different sectors of the coastal chain, together with the interpretation of the electrical resistivity images generated, taking into account geological, geomorphological and hydrogeological aspects. As a result, the identification, in the generated images, of lithological and stratigraphic features closely related both to the hydraulic parameters of the aquifer and to the variations in the chemical quality of the water stands out. In this sense, the presence of paleochannels and lithological lateral variations, among other aspects, was interpreted. The parameterization of the method allows to define intervals of resistivities correlatable with the hydrogeological characteristics of the chain of dunes. It is concluded that the applied methodology is very useful for the geological/hydrogeological knowledge of the subsurface and provides accurate and useful data for the rational exploitation of the aquifer and the planning of groundwater catchment works.

Keywords: Coastal Dunes, Electrical resistivity tomography, Hydrogeology, Prospecting.

INTRODUCCIÓN

El agua es un bien escaso e indispensable para la vida humana y de gran importancia en el desarrollo socioeconómico de una región. La cadena de dunas costeras del sudoeste bonaerense configura un acuífero detrítico, que aloja agua dulce de excelente calidad fisicoquímica, resultando la única fuente de consumo disponible para las poblaciones del sector. Este cuerpo psamítico se encuentra suprayaciendo depósitos finos, litológicamente clasificados como loess, portadores de agua subterránea con mayor contenido en sales y variados contenidos de oligoelementos indeseados como Flúor y Arsénico. El contraste litológico de los sedimentos que componen la columna estratigráfica, sumado a la variación de salinidad del agua en profundidad, hacen de la prospección geoelectrica una metodología ideal a la hora de definir los sectores y las profundidades más propicias para efectuar captaciones de agua.

El método geoelectrico permite determinar la resistividad aparente del subsuelo, por medio de la inyección de corriente eléctrica en un conjunto de electrodos (electrodos de corriente)

hincados en la superficie del terreno y la posterior lectura de la diferencia de potencial en otro conjunto de electrodos (electrodos de potencial). El valor de la resistividad se encuentra influenciado por las características litológicas del perfil atravesado, su estructura, el grado de humedad de los sedimentos y la salinidad del fluido alojado, entre otros aspectos (Orellana, 1972).

La técnica multielectrónica aplicada en esta investigación, denominada tomografía de resistividad eléctrica (ERT por su sigla en inglés), permite realizar la inyección de corriente y posterior lectura de la diferencia de potencial. Se basa en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante técnicas numéricas, permitiendo así obtener las variaciones de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente, generando una imagen de resistividad eléctrica (IRE) en dos dimensiones (Loke, 2004).

De esta manera, el objetivo del presente trabajo es identificar las características geológicas del subsuelo, las cuales condicionan la calidad y cantidad de agua subterránea disponible para el consumo humano, por medio de la utilización de ERT.

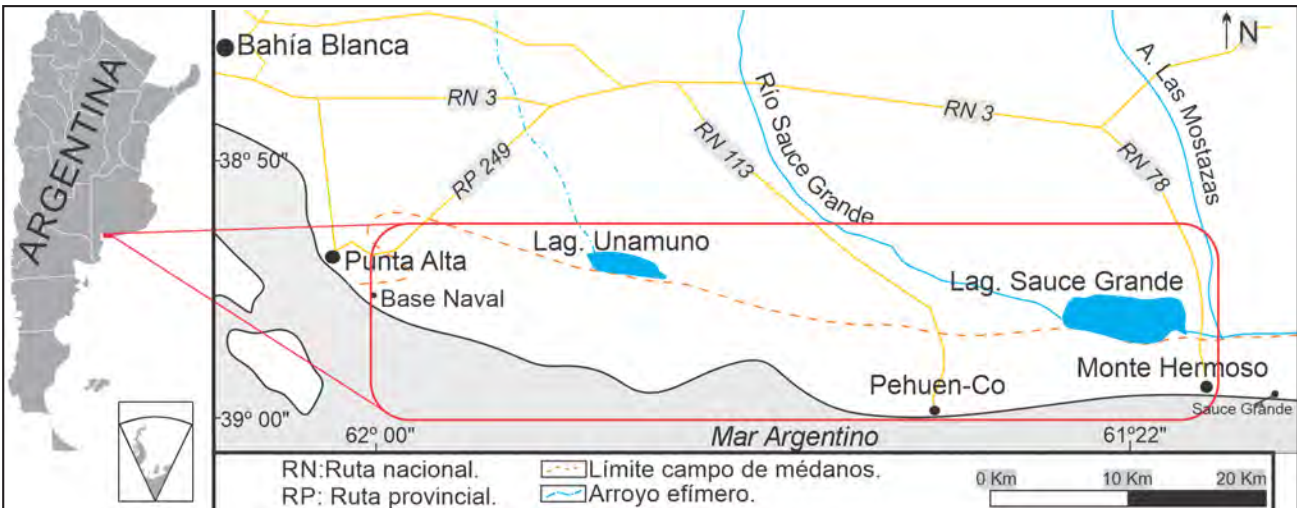


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO Y CLIMA

El área de estudio se ubica en el sector costero del sudoeste bonaerense, sobre la cadena de dunas psamíticas, entre las ciudades de Punta Alta, en el partido de Coronel de Marina Rosales, incluyendo a la villa balnearia de Pehuen C  y la ciudad de Monte Hermoso, cabecera del partido homónimo (Figura 1). Estas dos últimas se abastecen únicamente de agua subter nea.

Utilizando los índices climáticos de *Thornthwaite* (1948) el clima de la región se clasifica como C1 d B'2 a', es decir sub-húmedo 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) (*Ruffo et al., 2021*).

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

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

A los efectos del presente trabajo, la geología del sector puede simplificarse de la siguiente manera: iniciando la secuencia se encuentran variados depósitos finos, en general loessicos correspondientes a la Fm. Monte Hermoso, de edad pliocena (*Zavala, 1993*) correlacionables con los sedimentos pampeanos definidos por *Fidalgo et al. (1975)*. Suprayaciendo lo anterior, en proximidades a la línea litoral se encuentra depositada una secuencia arenosa rica en conchillas, interpretadas como depósitos de playa, sobre la cual se encuentra la cobertura psamítica moderna, compuesta de arenas finas a medias.

El ac ufero libre del cual se abastecen las poblaciones del sector se encuentra alojado en las arenas que forman el cordón costero (*Región Costera, según la clasificación de Regiones Hidrogeológicas propuesta por Auge, 2004*). La morfología del manto freático tiende a copiar de forma suave las características topográficas del relieve, identificándose dos sistemas de flujo.

El primero, de carácter local y somero, presenta flujos radiales divergentes con sectores de descarga locales en los bajos topográficos de interduna. Un rasgo distintivo de estos sectores es la formación de pequeñas lagunas u "ojos de agua", resultantes del afloramiento del nivel freático (*Ruffo et al. 2021*). El segundo sistema, más profundo, responde a las pendientes regionales con dirección norte sur, descargando en el mar argentino. Dicho ac ufero libre, se emplaza sobre una capa de limos lo ssicos (Fm. Monte Hermoso/Sedimentos Pampeanos) de comportamiento ac ufero/acuitardo, con aguas de mayor tenor salino, actuando como hidroapoyo del sistema (Figura 2).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo consistió en la búsqueda de información antecedente del área, conjuntamente con campañas geofísicas y trabajos de gabinete.

Como base para esta investigación, se realizaron ERT. Para la ejecución del método se utilizó un resist metro automático ARES (GF Instruments), el cual posee 48 electrodos, con un espaciamiento máximo de 5 m entre ellos y es energizado por una fuente externa (batería). Esta unidad es la encargada de verificar el estado de las conexiones, ejecutar a partir de los requerimientos preestablecidos la secuencia de medidas y almacenar los resultados.

