

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Excavación fina y saneamiento dental de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil  
*Giaconi, Luis Mario - Flores, Roberto M. - Giordano, Ricardo Eduardo - Cumba, Andrea  
 de Luca, Esteban - Giaconi, Mario Nicolás*

Metodologías para a análise de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens LANDSAT e SPOT:  
 o exemplo da região entre Vigo e Viana do Castelo (NW da Península Ibérica)  
*Pinho, R. - Gomes, A. - Pérez - Alberti, A. - Chaminé, H. I.*

Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas  
*Giaconi, Luis Mario - Flores, Roberto M. - Giaconi, Mario Nicolás*

Estudo da recuperação de áreas degradadas por erosão no Município de Franca, São Paulo, Brasil  
*Rotta, Cláudia Marisse dos Santos - Zuquette, Lázaro Valentin*

Aptitud de dos sedimentitas rojas cretácicas del departamento Confluencia, Neuquén, para ser usadas  
 como barreras aislantes en rellenos sanitarios  
*Musso, T.B. - Pettinari, G. - Francisca, F.M.*

Evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento en Monte Hermoso. Argentina.  
*Di Martino, Claudina - Cifuentes, Olga - Albouy, René - Marcos, Angel - Caló, Jorge*

Importância da carta de unidades aquíferas para a elaboração de zoneamento (geo)ambiental -  
 estudo de caso na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos)  
*Contri Campanelli, Leandro - Lorandi, Reinaldo*

Amenazas de depósitos de laderas en ambientes áridos. La revegetación como acción preventiva  
 (Bromeliaceae - Deuterocohnia longipetala (Baker) Mez.)  
*Suvires, G.M. - Flores - D. G. - Gamboa, L.A. - Pitaluga, M. A.*

Comportamiento del parámetro "b" de Gutenberg-Richter en los sismos de la región NOA. Argentina  
*Benítez, Lidia M. - Grimolizzi, Otón Matias - Benítez, Sonia B.*

Reseñas de libros. The story of Vainot. Edoardo Semenza.  
*Rubén A. López*

Portada: Basaltos columnares - Lago Lacar - San Martín de los Andes. Argentina Fotografía: Sergio Mora

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



Publicación Oficial de la

---

ASOCIACION ARGENTINA  
DE GEOLOGIA APLICADA  
A LA INGENIERIA

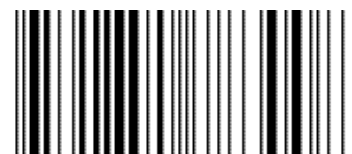
---

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires

editores@asagai.org.ar  
www.asagai.org.ar  
Tel/Fax (011)4322-2820

Número 29 • 2012

ISSN 1851-7838







---

## REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

### DIRECTOR

*MSc Geól. Norberto Jorge Bejerman*  
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba  
Argentina  
editores@asagai.org.ar

### EDITOR ASOCIADO

*Prof. Dr. José Chacón*  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Granada  
España  
jchacon@ugr.es

### SECRETARÍA

*Dr. Francisco Locati*  
CICTERRA (CONICET - UNC)  
Argentina  
flocati@efn.uncor.edu

*Geóloga Natalia Carina Szwedowicz*  
GEoS (CONCORD S.A.)  
Argentina  
nataliacarina-s@hotmail.com

### COMITÉ EDITORIAL

*Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé*  
Departamento de Engenharia Geotécnica  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Politécnico do Porto  
Portugal  
hic@isep.ipp.pt

*Dra. Silvina A. Marfil*  
Departamento de Geología  
Universidad Nacional del Sur  
Comisión de Investigaciones Científicas  
de la Prov. de Buenos Aires  
Argentina  
smarfil@uns.edu.ar

*Dr. Julio Luis del Río*  
Universidad Tecnológica Nacional  
Unidad Académica Mar del Plata  
Área Geoambiental  
Argentina  
julioluisdelrio@gmail.com

*Dra. Graciela E. Tello*  
Universidad Nacional de la Patagonia Austral  
Unidad Académica Río Turbio. Santa Cruz  
Argentina  
gtello28@yahoo.com

*Prof. Dr. Luis I. González de Vallejo*  
Ingeniería Geológica  
Departamento de Geodinámica  
Facultad de Ciencias Geológicas  
Universidad Complutense de Madrid  
C./Antonio Novais nº 2; Madrid 28010  
vallejo@geo.ucm.es

*Dra. Ofelia Tujchneider*  
Grupo de Investigaciones Geohidrológicas  
Departamento de Hidrología y Ambiente  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad nacional de El Litoral. Santa Fe  
Argentina  
pichy@fich1.unl.edu.ar

### PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño     *Paula Paredes*  
paulaparedes13@hotmail.com

Webmaster                 *Guillermo Saint*  
saintdisegno@arnet.com.ar

---

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

**COMISIÓN DIRECTIVA 2010 - 2014**

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>María Beatriz Ponce</i>
SECRETARIO	<i>Rubén A. López</i>
TESORERO	<i>Adrián Angel Silva Busso</i>
VOCAL TITULAR	<i>Fabio S. Luna</i>
VOCAL TITULAR	<i>Cristina Dapeña</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Mabel Mena</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José L. Guerrero</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>Fernando Díaz</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Carlos Marconi</i>

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

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Staff		I
Comisión Directiva		II
Excavación fina y saneamiento dental de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil	<i>Giaconi, Luis Mario - Flores, Roberto M. Giordano, Ricardo Eduardo Cumba, Andrea - de Luca, Esteban Giaconi, Mario Nicolás</i>	1
Metodologias para a análise de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens LANDSAT e SPOT: o exemplo da região entre Vigo e Viana do Castelo (NW da Península Ibérica)	<i>Pinho, R. - Gomes, A. Pérez - Alberti, A. - Chaminé, H. I.</i>	13
Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas	<i>Giaconi, Luis Mario - Flores, Roberto M. Giaconi, Mario Nicolás</i>	23
Estudo da recuperação de áreas degradadas por erosão no Município de Franca, São Paulo, Brasil	<i>Rotta, Cláudia Marisse dos Santos Zuquette, Lázaro Valentin</i>	41
Aptitud de dos sedimentitas rojas cretácicas del departamento Confluencia, Neuquén, para ser usadas como barreras aislantes en rellenos sanitarios	<i>Musso, T.B. - Pettinari, G. Francisca, F.M.</i>	59
Evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento en Monte Hermoso, Argentina	<i>Di Martino, Claudina - Cifuentes, Olga Albouy, René - Marcos, Angel - Caló, Jorge</i>	73
Importância da carta de unidades aquíferas para a elaboração de zoneamento (geo)ambiental - estudo de caso na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos)	<i>Contri Campanelli, Leandro Lorandi, Reinaldo</i>	83
Amenazas de depósitos de laderas en ambientes áridos. La revegetación como acción preventiva (Bromeliaceae - Deuterocohnilongipetala (Baker) Mez.)	<i>Suvires, G.M. - Flores, D. G. Gamboa, L.A. - Pittaluga, M. A.</i>	91
Comportamiento del parámetro "b" de Gutenberg-Richter en los sismos de la región NOA. Argentina	<i>Benítez, Lidia M. - Grimolizzi, Otón Matías Benítez, Sonia B.</i>	101
Reseñas de libros. The story of Vaiont. Told by the Geologist Who Discovered the Landslide. Edoardo Semenza, 2010	<i>Rubén A. López</i>	109
Instrucciones para autores		111
Formulario de suscripción o compra		115



## MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

### Misión y objetivos de la publicación

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

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

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

### Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

### Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista, cuyo costo es de 230 pesos, deberán contactarse con la Editorial ([editores@asagai.org.ar](mailto:editores@asagai.org.ar)).

En la página 115 encontrará el formulario a completar a tal efecto



## Aims and objectives

*The Journal of Engineering Geology and the Environment 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 it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.*

## Price of the Journal

*All interested in buying a copy of any Journal issue, with the actual cost of ARS 230, should be in contact with the Editor ([editores@asagai.org.ar](mailto:editores@asagai.org.ar)).*

*In page 115 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



## Excavación fina y saneamiento dental de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil

### Fine excavation and dental sanitation of "Ramal H" dam foundation, Tandil

Giaconi, Luis Mario <sup>1</sup> ✉ - Flores, Roberto M. <sup>2</sup> - Giordano, Ricardo Eduardo <sup>1</sup>  
Cumba, Andrea <sup>1</sup> - de Luca, Esteban <sup>1</sup> - Giaconi, Mario Nicolás <sup>2</sup>

Recibido: 13 de Marzo de 2012 • Aceptado: 22 de Mayo de 2012

#### Resumen

*La denominada Presa del Ramal H, sita en la ciudad de Tandil (Prov. de Buenos Aires), consta de una longitud de 160 m y una altura sobre el terreno natural de 12 metros. Se proyectó a gravedad en Hormigón sobre el macizo rocoso identificado en las investigaciones. El objetivo de la construcción de la misma es la laminación de crecidas extraordinarias que anegan los barrios de sector oriental de la ciudad. El área del proyecto abarca la pequeña cuenca hidrográfica del arroyo que desemboca precisamente en el denominado Ramal H, desagüe pluvial entubado que finalmente desagua en el también entubado arroyo del Fuerte para descargar finalmente en el A° Langueyú. Las nacientes de la cuenca se ubican dentro del cordón serrano que domina el área (Sierras de las Ánimas) siendo la máxima expresión geográfica del mismo el Cerro Albión, hacia la zona Este de la ciudad.*

*El presente trabajo trata sobre la fundación de la presa del Ramal H, su caracterización geológica y geotécnica y el tratamiento aplicado a la misma durante la faz final de excavación con el objeto de producir una homogeneización de las características geomecánicas del substrato rocoso de apoyo mediante saneamiento dental, previo al tratamiento del mismo mediante inyecciones cementíceas.*

**Palabras clave:** Presa- fundación - macizo rocoso - excavación - saneamiento dental

#### Abstract

*The so-called "branch H" Dam, located in the city of Tandil (province of Buenos Aires), consists of a length of 160 m and a height above the natural terrain of 12 meters. The dam was projected to concrete gravity on the rock mass identified in the research. The purpose of the construction itself is to reduce the extraordinary flood flooded in the eastern neighborhoods of the city. The project area includes the small watershed of the stream which flows precisely in the so-called H Branch, a piped storm drain that flows into the, also piped, "Fort stream" that finally flows into the "Langueyú stream". The headwaters of the basin are located within the cord mountain that dominates the area ("Animas Hills") being the maximum geographical expression of the same the Albion Hill, to the east of the city.*

1. Cátedra de Geología Aplicada, FCNyM, UNLP

✉ [Imgiaconi@gmail.com](mailto:Imgiaconi@gmail.com)

2. Facultad de Ingeniería, UNLP - UTN, Regional La Plata

*This paper deals with the foundation of the dam branch H, its geological and geotechnical characterization and the treatment applied to it during the final excavation face in order to produce a homogenization of the geomechanical characteristics of the bedrock of support through dental sanitation, pre-treatment of material by cement slurry injections.*

**Keywords: Dam - foundation - solid rock - digging - dental sanitation**

## OBJETIVO

El objetivo liminar del presente trabajo es comunicar, a partir de la determinación de las características geológico-geotécnicas del macizo rocoso que dan lugar a la fundación de la presa del Ramal H, las tareas de excavación realizadas y el plano de fundación definitivo en función de la profundidad del lecho rocoso inalterado y/o en condiciones geomecánicas favorables. Se presenta el desarrollo del tratamiento geotécnico ejecutado en el substrato de fundación mediante saneamiento dental, previo al tratamiento final con inyecciones cementíceas.

## INTRODUCCIÓN

Esta contribución se origina con motivo de la ejecución de los trabajos de excavación gruesa de la fundación de la presa del Ramal H y la laboriosa tarea de saneamiento geotécnico ejecutado mediante la excavación fina de rocas de baja calidad mecánica, discordantes con las características estructurales de la obra, y su reemplazo con hormigón a los fines de producir la homogeneización geomecánica del apoyo.

### Síntesis de los estudios geológicos y geotécnicos realizados

Se realizó la caracterización geológica regional y luego se avanzó en la descripción y evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas del área de localización de la alternativa de cierre A-C (margen izquierda y margen derecha respectivamente). *Giaconi (1994, 2009)*.