Los arreglos electródicos utilizados fueron Schlumberger y Wenner, con progresivas (línea recta entre el primer y último electrodo) de 235 m de longitud. Las profundidades máximas de exploración rondaron entre 45 a 47 m.

Para efectuar la parametrización del método aplicado, se realizó una ERT en un sector cuya columna estratigráfica era conocida a través de recortes de perforación, como así la posición del nivel freático y la salinidad del agua. De esta manera, se logró darle un sentido geológico/hidrogeológico a las resistividades reales del subsuelo.

Tomando como base los datos anteriormente mencionados, se realizaron cuatro ERT en sectores específicos de la cadena de médanos (Figura 3).

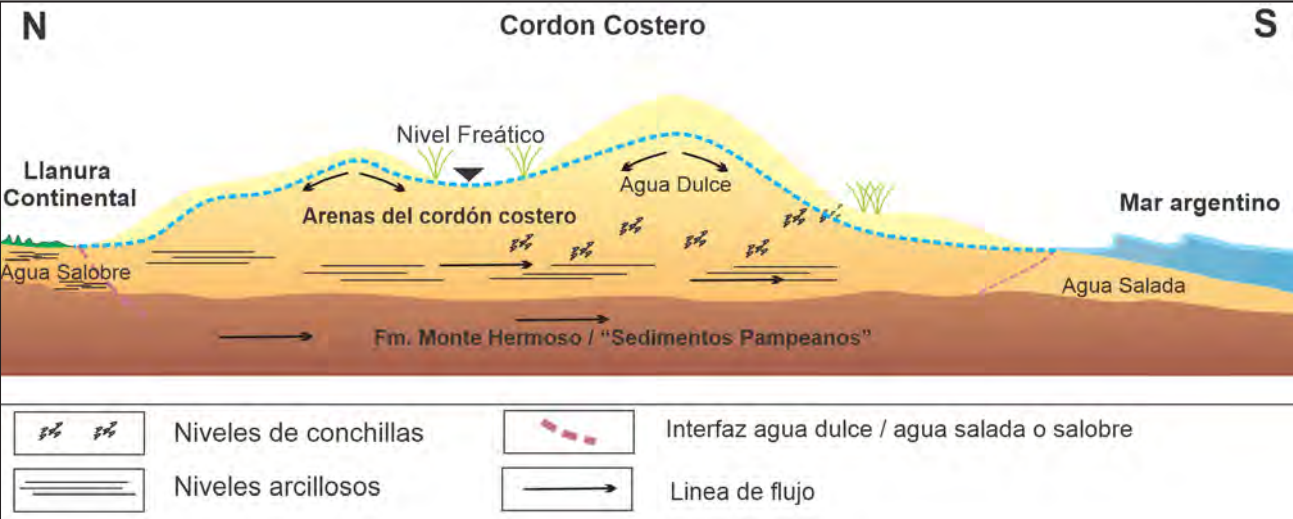


Figura 2. Perfil hidrogeológico simplificado del sector costero (Ruffo et al., 2021).

En el área correspondiente la villa balnearia de Pehuen C   se plantearon tres ERT, la primera de ellas (ERT A) en el límite entre la cadena de médanos y la llanura agrícola ganadera, la segunda (ERT B) en un sector próximo a perforaciones de referencia y la tercera (ERT C), ubicada a escasos metros frente costero. En el área de Punta alta se plante   la cuarta y última ERT en un sector donde el ac  ufero presenta agua dulce, pero de mayor salinidad que en el sector de Pehuen C  .

En gabinete, los datos de campo fueron invertidos utilizando el programa Res2dinv de GEOTOMO (Loke, 2004). Este permite mediante algoritmos de inversión y análisis de los datos de campo, generar un modelo de resistividad real, el cual se grafica como una IRE.

RESULTADOS

La primer ERT, realizada en la localidad de Monte Hermoso (Figura 4), permitió parametrizar la metodología aplicada respecto a la geología e hidrogeología del   rea. En la imagen de resistividad eléctrica se logró definir la zona no saturada, con resistividades

mayores a 120 $\Omega.m$ y la zona saturada con resistividades entre 10 y 120 $\Omega.m$. Se pudo constatar que, en la zona saturada, los valores de resistividad menores a 20 $\Omega.m$ corresponden a depósitos loésicos de los sedimentos pampeanos, portadores de agua cuya conductividad eléctrica (CE) superan los 1500 $\mu S/cm$. Los valores de resistividad comprendidos entre 20 y 120 $\Omega.m$ pertenecen a depósitos arenosos, saturados con agua dulce (CE 700 $\mu S/cm$), con un espesor aproximado de 15 m.

La primera de ellas (A), ubicada en el sector límite entre la llanura pampeana y la cadena de médanos permitió identificar, como rasgo sobresaliente, un sector de interfaz o cuña salobre generada entre el agua dulce del ac  ufero psamítico y el agua salobre de la llanura circundante, tanto longitudinalmente como en profundidad (Figura 5). Este hecho resulta coherente con el modelo teórico de flujo planteado en la Figura 2.

En una segunda ERT (B), realizada sobre el límite norte del ejido urbano de Pehuen C  , se observaron esquemas de resistividad eléctrica interpretados como paleocauces, rellenos con arenas gruesas y gravas. Esto resulta coincidente con depósitos



Figura 3. Ubicación de las ERT realizadas.

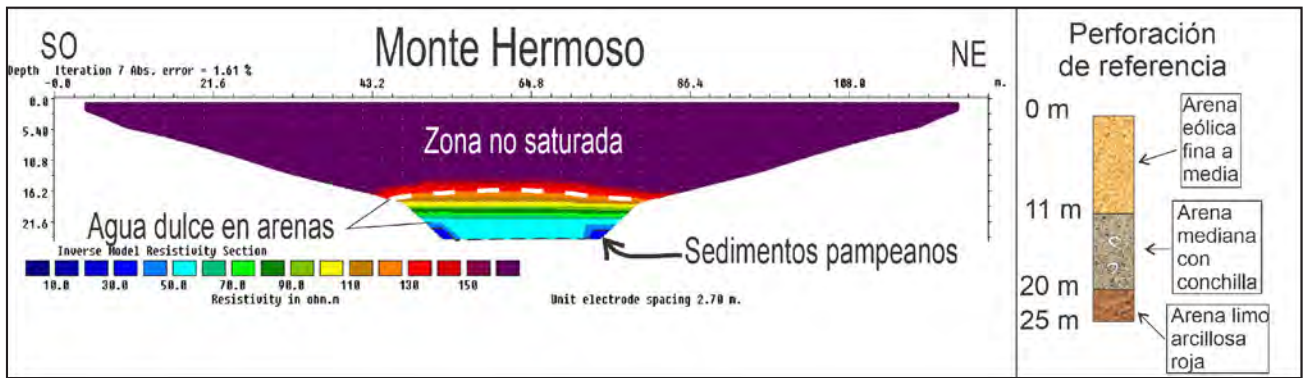


Figura 4. Imagen de resistividad eléctrica parametrizada con la columna estratigráfica del sector (arreglo eléctrico Wenner).

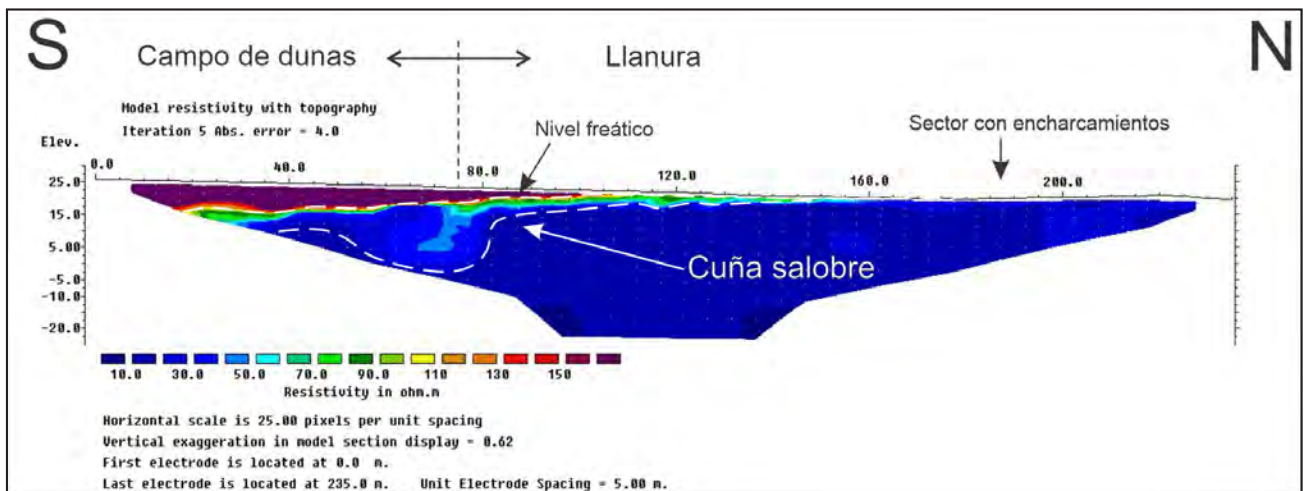


Figura 5. Imagen de resistividad eléctrica A (arreglo eléctrico Wenner). Limite campo de dunas-Llanura pampeana.

fluviales, ricos en materiales gruesos, expuestos tanto en el sector de playa como en excavaciones realizadas en la llanura. Dichos paleocauces se ven limitados por materiales de resistividades menores, interpretados como arenas finas a limosas en base a recortes de perforaciones próximas (Figura 6).

La tercer ERT del sector, se realizó perpendicularmente a la línea de costa, iniciando en el médano frontal y concluyendo unos 235 m en dirección norte. En ella fue posible identificar una zona no saturada de aproximadamente 5 m. A su vez, el espesor saturado con agua dulce alcanzó los 30 m, sin reconocerse una interfaz agua dulce agua salada entre el acuífero psamítico y el mar (Figura 7).

A su vez una cuarta ERT de 235 m de extensión fue llevada a cabo en el sector oeste del área de estudio, límite físico de la cadena medanosa y próximo a la ciudad de Punta Alta (Figura 8).

La particularidad de esta, es la presencia de un nivel conductor ($8 \Omega \cdot m$ en promedio) entre los 2 m y 13 m debajo del nivel del terreno, no reconocido en las otras ERT realizadas en la cadena de médanos (tomando en consideración las bajas resistividades observadas, la escala de colores utilizada para interpretar la IRE difiere de los casos anteriores).

Debido a que las perforaciones existentes en el sector, que alumbraban dicho nivel, extraen agua dulce ($1800 \mu S/cm$), se procedió a obtener muestras de sedimento mediante la utilización de una "Pala Helix", con el fin de analizar el factor litológico en la respuesta eléctrica.

Los sedimentos que componen los primeros 3 m de la columna estratigráfica (límite útil de la pala helix empleada) corresponden a arenas medias a finas, mal seleccionadas, con un importante contenido de arcillas blanquecinas. A partir de los 2 m bajo el nivel del terreno se reconoció el nivel freático, siendo evidente la presencia de arcillas en el sedimento por el comportamiento plástico del mismo.

En laboratorio se pudo observar que, si bien la mineralogía es similar al resto de las arenas observadas en el cordón costero, el contenido de arcillas blanquecinas y de textura pulverulenta en seco no había sido reconocida en los otros sitios estudiados. La muestra reaccionó rápida y enérgicamente al agregarle ácido clorhídrico (al 10%), haciendo evidente un elevado contenido de carbonatos.

De esta manera la conductividad eléctrica del nivel analizado podría deberse, en mayor medida, a factores litológicos y no a la salinidad del agua alojada en el acuífero.

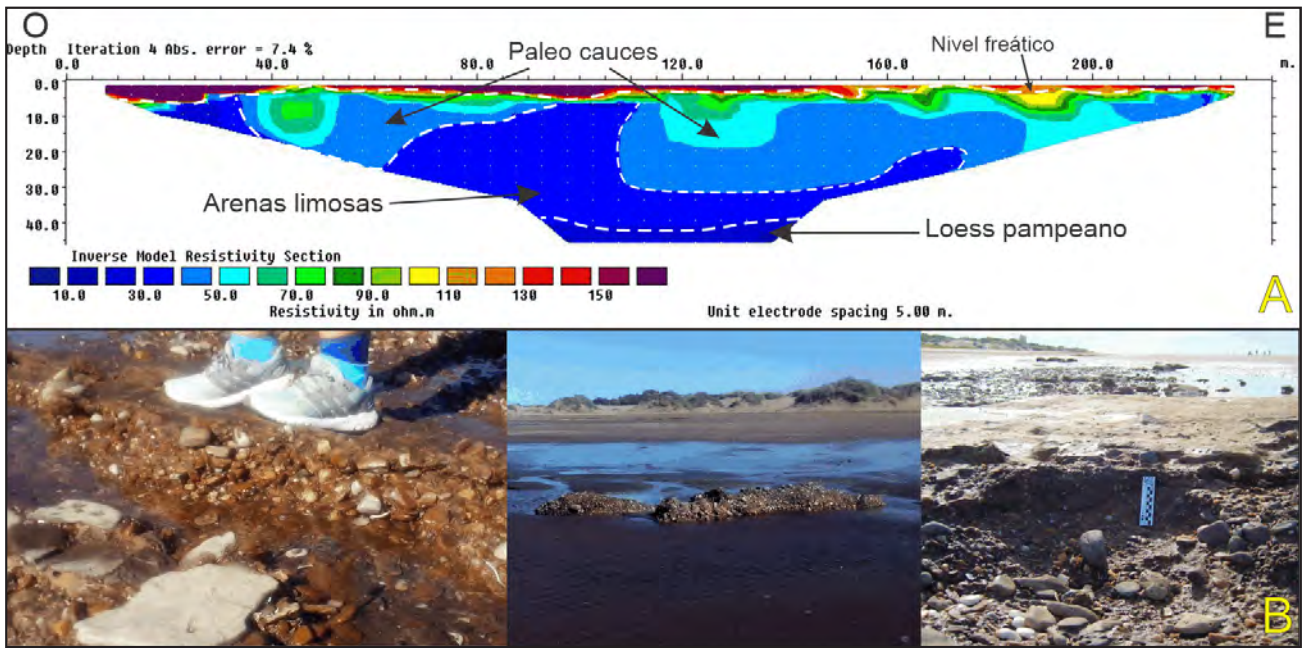


Figura 6. A) Imagen de resistividad eléctrica B (arreglo electrodico Wenner) donde se observan patrones de resistividad eléctrica interpretados como paleocauces. B) Depósitos correspondientes a paleocauces expuestos en el sector de playa.