Se identificaron las unidades geológicas comprendidas por el área del cierre, cuenco dissipador y canal de restitución como así también en el área del futuro vaso y sus adyacencias, contando con el auxilio de la fotografía aérea y la realización de perfiles sísmicos, perforaciones y ensayos ejecutados en estudios antecedentes. Se realizaron mediciones con brújula geológica, observaciones y descripciones megascópicas y con lupa de las muestras de rocas obtenidas en el muestreo de campo. A los fines geotécnicos, se ejecutaron perforaciones y calicatas en los suelos y sedimentos superficiales con el objeto de conocer la profundidad y características geomecánicas de los materiales clásticos en la zona de cierre y embalse. Se establecieron las condiciones y profundidades de la roca meteorizada/alterada y de la roca aparentemente sana que subyace. En las perforaciones se identificaron los ensayos Lefranc en los estudios antecedentes en suelos y se ejecutaron ensayos de pérdida de agua Lugeon en roca. Finalmente se realizaron ensayos geotécnicos de laboratorio sobre muestras obtenidas de los testigos de perforación e identificación petrográfica mediante microscopía. Con los datos obtenidos de los ensayos realizados y las determinaciones de campo y gabinete se procedió a identificar los distintos sectores litoestructurales que componen la geología del área sujeto de investigación procediéndose posteriormente a clasificarlos desde el punto de vista geotécnico a través de la aplicación general de las clasificaciones geomecánicas de uso actual internacional describiéndose los procedimientos de tratamiento geotécnico correctivo en función de lo identificado.

El análisis geotécnico tuvo por objeto explicitar los criterios adoptados para la elección de los parámetros resistentes para el cálculo de la estabilidad al deslizamiento, los parámetros de deformabilidad, las tensiones admisibles y la distribución de permeabilidades en la roca de fundación de la presa. *(Flores, 2009)*. *(Flores y Giaconi, 2010)*

La elección de los parámetros de diseño se realizó sobre la base de la aplicación de teorías de mecánica de rocas *(Flores, 2009)* a partir de la comparación con macizos de similar comportamiento, comparables a través de su clasificación geotécnica.

Se incorporó información proveniente de las excavaciones realizadas con el objeto de alcanzar la cota de fundación prevista y se presentaron planillas referentes a los doce sondeos ejecutados durante los estudios preliminares que dieron lugar al informe geológico en las que se incluyeron: planillas de datos obtenidos de los registros de perforaciones, planillas resúmenes de clasificación en la que se detallan los parámetros requeridos para las clasificaciones RMR, Q y GSI y los resultados variando en profundidad, gráfico de variación del índice RMR con la cota, gráfico estadístico de variación del índice RMR en cada sondeo, gráfico de variación del índice Q con la cota, planilla de análisis de sensibilidad del índice Q en el sondeo, gráfico estadístico de variación del índice Q en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del RQD en cada sondeo, gráfico de distribución de valores de RQD en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del parámetro Jr (rugosidad) en cada sondeo, gráfico de distribución de valores del parámetro Jr en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del parámetro Jn (número de familias de discontinuidades) en cada sondeo, gráfico de distribución de valores del parámetro Jn en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del parámetro Ja (alteración) en cada sondeo, gráfico de distribución de valores del parámetro Ja en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del parámetro Jw (influencia del agua) en cada sondeo, gráfico estadístico de variación del parámetro SRF (influencia del estado tensional) en cada sondeo, planilla de cálculo de tensiones admisibles según cuatro teorías de aplicación *(Flores, 2009)* para cada profundidad, gráfico de variación de las tensiones admisibles de cálculo en función de la profundidad en cada sondeo, planilla de cálculo de módulos de deformabilidad del macizo rocoso según catorce teorías a partir de los índices de clasificación *(Flores, 2009)*, gráfico de variación de los módulos de deformabilidad con la profundidad, planilla con los resultados de los ensayos Lugeon de pérdida de agua en la que se muestran los pares de valores (p - q) obtenidos en el ensayo, los valores de RQD medios y mínimos observados en el tramo y los valores de la permeabilidad K (en [m/s] y en [cm/s]) calculados según la expresión de *Hvorslev (1949)* y del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos *(USACE, 1983)* en la hipótesis de un radio de influencia obtenido según la expresión de *Sichardt*.

Con la información recopilada se compuso el cuadro geológico geotécnico sobre el cual se proyectó el cierre y su cota preliminar de fundación y del cual se realizaron consideraciones

complementarias a la luz de lo expuesto en las excavaciones mediante estudios complementarios que, finalmente, fueron fundamento para la toma de decisiones respecto a la fijación de la superficie definitiva de apoyo de la presa y el tratamiento consecuente. (Giacomi, 2011)

## GEOLÓGIA Y GEOTÉCNICA DE LA FUNDACIÓN

Se brinda a continuación una muy breve síntesis de las características geológicas y geotécnicas del sitio.

### Aspectos Geológicos

#### *Cobertura de material no rocoso*

Suelos orgánicos, depósitos sedimentarios fluviales y eólicos y materiales friables de origen antrópico. Dadas las características geotécnicas determinadas, el espesor y la disposición de los materiales de cobertura, los mismos deberán ser excavados mecánicamente hasta el techo de roca a los fines de la fundación del cuerpo de la presa y del cuenco dissipador. La estimación del espesor promedio de excavación determinado es de aprox. 2,40 m. y el volumen aproximado para el ámbito de la fundación de la presa fue de 1800 m<sup>3</sup>.

#### *Macizo rocoso*

Rocas del Basamento Cristalino Precámbrico. Macroscópicamente, las rocas dominantes en el área de fundación son granitoides, gneises gris verdosos de composición tonalítica que han sido intruídos por rocas de origen pegmatítico de grano muy fino, de color rosado. La presencia de estas últimas se detecta mayormente en margen derecha aunque se han observado también en margen izquierda. En corte delgado las rocas no alteradas o con poco grado de alteración básicamente constituyen rocas granudas, milonitas de composición tonalítica y rocas microgranudas, milonitas de un protolito aplítico o granítico, de grano fino.

#### *Grados de alteración del macizo rocoso*

Del análisis del grado de la alteración, se detectaron cuatro formas de ocurrencia dentro del modelo geológico de macizo rocoso determinado para la fundación de la presa:

*Forma 1:* La zona alterada es paralela a la superficie del terreno y a la roca no alterada. Representado por una capa alterada, de espesor variable, que suprayace a la roca no alterada y que es sinuosa pero paralela/a subparalela al terreno natural o superficie topográfica.

*Forma 2:* La zona alterada se ubica entre discontinuidades. La alteración se produjo a expensas de las zonas fracturadas de inclinación vertical a subvertical, que han dejado importante material intersticial de zona fracturada, brecha, microbrecha, etc.