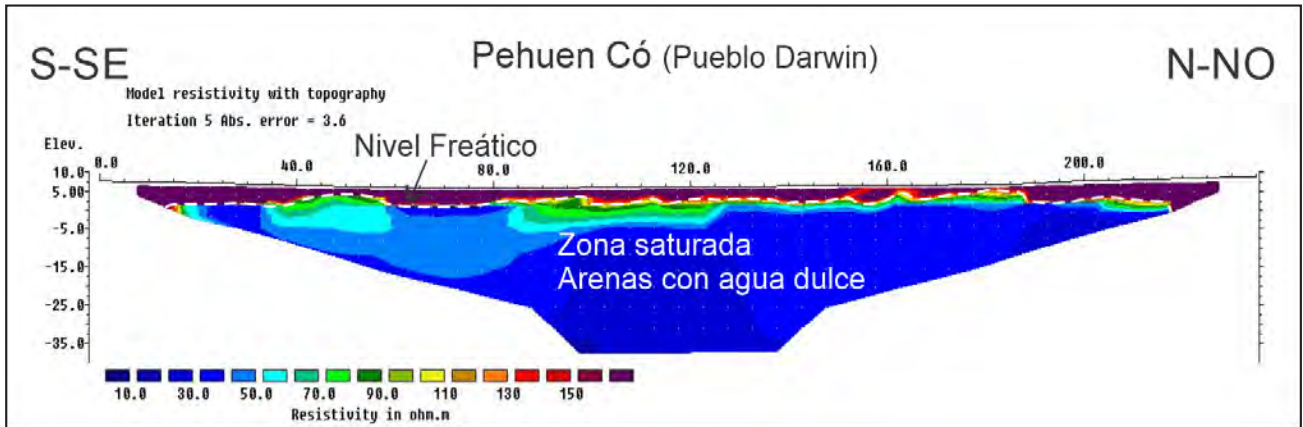


Figura 7. Imagen de resistividad eléctrica C (arreglo electrodico Wenner), correspondiente al sector costero de Pehuen C6, barrio pueblo Darwin.

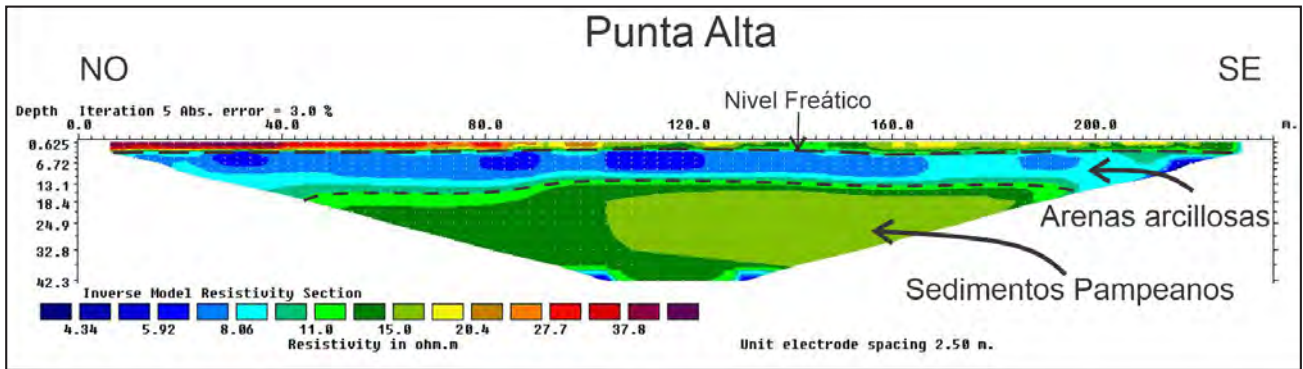


Figura 8. Imagen de resistividad eléctrica correspondiente al sector oeste del área de estudio (Arreglo electrodico Wenner).

Debajo del nivel conductivo el perfil continúa con valores de resistividad más elevados, en torno a los 12 - 15 Ω .m. Estos son interpretados como sedimentos pampeanos, a partir de su comportamiento resistivo y la correlación del techo de la Formación en distintas perforaciones de la zona.

El contenido fino carbonático de las arenas analizadas podría deberse a un retrabajo de los sedimentos pampeanos, cuyos afloramientos son abundantes en el sector. Estos suelen presentar en su techo niveles ricos en carbonatos denominados localmente como “tosca”.

CONCLUSIONES

Dado el contraste resistivo entre los distintos materiales que componen la columna estratigráfica del sector, sumado a las variaciones de salinidad existentes en profundidad, la prospección geoelectrica resulta una herramienta económica y efectiva para la exploración del recurso hídrico subterráneo.

La parametrización del método permite definir intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas de la cadena de médanos.

En general, los valores superiores a 120 Ω .m se consideran zona no saturada. Dentro de la zona saturada, los niveles psamíticos con agua dulce presentan resistividades entre 20 y 120 Ω .m,

mientras que los sedimentos pampeanos corresponden al intervalo entre 10 y 20 Ω .m.

Un caso particular resultan las arenas analizadas en proximidades de Punta Alta, donde el contenido carbonático de las mismas induciría una disminución de la resistividad obtenida, presentando un valor promedio de 8 Ω .m. Los datos adquiridos en dicho sector, exponen un cambio litológico en las arenas del cordón costero medanoso. Este aspecto genera una disminución de la resistividad respecto al resto de los niveles psamíticos analizados y debe ser tenido en cuenta para futuras prospecciones en el área.

A partir de la parametrización planteada, se infirió la presencia de paleocauces rellenos de materiales gruesos (posiblemente de tamaño grava), variaciones litológicas tanto en profundidad como lateralmente y zonas de mezcla entre aguas de distinta concentración salina. Conocer estos aspectos es de gran importancia en la planificación de campos de bombeo, ya que permite acotar arealmente y en profundidad los sectores objetivo con mayor probabilidad de encontrar agua de buena calidad y en cantidades económicamente explotables.

Se concluye que la metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento geológico/hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos precisos y de interés para la explotación racional del acuífero y la proyección de obras de captación de agua subterránea.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

“Conceptualización: Andrés Gabriel Ruffo; Metodología: Andrés Gabriel Ruffo y Matías Rey; Análisis de datos: Andrés Gabriel y Matías Rey; Redacción - preparación del borrador original: Andrés Gabriel Ruffo; Redacción - revisión y edición: Andrés Gabriel Ruffo, Matías Rey y René Albouy. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.”

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

“Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés”.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- 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. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 15 (1-2): 95-104. AUGÉ, M., (2004). *Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe*. 104 p
- 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.
- LOKE, M. H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys. 128p. (disponible en: <http://www.geotomosoft.com/coursenote.zip>).
- RUFFO, A. G.; ALBOUY, R.; BASTIANELLI, N. Y CARRICA, J. (2021). Humedales en la franja de médanos costeros entre Monte Hermoso y Pehuén C , provincia de Buenos Aires, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 132 (1-2): 29-36. ISSN: 0366-0176DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.003.
- ORELLANA, E., (1972). Prospección Geoelectrica en corriente continua. *Paraninfo. Madrid*.
- THORNTHWAITE, C. W., (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev.* Vol. 38. 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>.
- ZAVALA, C., (1993). Estratigrafía de la localidad de Farola del Monte Hermoso (Plioceno-reciente), provincia de Buenos Aires. *12  Congreso Geológico Argentino y 2  Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas* 2,228-235.



Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos

Post grouted drilled shafts: case studies

Useche, Danny J. ² - Aiassa, Gonzalo M. ^{1,3}  - Arrua, Pedro A. ¹ - Eberhardt, Marcelo G. ¹

Recibido: 22 de febrero de 2022 • Aceptado: 07 de septiembre de 2022

Resumen

En este artículo se presenta una revisión de antecedentes sobre pilotes perforados con inyección de lechada en la punta. Se analiza el efecto de la lechada en el comportamiento del pilote, así como los métodos constructivos y diferentes dispositivos para llevar a cabo esta técnica. Se eligieron seis estudios de caso reportados en la literatura técnica, los cuales cuentan con amplia información sobre el desempeño de este tipo de fundaciones. Los estudios consultados mostraron que, al realizar la inyección de carga en la punta del pilote, se incrementa significativamente la capacidad de carga por punta y por fricción de la fundación. Además, la lechada aumenta la rigidez del suelo y disminuye los asentamientos en el pilote, siendo una solución muy apropiada para fundaciones profundas.

Palabras clave: Lechada cementicia, pilotes perforados, celda de precarga.

Abstract

This paper presents a literature review on post-grouted drilled shafts. The effect of the grout on the behavior of the pile is analyzed, as well as the construction methods and different devices to performance this technique. Six case histories reported in the literature were chosen, which have extensive information on the performance of this type of foundation. The studies consulted showed that, when carrying out the load injection at the tip of the pile, the tip bearing capacity and the lateral friction of the pile are significantly increased. In addition, the grout increases the stiffness of the soil and reduces the settlements of the pile, being a very appropriate solution for deep foundations.

Keywords: Grouting, drilled shafts, pre-load cell.

1. UTN Facultad Regional Córdoba. Dpto. de Ingeniería Civil. CIGEF.
Ciudad Universitaria, Córdoba (5000), Argentina.

2. Becario posdoctoral CONICET. Politécnico Colombiano
Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia

 gaiassa@frc.utn.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La inyección de productos fluidos a presión es una antigua tecnología de mejoramiento de suelo. La inyección de cemento y agua en el suelo, a presión controlada, incrementa la resistencia y reduce la compresibilidad. En el diseño de la técnica se establecen las etapas, secuencia, volumen y presión de aplicación. El efecto de mejoramiento por la inyección a presión se compone de (i) compactación o desplazamiento del suelo y (ii) penetración o infiltración de la mezcla en el suelo. La componente de aporte en la mejora por desplazamiento e infiltración dependen de la granulometría y la estructura del suelo. Los recursos necesarios para ejecutar la técnica son (Figura 1): (i) materiales: cemento y agua, (ii) mezclador, (iii) agitador, (iv) bomba de inyección, (v) lanza de inyección, (vi) instrumentos de control (presión - volumen). En conjunto, constituye una opción económica y tecnológicamente sustentable.

Un método utilizado comúnmente para minimizar el efecto causado por incompatibilidad en deformación punta-fuste, ablandamiento por la excavación y materiales sueltos en pilotes perforados, consiste en la inyección de lechada cementicia a presión en la punta después de la instalación del pilote. Existen métodos analíticos de diseño de pilotes perforados mejorados con esta técnica (*Mullins y Winters, 2004*). Sin embargo, es necesario desarrollar métodos que incluyan condiciones más amplias, como, por ejemplo, diferentes tipos de suelo, presiones variables en la lechada, volumen de la lechada, forma del bulbo en la punta del pilote y lechada que asciende entre el pilote y el suelo circundante. La utilización de esta técnica es altamente efectiva en suelos granulares con densidades de baja a medio densa, debido a que estos son más susceptibles a ser inyectados por la lechada dada su alta permeabilidad.

Aunque varios estudios presentan mejoramiento en la capacidad de carga, la cuantificación de este mejoramiento es compleja, dependiendo entre otras cosas del tipo de lechada, el tipo de suelo de fundación, la presión y el volumen de la lechada,

el dispositivo de inyección utilizado, etc. La disparidad en estos factores hace necesario que se estandaricen metodologías de análisis y diseño de este tipo de fundaciones.

En este artículo, se describe el proceso constructivo de este tipo de fundaciones profundas, se discute sobre el efecto de la lechada cementicia en el comportamiento del pilote y se presentan algunos casos de estudio reportados en la literatura técnica, en los cuales se obtuvo un mejoramiento evidente en la resistencia axial del pilote al utilizar la lechada cementicia.

INYECCIÓN DE LA LECHADA CEMENTICIA

En general, la inyección se realiza en etapas aumentando sucesivamente la presión de inyección y disminuyendo la relación agua/cemento de la lechada. La presión máxima de inyección se calcula en base a la resistencia por fricción máxima del pilote, que debe equilibrar la fuerza ascendente generada en la punta del pilote con la inyección.

Los dispositivos de inyección consisten en tuberías que atraviesan el pilote hasta la punta, adosadas a la armadura de refuerzo. En la punta de las tuberías, se suelen colocar unas celdas que cuentan con mecanismos adecuados para permitir el traslado de la lechada al suelo que se encuentra bajo la punta del pilote. Algunas veces se utiliza un tubo con una serie de orificios y membranas (*tube-a-manchete*) que facilitan la inyección de la lechada. Este y otros dispositivos también utilizados para realizar la inyección pueden consultarse en *Ho (1999)*. Después de que el pilote perforado se encuentra construido, se inyecta a presión la lechada cementicia a través de las tuberías.

Se presenta una precarga en la punta del pilote cuando la lechada es inyectada. De esta manera, se genera densificación y aumento en la rigidez del suelo debajo de la punta del pilote. Así mismo, la precarga produce un levantamiento en el pilote que genera una fricción negativa. La literatura también muestra evidencia del ascenso de lechada en el espacio entre el pilote y el suelo circundante, así como la formación de un bulbo de

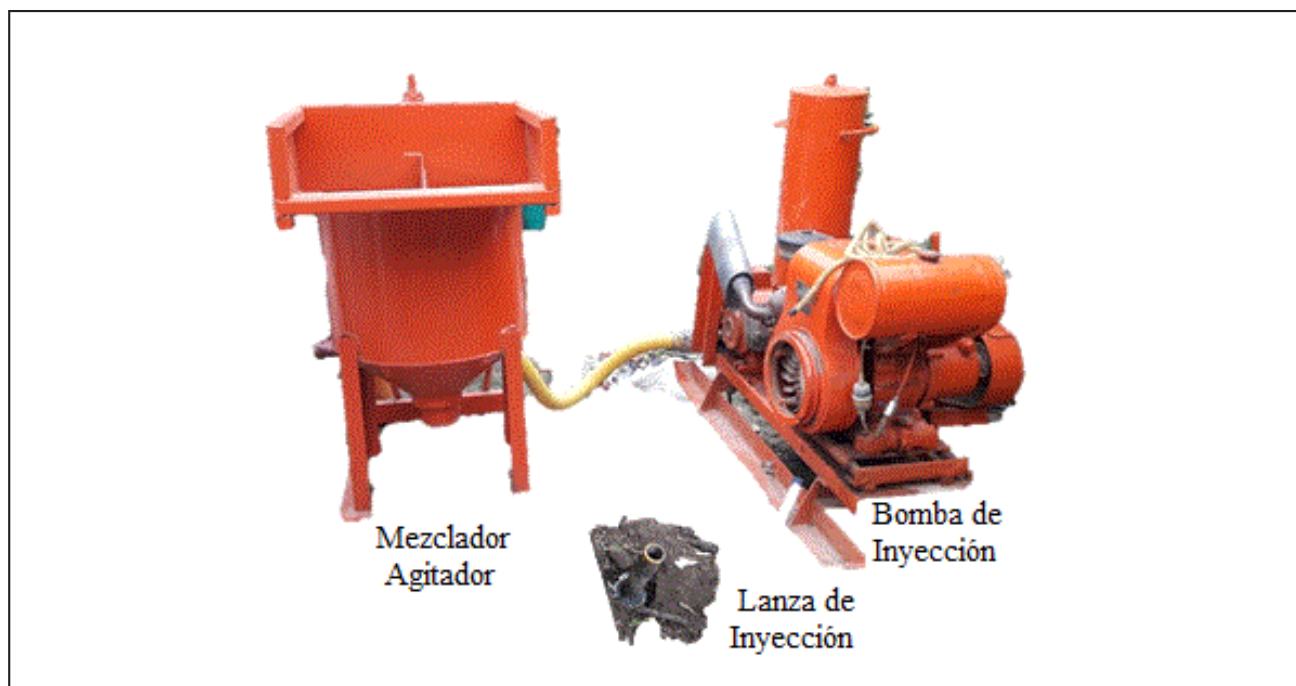


Figura 1. Equipo de inyección de lechada cementicia.

lechada en la punta del pilote. La lechada comienza a formar una zona de reforzamiento en la punta junto con el suelo circundante. La formación de la zona de reforzamiento aumenta el área de tensión y aumenta en gran medida la resistencia por punta del pilote (Zhou y Xie, 2019). El mejoramiento alcanzado en la capacidad de carga por punta del pilote se puede ver esquemáticamente en la Figura 2. El efecto de precarga obtenido por la inyección de lechada induce un desplazamiento en la punta del pilote, lo que hace que la resistencia por punta se movilice más rápido generando un aumento significativo en la resistencia axial en comparación a la alcanzada por los pilotes perforados convencionales.