*Forma 3:* Variante de la anterior pero de mayores dimensiones. Corresponde a la alteración en zonas de cizallamiento (arenización) y/o de intenso fracturamiento superficial. Roca alterada de manera intensa, como mínimo tipo A4 (completamente alterada) en los niveles superficiales del macizo presentando también en ocasiones intensa lajosidad.

*Forma 4:* Roca masiva con bajo grado de alteración o no alterada (fresca). Subyace a la forma 1 y se encuentra interceptada vertical y subverticalmente por las formas 2 y 3 anteriormente descriptas. En términos generales las rocas objeto de fundación, gneises gris verdosos y

pegmatitas aplíticas rosadas, son rocas frescas o débilmente alteradas, A1 o A1-A2, con cristales brillantes, observándose en general una leve decoloración del macizo en las paredes de los planos de discontinuidad.

### *Estructura del macizo rocoso*

La estructura del macizo rocoso responde a la existencia de un amplia zona regional de fajas ultramilonitizadas de rumbo E-O. Consecuencia de la reactivación terciaria producida por la Orogenia Andina de los antiguos planos estructurales correspondientes a las fases deformacionales producidas desde el Ciclo Transamazónico, la situación estructural se resume según tres orientaciones claramente definidas constituyendo los Dominios Estructurales A, de orientación E-O; B, de orientación NE-SO y C, de orientación NO-SE.

- a) Se visualiza una distinta morfología en ambas márgenes. La izquierda posee una tendencia a la concavidad mientras que la derecha existe tendencia a la convexidad. El cuadro lito-estructural y la diferente disposición y respuesta de las rocas resultantes a la degradación explicarían las tendencias descriptas.
- b) El cuadro estructural detectado reconoce cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial y subsuperficial. Tres de ellas poseen inclinación subvertical y la restante es subhorizontal. Los rumbos generales son NE-SO, NO-SE y E-O.
- c) Las estructuras de ciza son de rumbo subparalelo y de rumbo diagonal al eje de la presa y afectan directamente a la fundación de la presa en ambas márgenes. Corresponden a líneas estructurales de envergadura mayor, de espesor variable y longitud no detectable pero, por inferencia, extensos. Consecuente con ello, existen evidencias de arenización (modelo de alteración 3) en el estribo de margen derecha y en los sondeos a medio faldeo y en margen izquierda a medio faldeo y en el estribo subyacentes a los depósitos arenosos de origen antrópico. Las rocas alteradas resultantes fueron excavadas a los fines de la fundación.
- d) Respecto a las estructuras cortantes de falla son contrastantes en margen derecha y margen izquierda. Mientras en la primera toda una zona de falla o de corte con intensa microfisuración recorre el empotramiento en forma diagonal al mismo siguiendo una orientación desfavorable a los fines de la estabilidad de la presa (progresivas 110 m a 150 m), en la margen izquierda mayormente predomina un macizo fracturado en menor magnitud habiéndose detectado evidencias de falla a medio faldeo (progresivas 45 a 70 m aprox.) y en las cercanías del sitio de empotramiento como lo detectado en progresiva 24 m.

### *Orientación de las discontinuidades*

El rumbo de la traza elegida es N34°E.

En margen derecha, en general los rumbos de las discontinuidades dominantes respecto al eje de la presa guardan una relación desfavorable respecto a la estabilidad del estribo toda vez que las mejor caracterizadas, dados los escasos afloramientos y la inexistencia de testigos de perforación orientados, poseen una disposición subparalela o diagonal al eje unos 30° al norte con planos de inclinación de alto ángulo y/o a 45° mayormente hacia aguas abajo. Coadyuva a esta definición la

existencia de cuatro familias de discontinuidades y sus orientaciones generales.

En margen izquierda el problema de la inexistencia de afloramientos se acentuó. Así, en los escasísimos y muy discontinuos afloramientos se detectó la presencia, si bien en menor magnitud aparente que en la otra margen, de fajas de cizalla de rumbos diagonales (E-O) al eje de hábito subvertical hacia aguas abajo y, en profundidad, fallas de corte, de rumbos no conocidos pero de inferencia diagonal al eje, lo cual también constituye una orientación desfavorable de la estructura respecto al eje y el estribo izquierdo constituyendo vías preferenciales de circulación de agua en el subsuelo.

#### Zonificación litoestructural del macizo rocoso a los fines de su clasificación geotécnica

Fueron identificadas las siguientes zonas litoestructurales consecuentes con la litología, grado de alteración y el sistema estructural descripto:

- *Zona Litoestructural 1*: Responde a las formas de alteración 1, 2 y 3 descriptos: a) Zona alterada paralela a la superficie del terreno y a la roca no alterada en sectores en margen derecha y en margen izquierda. b) Alternancia de zonas alteradas que se ubican entre discontinuidades en toda el área de la presa. c) Zona de ciza o intenso fracturamiento en margen derecha e izquierda ligado al empotramiento de los estribos y en el subsuelo de la fundación del cuerpo principal de la presa.
- *Zona Litoestructural 2*: Roca masiva, fresca a poco alterada, exceptuando las fallas localizadas, detectada en todas las perforaciones, a distintas profundidades en todo el área de fundación.

En el macizo rocoso, la zona litoestructural 1 se presenta, en líneas generales, subsuperficialmente paralela y varía su espesor de acuerdo a la ocurrencia local de algunos, a veces combinados, de las formas 1, 2 y 3 de alteración. La zona Litoestructural 2 se encuentra inmediatamente subyacente.

#### Macizo rocoso - determinaciones geotécnicas

Zonificado el macizo, el objetivo de clasificar geotécnicamente las zonas resultantes es el de proveer al proyectista de datos cuantitativos que son requeridos para la solución de los problemas de ingeniería y brindar de esta manera una base efectiva de comunicación entre todos los integrantes del equipo de investigación en geotécnica.

De acuerdo a la zonificación litoestructural realizada, la zona 1 mayoritariamente posee rocas cuyo grado de alteración inhibe en muchos casos la aplicación de clasificaciones geomecánicas toda vez que las mismas componen un cuadro de alteración cuya distribución expone rocas de alteración **A4** a **A6** por lo que, entre otros parámetros, el RQD no resulta evaluable. Sin embargo, existen también áreas subsuperficiales muy fracturadas, donde la alteración y el grado de fracturamiento, de orientación desfavorable, no alcanzan la magnitud extrema de lo mencionado anteriormente, poseyendo separación de las discontinuidades que varían entre 0,06 m - 0,2 m y < 0,06 m o brechosa dando como resultado RQD de valores muy bajos a valores 0 (cero), siendo por lo general muy permeables con valores Lugeon muy altos (Giaconi, 2009).

La zona 2 presenta rocas duras, gneises y pegmatitas aplíticas, de peso específico general entre 2,6 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>, poco meteorizadas a frescas, algo fracturadas donde si bien las orientaciones estructurales se infieren desfavorables respecto a la estabilidad de estribos y/o circulación de flujo subterráneo, las matrices rocosas en cuanto al grado de alteración mayoritariamente son **A1** a **A1-A2**, cuestión de importancia respecto a la posibilidad de mejoramiento de las condiciones geomecánicas por tratamiento.

En gran parte, aunque existen excepciones fundamentalmente en el área de los estribos, se determinó para esta zona 2 un valor de RQD superior al 75 % con valores modales en 90 a 100 % siendo que las separaciones de las discontinuidades son por lo general superiores a 0,6 m y las diaclasas se presentan cerradas o con muy baja apertura (< 0,1 mm), rugosas, por lo general sin relleno (excepto en zonas localizadas de fallas) y donde los planos o paredes de las diaclasas no presentan alteración o la poseen en grado ligero. En general los valores de los ensayos Lugeon son bajos a muy bajos, incluso sin admisiones a excepción de las zonas localizadas de falla (Giaconi, 2009).

#### Relevamiento geológico - geotécnico de la fundación

El complejo litoestructural descripto fue relevado según se ilustra en la Figura 1 mediante la confección del plano y perfil geológico. En la Figura 2 se brinda el plano de alteración geotécnica de las rocas de fundación desde el punto de vista geológico ingenieril realizado según la estandarización de la International Association of Engineering Geology (Dearman et al., 1989). El perfil geotécnico fue publicado en el CAMSIG 2010 (Flores et al., 2010)

#### MÉTODOS DE EXCAVACIÓN DE LOS MATERIALES

La excavación de materiales requirió la utilización de medios mecánicos y/o voladuras. La selección del método de excavación dependió básicamente de la excavabilidad de los materiales, de las dimensiones y geometría de la excavación y del rendimiento de la maquinaria.

En general, los principales métodos de excavación en función del grado de consistencia de los materiales, son: a) medios mecánicos para materiales poco consolidados (pala excavadora y pala cargadora) para excavación directa de materiales de suelos finos o granulares y rocas muy alteradas y carga de materiales previamente fragmentados mediante otras técnicas. b) medios mecánicos para materiales consolidados (uña/s escarificadoras de alta potencia o rippers. En algunos casos los rippers son dotados de martillos hidráulicos de impacto) para excavación de rocas alteradas. c) Voladuras mediante explosivos ocasionando la disgregación o fisuración de las rocas según sea la voladura de extracción o de esponjamiento del material. (Giaconi et al., 2009)

En función de ello y teniendo en cuenta la sísmica de refracción realizada en trabajos previos, los materiales detectados fueron excavados: a) mecánicamente: los suelos finos y granulares de la cobertura no rocosa y las rocas muy alteradas y cizalladas de la zona 1. b) escarificables con dificultad: algunos de los materiales rocosos con menor rango de alteración y fracturación que los anteriores. c) voladuras de baja intensidad: en el resto de la excavación hasta llegar a la superficie de fundación donde se sitúan las rocas de la zona 2.

Respecto a la utilización de voladuras de baja intensidad, un ejemplo indicativo de lo realizado se visualiza en la Tabla 1.

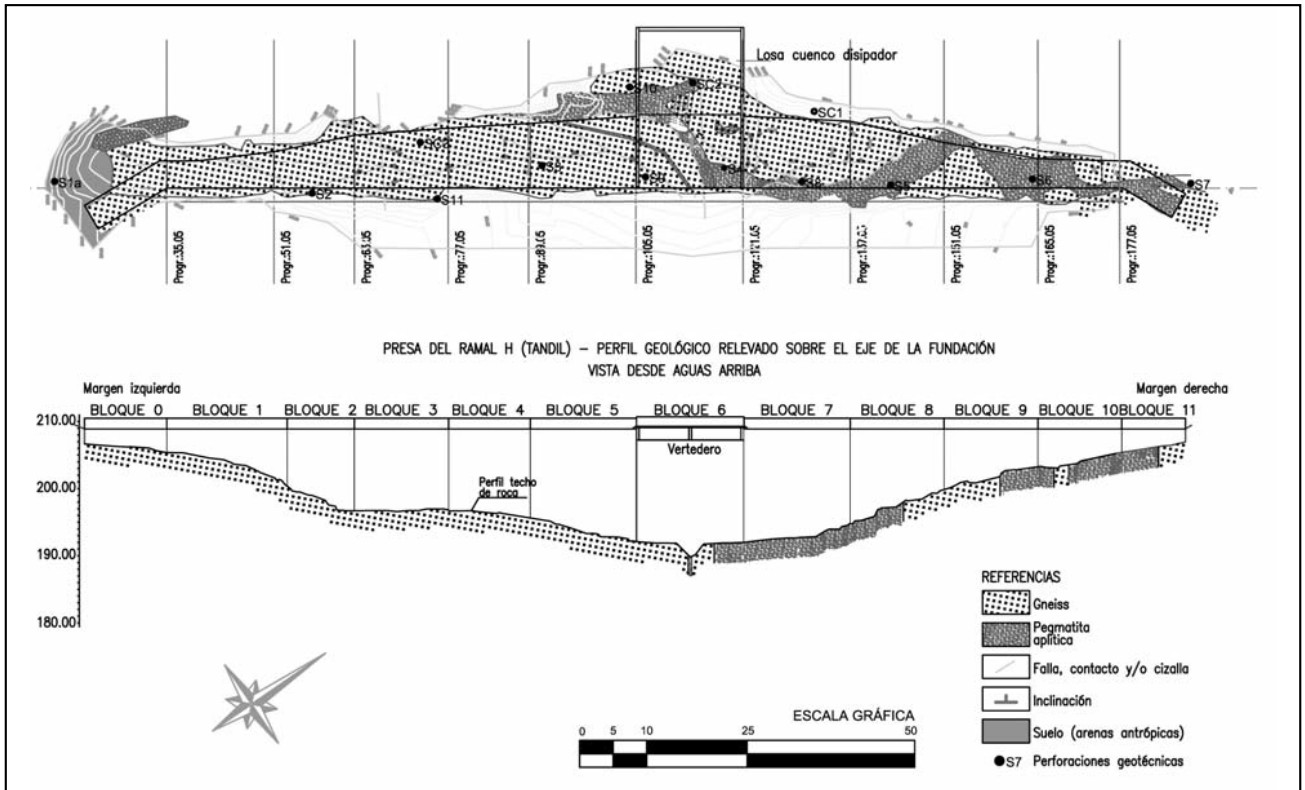


Figura 1. Ramal H. Plano Relevamiento y Perfil Geológico.