ESTUDIOS DE CASO

Los pilotes con inyección de lechada cementicia han sido utilizados con éxito en las últimas cinco décadas. En la literatura técnica se encuentran varios trabajos que documentan el comportamiento de pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta. La mayoría de estudios se realizan ante ensayos de campo donde se verifica la respuesta del pilote ante cargas estáticas verticales. Así mismo, se han realizado estudios con modelos a escala y simulaciones numéricas, la mayoría con elementos finitos. Una revisión de trabajos publicados sobre el beneficio de este tipo de fundaciones fue presentada por los autores de este trabajo (ver Useche-Infante et al., 2022). En esta sección se presentan algunos estudios de caso, en los cuales se han instrumentado pilotes perforados con inyección de lechada cementicia para determinar el efecto de esta técnica sobre el comportamiento del pilote perforado.

Puente en el río Brazo, Texas, USA

En 2004, se amplió la estructura de un puente sobre el río Brazo en el condado de Brazoria, al suroeste de Houston, Texas. El puente tiene 13 m de ancho y 196 m de largo con una viga de placa continua de 178 m. Youn y Tonon (2010) obtuvieron un incremento alrededor del 30% en la resistencia axial de los pilotes perforados con inyección de lechada cementicia construidos para este proyecto. Según los autores, el incremento en la capacidad se debe principalmente al mejoramiento que se

presenta en el suelo bajo la punta con la inyección de lechada. Reportaron un incremento aparente en la fricción lateral del pilote, causada por la fricción inversa que causa el levantamiento del pilote cuando se aplica la lechada. Los pilotes estudiados tenían un diámetro de 1,830 mm y una longitud de 28.2 m. Estos pilotes estaban apoyados en arena densa. Para llevar a cabo la inyección de la lechada, colocaron 4 tubos en a lo largo de la armadura de refuerzo hasta la base, donde se instaló una celda de precarga para el proceso de inyección. La presión máxima alcanzada por la lechada fue de 2.2 Mpa. Los autores concluyeron que el mejoramiento producido en la resistencia por punta del pilote depende de la magnitud de la descarga inducida por el alivio de tensión en la lechada presurizada.

Viaducto en el nudo vial El Tropezón, Córdoba, Argentina

Gerbaudo et al. (2015) realizaron ensayos de carga estática en dos pilotes perforados con inyección de lechada en la punta. Los pilotes tuvieron 50 cm de diámetro y 6.50 m de longitud. Este estudio fue realizado en el viaducto El Tropezón, ubicado en la intersección entre la Av. Colón y la Av. Circunvalación, en la zona oeste de la Ciudad de Córdoba, Argentina. El suelo en la punta del pilote correspondió a limo arenoso. Para asentamientos superiores a 1.5 mm, los autores obtuvieron una relación entre la presión aplicada en la punta del pilote con inyección y sin inyección superior a 1.5. Otro estudio en este viaducto fue reportado por Ruiz y Cocco (2016), quienes presentaron los resultados de un estudio de transferencia de carga de un pilote convencional y otro, instalado en similares condiciones, con inyección de lechada cementicia en su punta. Los pilotes fueron construidos con diámetro de 600 mm y longitud de 6.5 m. Se inyectaron 0.107 m³ de lechada a una presión máxima de 0.462 MPa por medio de una celda de precarga adherida a la parte inferior de la armadura del pilote. El objetivo de la investigación era determinar el incremento en la resistencia por punta del pilote, por lo que los autores redujeron la resistencia por fricción del pilote. Las curvas de transferencia de carga mostraron que a pesar de reducir de manera intencional la resistencia de fuste, la resistencia por fricción remanente aporta a la rigidez y resistencia del pilote con inyección de lechada cementicia.

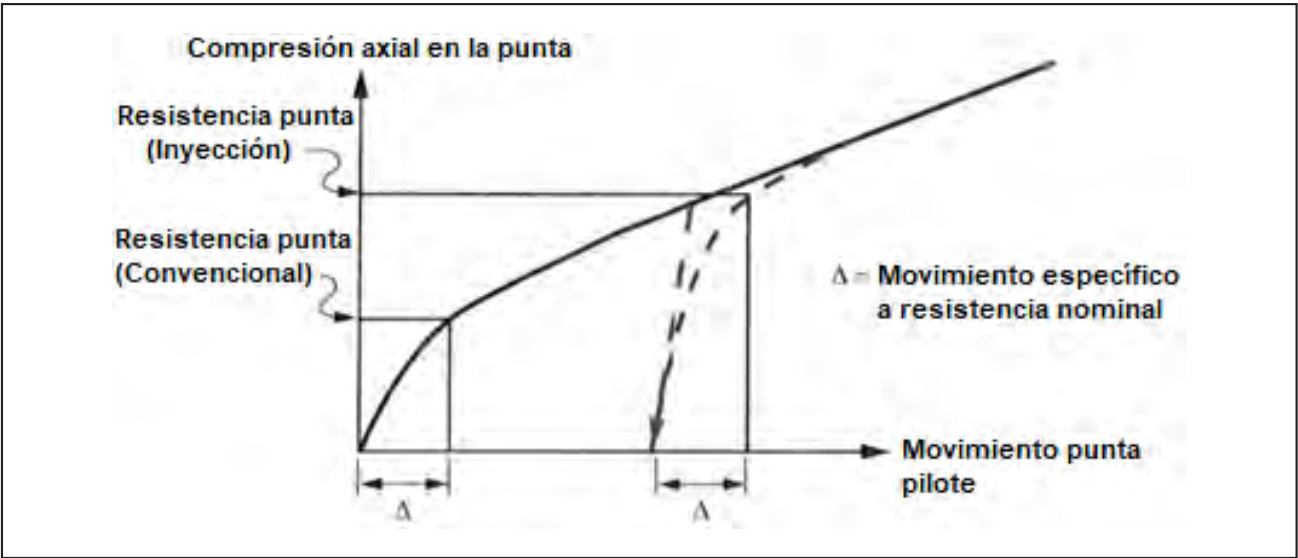


Figura 2. Resistencia axial.

Además, indicaron que el proceso de inyección sólo contribuye a incrementar la rigidez del pilote, pero no su resistencia final. Finalmente, los autores identificaron dos factores principales que podrían contribuir al mejor desempeño de estos pilotes: (1) un efecto de pretensión relacionado a la fricción negativa que se origina a lo largo del fuste durante el proceso de inyección, y (2) la posible formación de un bulbo de lechada bajo la punta del pilote que depende de la celda de precarga que se utilice. Encontraron que el efecto de densificación del suelo bajo la punta del pilote tiene una incidencia menor en la resistencia axial de los pilotes inyectados que los dos efectos mencionados.