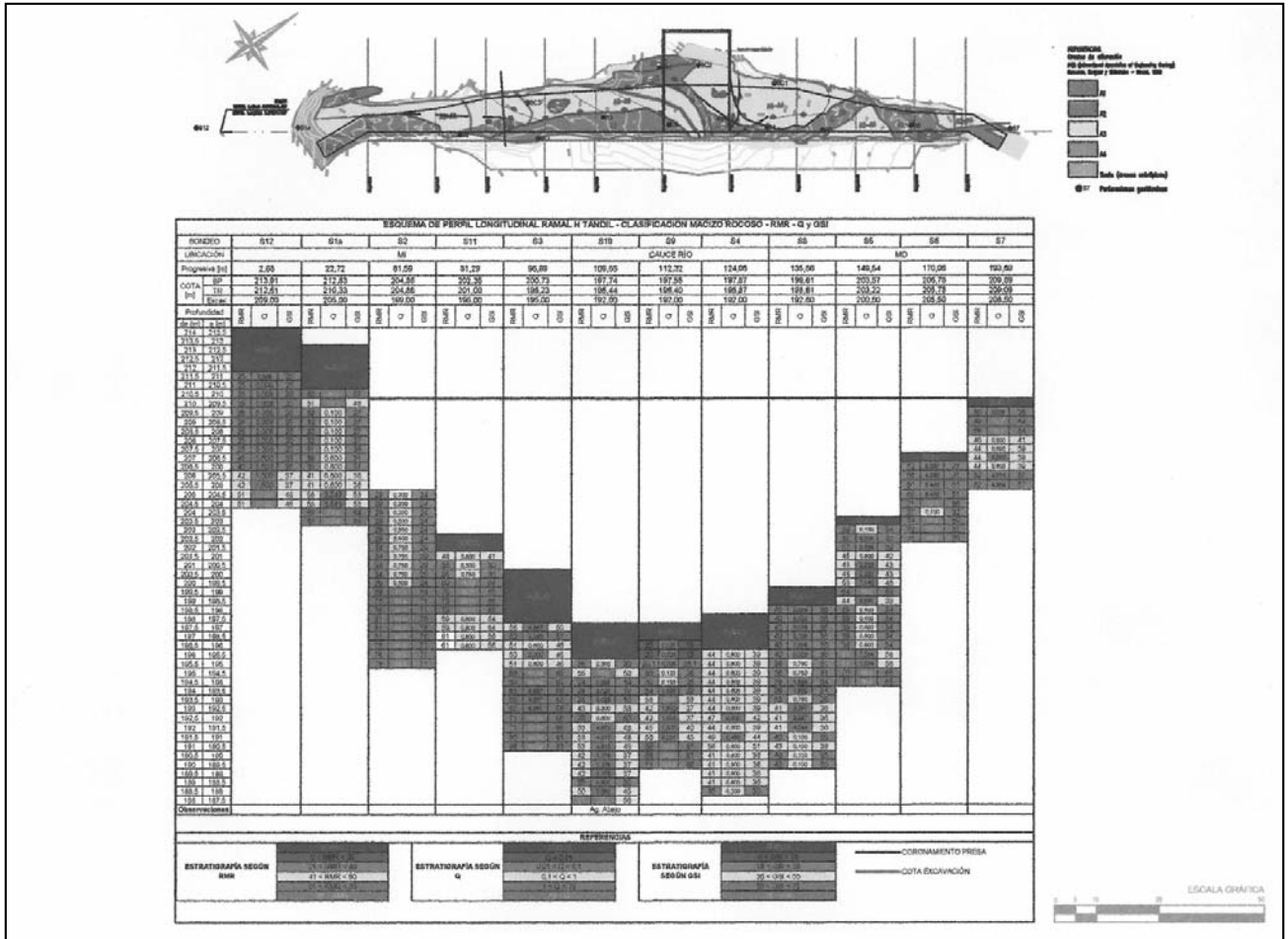


Figura 2. Ramal H. Plano Relevamiento y Perfil Geotécnico.



Tabla 1. Esquema general de voladura en banco de baja intensidad.

Altura del banco (m)	Prof. del banco (m)	Espaciamiento práctico (m)	Carga de fondo (kg)	Carga de columna (kg)	Carga total (kg/barreno)	Carga específica (kg/m <sup>3</sup> )
1,5 - 2,0	2,0 - 2,5	0,80 a 1,20	0,70	0,20	0,90	0,35

Se utilizaron bajas concentraciones de explosivos y la utilización en la secuencia de voladura de milisegundos de retardo a los fines de provocar el vuelco de las rocas, de tal manera de no dañar la roca remanente y reducir los costos de tratamientos posteriores.

El esquema de voladura brindado fue mensurado y analizado en función de su eficacia e impacto sobre el ambiente adyacente al sitio de obra mediante voladuras de prueba y, una vez aprobado, fue permanentemente controlado mediante la utilización de sismógrafo portatil.

#### Desarrollo general de la excavación

El cuadro geológico y geotécnico descripto determinó la existencia de variaciones litoestructurales importantes y consecuentes variaciones mecánicas e hidráulicas. Sin embargo, la distribución espacial de las mismas era conocida a través de los estudios previos sólo parcialmente en la zona de emplazamiento, por lo que se dispuso la siguiente secuencia en las acciones de excavación:

- a) **Excavación en materiales de cobertura tales como:** suelos orgánicos, sedimentos fluviales y eólicos y materiales meteorizados removidos antrópicamente. (con y sin bombeo).
- b) **Excavación del macizo rocoso alterado subyacente.** Una vez realizado el destape por medios mecánicos de la fundación rocosa con la remoción de las zonas superficiales meteorizadas dispuestas horizontalmente

(modelo de alteración 1), se realizó un análisis geológico geotécnico de la misma en la que se cartografiaron las estructuras y características geológicas presentes, entre ellas: contactos geológicos de distinta competencia geomecánica, planos de corte y zonas de ciza, fajas de alteración de distintas características, etc., tal que permitiera proyectar las excavaciones siguientes.