Puente en el río Odra, Wrocław, Polonia

Krasiński y Wiszniewski (2018) instrumentaron dos pilotes perforados de gran diámetro inyectados con lechada cementicia en la punta, en un puente sobre el río Odra, en el oeste de Polonia. Utilizaron extensómetros de cuerda vibrante para medir la deformación en varias secciones a lo largo de la longitud de la fundación. Los pilotes estudiados tenían un diámetro de 1,500 mm y 18.0 m de longitud. Inyectaron 420 L de lechada cementicia en la punta del pilote con una presión de 1.5 MPa por medio de tubos de inyección equipados en la parte inferior con válvulas de goma (*tube-a-manchette*). Utilizaron una geomembrana para separar la tubería de inyección de la armadura de refuerzo. El suelo en el cual fueron instalados los pilotes estaba formado por una capa superior de sedimentos fluviales de espesor variable entre 5.0 m y 7.0 m, compuestos por arena y grava de densidad media a densa. Los sedimentos fluviales descansaban sobre una capa de arcilla dura del pleistoceno. Los resultados de las pruebas de carga vertical en los pilotes convencionales y con inyección de lechada en la punta mostraron un incremento en la resistencia axial de aproximadamente un 200% gracias a la presencia de la lechada. Así mismo, se evidenció una disminución mayor a 211% en los asentamientos al inyectar la lechada. Los autores concluyeron que el mejoramiento se produce a lo largo del eje del pilote, siendo mayor el incremento en la capacidad del pilote en la zona cercana a la punta. Además, mostraron a través de los ensayos, que se incrementa significativamente la rigidez del suelo debajo de la punta del pilote por la acción de la lechada. La lechada debajo de la base del pilote activa y aumenta la resistencia del fuste del pilote y gracias a ello mejora las características de interacción del pilote perforado con el suelo. Ellos indicaron que la fuerza de la inyección ocasionó la precarga y la consolidación de la arcilla. Al mismo tiempo, indicaron que con la inyección de lechada se reducen la relajación y la alteración de la estructura del suelo creada durante la perforación.

Aeropuerto internacional Xi'an Xianyang, Shaanxi, China

El Aeropuerto internacional Xi'an Xianyang es el más importante de la provincia china de Shaanxi. En esta importante obra de infraestructura, *Zhou y Xie (2019)* analizaron el mecanismo de mejora en la resistencia por punta de un pilote perforado con inyección de lechada. Con el objetivo de evitar la posible ruptura de las tuberías de PVC durante el proceso de inyección de lechada, los autores utilizaron tubería de acero. Las tuberías metálicas fueron adosadas a la armadura y se conectaron con tuberías en forma de U dispuestas en la punta del pilote, las cuales por medio de unas válvulas permiten la inyección de la lechada en el suelo bajo el pilote. Realizaron ensayos de carga estática a pilotes de 1,500 mm de diámetro por 22.0 m de longitud. El suelo en el sitio de construcción estaba formado por una capa de loess reciente con potencial de colapsabilidad,

ligeramente húmedo y poroso, con 8 m de espesor, apoyada en una capa de paleosol y otra de loess antiguo. El paleosol presentó un espesor variable entre 1.0 m y 6.0 m, mientras que el loess antiguo presentó un espesor entre 2.0 m y 15 m. La lechada fue aplicada con una presión de 2.5 MPa. En comparación con un pilote convencional, los resultados mostraron un incremento del 28.57% en la resistencia axial del pilote al inyectar la lechada en la punta. Así mismo, observaron que los asentamientos disminuyeron un 26.19% para una carga de 17,500 kN con respecto al pilote convencional. La parte superior del pilote se levantó 1.62 mm con la aplicación de la lechada. La interacción lechada-suelo mejora la rigidez del suelo bajo el pilote y disminuye el desplazamiento relativo del pilote, mientras que la fricción lateral aumenta gracias al cambio en la interface suelo-pilote generado por la inyección de lechada. Esta investigación además muestra que la inyección en la punta genera el ascenso de la lechada entre las paredes del pilote y el suelo circundante, reportaron un ascenso en la lechada de 10.7 m desde la punta del pilote.

Puente ferroviario a través del río Rupsa, Khulna-Satkhira, Bangladesh

Nagarajan et al. (2020) reportaron un estudio sobre el efecto de la inyección de lechada en la punta en pilotes perforados de 1,500 mm de diámetro y longitudes de 40.0 m y 52.0 m. Los pilotes ensayados hacían parte del proceso de diseño de un puente ferroviario de 700 m de longitud que permitiría el paso entre las ciudades de Khulna y Satkhira a través del río Rupsa, en Bangladesh. Los pilotes estaban apoyados en arena limosa. Un volumen de 1,800 L de lechada fue inyectado con tuberías en U adosadas a la armadura del pilote, con una presión máxima de 6 MPa. La lechada fue aplicada en tres etapas, en las cuales se inyectaron 600 L, 750 L y 450 L, respectivamente. De acuerdo con los resultados, la resistencia axial de los pilotes fue incrementada en un 90% por efecto de la lechada. Así mismo, los asentamientos en el pilote disminuyeron gracias a la inyección de lechada.

Puente vehicular a través del río Parai y puente ferroviario a través del río Yapacani, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

Marinucci et al. (2021) presentaron los resultados de pruebas de carga a más de 120 pilotes perforados con el objetivo de estudiar el efecto de la inyección de lechada cementicia en la punta. La publicación reportada contiene el mecanismo de interacción, los principios básicos y la metodología de diseño. Los diámetros de los pilotes ensayados fueron de 1,200 mm y 1,500 mm, mientras que las longitudes fueron de 15.0 m y 25.0 m. El sitio de la fundación tenía suelos sedimentarios con alta variabilidad. Inyectaron lechada cementicia en la punta del pilote por medio de una celda de precarga adosada a la armadura. Se obtuvieron incrementos significativos en la rigidez del suelo, mejora es la resistencia axial nominal del pilote y una mejor alineación de las curvas de transferencia de carga con los requisitos del proyecto.

Comparación de los resultados reportados en las investigaciones consultadas

Con el objetivo de comparar el mejoramiento obtenido en la resistencia por punta del pilote cuando se inyecta la lechada cementicia, se realizaron graficas de la Relación de Presión (presión aplicada en la punta del pilote con inyección sobre la presión aplicada en la punta del pilote convencional) contra la

relación entre el asentamiento (S) y el factor obtenido de la división de la longitud (L) del pilote entre el diámetro (D) del mismo. La Figura 3 muestra estas relaciones para los estudios reportados por *Youn y Tonon (2010)*, *Gerbaudo et al. (2015)*, *Krasiński y Wiszniewski (2018)*, *Zhou y Xie (2019)* y *Nagarajan et al. (2020)*. Los mayores valores de Relación de Presión se obtuvieron en los trabajos reportados por *Gerbaudo et al. (2015)* y *Nagarajan et al. (2020)*, quienes obtuvieron relaciones mayores a 1.4. Los demás estudios presentaron Relaciones de Presión mayores a 1.15. Para relaciones S/(L/D) mayores a 0.3, que corresponden a asentamientos superiores a 4 mm. Todos los estudios mostraron un incremento importante en la resistencia por punta al utilizar la inyección de lechada cementicia (Relaciones de Presión superiores a 1.10). Esto indica que, aunque se tienen pilotes perforados con diferentes condiciones de sitio y diferentes condiciones de inyección, la lechada en la punta genera beneficios en la resistencia por punta del pilote para valores de asentamientos normales. Además, según la Figura 3, todos los estudios excepto el publicado por *Youn y Tonon (2010)*, presentan un incremento creciente en la Relación de Presión a medida que se incrementa el asentamiento. En el caso específico del Puente en el río Brazo, reportado por *Youn y Tonon (2010)*, se presentan valores pico de la Relación de Presión (alrededor de 1.4) para relaciones S/(L/D) entre 0.13 y 0.23 (asentamientos entre 2 y 4 mm). Al incrementarse el asentamiento, la Relación de Presión cae hasta un valor asintótico de 1.15 para asentamientos mayores a 7 mm.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una revisión y análisis de la bibliografía acerca de la inyección de lechada cementicia en la punta de pilotes perforados. Se describen seis casos de estudio. Las principales conclusiones obtenidas del trabajo son:

La literatura técnica consultada muestra un incremento importante en la resistencia por punta y por fricción para pilotes perforados, siendo determinante en el incremento, el tipo de suelo debajo de la punta del pilote, el tipo de suelo alrededor del pilote y la presión de la lechada inyectada.

Se genera un bulbo de lechada en la parte inferior del pilote después de realizar la inyección, aumentando el área en la punta de la fundación. Este bulbo depende del dispositivo utilizado para inyectar la lechada y podría incrementar la capacidad por punta del pilote.

El suelo bajo la punta del pilote se densifica por la mezcla con la lechada. Esto aumenta la rigidez del suelo aumentando la capacidad de carga por punta del pilote. La aplicación de lechada en la punta genera una precarga en el suelo debajo del pilote, lo cual hace que se produzca levantamiento de la fundación y una fricción negativa a lo largo del fuste, aumentando la resistencia por fricción.

Se produce un desplazamiento de lechada en forma ascendente entre el borde del pilote y el suelo circundante, lo que disminuye el desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo, generando un aumento en la resistencia por fricción. Al incrementarse la resistencia axial total del pilote por la inyección, los asentamientos se ven disminuidos.

A pesar de que se han presentado varios trabajos que documentan el mejoramiento en el comportamiento de los pilotes al usar la lechada, es necesario aumentar los ensayos con diferentes condiciones de aplicación de la lechada, otros tipos de suelo de fundación y con dispositivos de inyección variados. De esta manera se puede optimizar el proceso constructivo y el diseño de esta técnica.

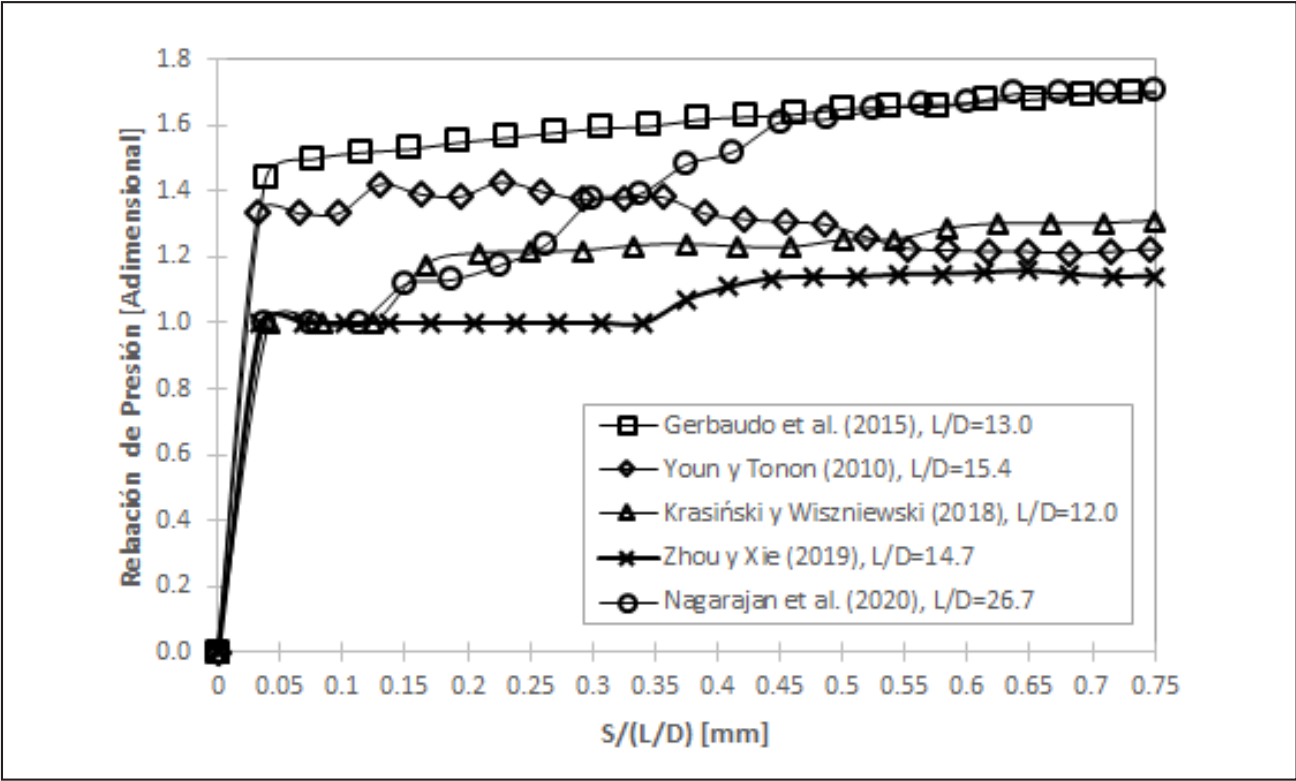


Figura 3. Comparación de la Relación de Presión obtenida en las investigaciones consultadas

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible debido al apoyo recibido por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (Departamento de Ingeniería Civil - GIGEF) y al CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- GERBAUDO, C.F., ZEBALLOS, M.E., GERBAUDO, G., ZECCHIN, E. Y FIGLIOZZI, L. (2015).
Post grouted drilled shaft behavior.
From Fundamentals to Applications in Geotechnics: Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15 - 18 November 2015, Buenos Aires, Argentina, 1:398-405.
<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-398>
- HO, S.K. (1999).
Construction considerations for on-site bored piles.
In: Proceedings of Conference on Design, Construction and Testing for Large-Diameter Drilled Shafts, Taipei: 3.1-3.25
- KRASIŃSKI, A. Y WISZNIEWSKI, M. (2018).
The mechanism of grouting action under the base of bored pile.
In: Proceedings of the 2018 DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Roma, pp 858-867
- MARINUCCI, A., TERCEROS-HERRERA M.A. Y TERCEROS-ARCE M. (2021).
Tip post-grouting using smart cells of 126 drilled shafts at two bridges in Bolivia.
In: Proceedings of International Foundations Congress and Equipment Expo 2021, ASCE.
<https://doi.org/10.1061/9780784483404.002>
- MULLINS, G. Y WINTERS, D. (2004).
Pressure grouting drilled shaft tips-phase II.
Final report submitted to Florida Department of Transportation, Florida
- NAGARAJAN, D., RAJA-RAJAN, K. Y VIJAYKUMAR, T. (2020).
Review of load test performance of base grouted concrete piles.
Construction in Geotechnical Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering, vol 84. Springer, Singapore, 99 - 117.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-6090-3_8
- RUIZ, M.E. Y COCCO, L.J. (2016).
Pilotes con celda de precarga: estudio de caso de los pilotes de fundación del viaducto en el nudo vial El Tropezón de la ciudad de Córdoba.
24 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires, 1-18.
- USECHE-INFANTE, D., AIASSA-MARTINEZ, G., ARRUA, P. Y EBERHARDT M. (2022).
Performance evaluation of post-grouted drilled shafts: a review.
Innovative Infrastructure Solutions, 7:230. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00830-y>
- YOUN, H. Y TONON, F. (2010).
Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: a case study at the Brazo River Bridge, TX.
Computers and Geotechnics, 37:456-465.
- ZHOU, Z. Y XIE, Y. (2019).
Experiment on improving bearing capacity of pile foundation in loess area by postgrouting.
Advances in Civil Engineering, Article ID 9250472. <https://doi.org/10.1155/2019/9250472>

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2022
Editada en Argentina

Se terminó de editar en Diciembre de 2022



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Pautas técnicas para el diseño de obras con aprovechamiento subterráneo contemplando las características del sistema hidrogeológico local. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina
Lanzaro, María Verónica

Análisis de las inundaciones en la cuenca superior y media del río Luján, provincia de Buenos Aires
Molero, Vanesa - Pereyra, Fernando X. - Marcomini, Silvia

Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la prospección de agua subterránea en un sector costero del sudoeste bonaerense, Argentina
Ruffo, Andrés G. - Rey, Matías - Albouy, E. René - Giorgi, Juan Manuel - Carrica, Lucía - Bastianelli, Nerea

Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos
Useche, Danny J. - Aiassa, Gonzalo M. - Arrua, Pedro A. - Eberhardt, Marcelo G.

Portada: Puente José M. de la Sota. Vista del encaje del puente en la ladera norte. Córdoba. *Fotografía: Marcelo E. Zeballos*

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