*b.1) Excavación gruesa.* A partir de entonces, la excavación gruesa se realizó con el uso de escarificadores y explosivos mediante la voladura de bancos bajos utilizando la técnica de voladura de baja intensidad (Figura 3).

*b.2) Excavación fina y saneamiento dental.* Finalizado el proceso de excavación gruesa por los métodos expuestos, se iniciaron las tareas de excavación fina. El producto final de esta tarea es la definición del apoyo específico de la fundación de la presa, el cual se encuentra muy relacionado con los tratamientos superficiales de la alteración y de las zonas fracturadas y cizalladas.

La excavación fina es la excavación de los últimos cm de roca previos a su cobertura con hormigón a fin de preservar la roca de fundación de las condiciones de intemperización siendo que, en aquellos sectores que requirieron una mayor intensidad de tratamiento por presencia de rocas de baja calidad, calafateo - saneamiento dental, se debe producir una mayor extracción del material rocoso, en una relación mínima de dos veces en profundidad respecto al ancho de faja excavado, el cual finalmente es reemplazado con hormigón H-13 vibrado.



Figura 3. Excavación gruesa de la fundación - voladura de roca.

Antiguamente la decisión final expeditiva sobre el terreno respecto a la profundidad del tratamiento de la excavación fina conlleva la responsabilidad profesional de detectar la calidad geomecánica mediante el sonido que produce la roca al golpe de martillo geológico. El sonido apagado, hueco, reconoce rocas de mala calidad y el sonido metálico al golpe de martillo en cambio determina rocas de buena calidad geomecánica. En la actualidad, la herramienta muy útil a estos fines es el martillo de Schmidt (*González de Vallejo et al., 2004*). En definitiva, la conjugación de ambos métodos de auscultación de calidades mecánicas resulta conveniente de uso.

En el caso de la presa del Ramal H, la definición de este plano estuvo muy relacionado con los tratamientos superficiales de la alteración, entre ellos: a) Remoción de zonas alteradas remanentes dispuestas horizontalmente sobre roca rígida y fresca (modelo de alteración 1). b) Remoción de zonas alteradas entre discontinuidades (modelo de alteración 2). Este tratamiento se denomina "dental". Demandó mayor trabajo y tiempo. La existencia de estas zonas de alteración profundas obligó a reemplazar, hasta una profundidad evaluada en el momento, el material rocoso alterado por hormigón H-13. En el área de contacto entre los diques pegmatíticos y la roca de caja gneissica se observó una mayor intensidad de la alteración. Allí este tratamiento fue mas intenso y profundo al igual que en las zonas de cizalla dentro del macizo de composición esencialmente gneissica. c) En las zonas de ciza (modelo de alteración 3) como las que afectan a los empotramientos y otros sectores,

además de la remoción de las rocas alteradas, se realizó el calafateo de fisuras o lajosis. d) Para la roca masiva y sana (zona geotécnica 2), no se realizaron tratamientos superficiales. Cabe acotar que durante las tareas se debió realizar el bombeo de agua que ingresó y se almacenó en las excavaciones fundamentalmente en el área central. Su origen se debió a precipitaciones meteóricas y/o escurrimiento de flujo subterráneo subsuperficial. Estas tareas fueron previas a la construcción del hormigón de regularización de la presa. Posteriormente desde el mismo se desarrolló el tratamiento mediante inyecciones cementíceas de consolidación e impermeabilización a los fines de homogeneizar la cimentación y el control de las filtraciones del macizo rocoso sujeto a la fundación de la presa.

#### Volúmenes de H° utilizados en el tratamiento dental de la roca de fundación

Previo al desarrollo de las tareas de saneamiento se demarcaron las zonas a ser tratadas mediante el reemplazo de las rocas de baja calidad geomecánica por hormigones de mejor condición (Hormigón H-13) y se realizó una medición de volúmenes. La Tabla 2 ilustra sobre estos aspectos.

Por lo tanto, en la superficie de apoyo se procedió a:

- Limpieza y saneo de materiales erosionables y bloques sueltos.
- Sellado de fracturas, huecos y grietas.
- Relleno de cavidades, zonas alteradas y/o cizalladas.

Tabla 2. Volúmenes de hormigón H-13 utilizados en el tratamiento dental

SECTOR	ENTRE PROGRESIVAS (m)	TOTAL (m³)	OBSERVACIONES
TD14	30 a 60 (ag. ab. del eje cruzando hacia ag. arr.)	56,0	margen izquierda - área del estribo
TD13	65 a 80 (gran parte del ancho de presa)	235,6	margen izquierda - al sur del desvío del A°
TD12	80 a 90 (aguas abajo del eje)	50,0	margen izquierda - al norte del desvío del A°
TD11	80 a 90 (parte central)	15,0	margen izquierda - al norte del desvío del A°
TD10	90 a 93 (aguas abajo del eje)	4,8	margen izquierda - al norte del desvío del A°
TD9	90 a 110 (parte central)	9,6	margen izquierda - al norte del desvío del A°
TD8	90 A 120 (aguas abajo del eje)	28,8	salvanda occidental al dique aplítico
TD7	90 a 120 (aguas abajo del eje)	35,6	salvanda oriental al dique aplítico
TD6	114 a 122 (zona central y aguas arriba)	176,8	Zona de cizalla coincidente con curso del A°
TD5	131 a 138,5 (aguas abajo del eje)	45,0	margen derecha
TD4	140 a 150 (aguas abajo del eje)	24,0	margen derecha
TD3	150 a 160 (aguas arriba del eje)	20,8	margen derecha
TD2	162 a 175 (aguas abajo del eje)	8,6	margen derecha
TD1	175 a 180 (aguas abajo del eje y parte central)	10,0	Estribo margen derecha
		720,6	Volumen en sectores demarcados como TD
	Calafateo de fracturas y cizallas en general	252,2	Estimación = + 35 %
		972,8	Volumen total estimado de tratamiento dental

La Tabla 3 informa sobre la dosificación del hormigón H-13 utilizado en las tareas de tratamiento:

**Tabla 3. Dosificación del Hormigón H-13**

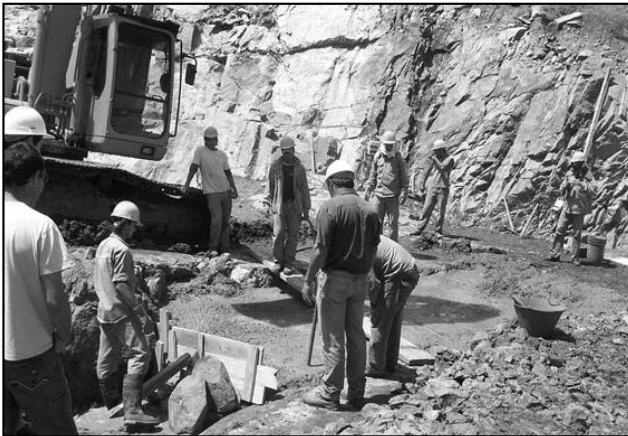
HORMIGON H-13	
COMPONENTES	CANTIDADES (kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	250
P6 - 20	621
P 10 - 30	417
Arena fina	637
rena 0 - 6	275

**Excavación fina y saneamiento dental -  
Fotografías del tratamiento efectuado**

Las figuras que siguen ilustran sobre tratamiento realizado.



**Figura 4. Limpieza de la roca de fundación mediante aire y agua a presión.**



**Figura 5. Excavación fina de las rocas de fundación en el área central de la presa.**



**Figura 6. Área de estribo de margen derecha. Dique de rocas pegmatíticas rosadas en el plano de fundación previo a las tareas de saneamiento del contacto con rocas de composición gneissica. Se observa buena calidad geomecánica de la matriz rocosa pero con intensa presencia de fisuras, en parte rellenas de arcillas.**



**Figura 7. Sector demarcado para limpieza y calafateo de material muy fisurado con parcial presencia de arcillas plásticas rellenasdo fisuras entre progresivas 170 a 180.**



**Figura 8. Vista del sector anterior (Figura 7) una vez finalizada la tarea de limpieza y previo al hormigonado de protección.**



Figura 9. Vista de la fundación entre progresivas 165 y 170. Tarea de limpieza con aire y agua a presión previo al hormigonado de protección y construcción del zócalo de apoyo. Se observa dique pegmatítico en roca de caja de composición gneissica.



Figura 10. Saneamiento del contacto entre las rocas pegmatíticas y las rocas gneissicas.



Fotografía 11. Detalle del calafateo de zonas fisuradas y alteradas en la roca de fundación.



Figura 12. Saneamiento material alterado en el plano de fundación. Progresivas 125 a 150 m Zona de microfracturación y cizalla con presencia de arcillas en parte dentro de las rocas gneissicas cercana al contacto con el dique pegmatítico situado hacia aguas arriba y en parte en el contacto entre los dos tipos de roca mencionados.



Figura 13. Sanamiento dental finalizado del contacto gneiss - pegmatita en progresivas 125 a 150m, realizado el procedimiento de lavado con aire y agua a presión previo al hormigonado de reemplazo y protección.

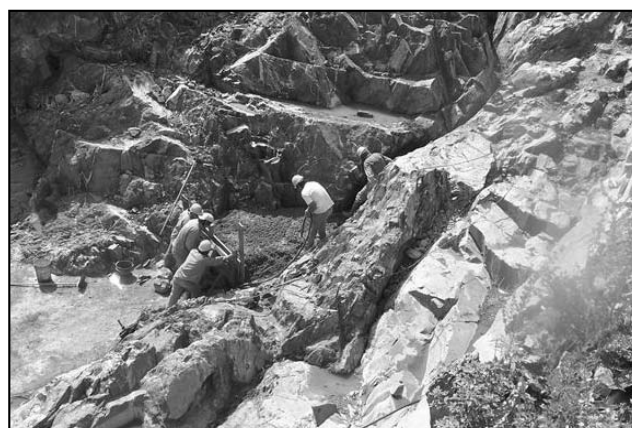


Figura 14. Proceso de hormigonado de reemplazo durante el saneamiento de zonas de alteración con presencia de cizalla en rocas de composición gneissica tonalítica cercanas al contacto gneiss - pegmatita.



Figura 15. Saneamiento dental. Vibrado del hormigón H13 de reemplazo de la roca extraída de baja calidad geomecánica en el sector saneado.



Figura 16. Tratamiento dental. Probetas de ensayo del hormigón H13 utilizado en la tarea de saneamiento.



Figura 17. Vista general del saneamiento efectuado en el lateral izquierdo de la presa previo a la construcción del zócalo de apoyo u hormigón de regularización o plinto.



Figura 18. Zócalo de apoyo de la presa o plinto. Vista general desde el estribo de margen derecha de la totalidad del zócalo de apoyo. En primer plano se observa la colocación de los módulos para la construcción del bloque 10 de la presa.

### CONSIDERACIONES FINALES

En un área antropizada, profusamente edafizada y cuya evolución geológica de miles de millones de años es compleja, los estudios básicos de geología e ingeniería geotécnica realizados durante el desarrollo del proyecto si bien determinaron la existencia de un macizo rocoso de características geomecánicas e hidráulicas disímiles, no permitieron dilucidar en toda su magnitud el complejo cuadro geológico geotécnico resultante en profundidad y mas precisamente en el plano de apoyo de la presa. La existencia de aleatorias fajas de rocas fracturadas y/o cizalladas y alteradas en contacto no transicional con rocas de muy buena calidad geomecánica como puede observarse en las Figuras 1 y 2, coadyuvaban de manera decisiva en este aspecto.

La presencia de estas dispares condiciones mecánicas obligó a un seguimiento laborioso y un relevamiento y mapeo minucioso de las características particulares del macizo rocoso durante las tareas de excavación que redundaron finalmente en las tareas de homogeneización geomecánica desarrolladas en el plano de fundación de la presa mediante tratamiento dental descriptas e ilustradas en el presente trabajo.

La persistencia recurrente de precipitaciones extraordinarias en el ámbito de las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires obliga en las áreas antropizadas al desarrollo de otras obras de mitigación de los escurrimientos resultantes similares a la presentada en este trabajo. Por caso vale mencionar la futura presa del arroyo Blanco al suroeste de la ciudad de Tandil cuyos primeros estudios de geología y geotécnica ya se han realizado (*Giaconi, 2011*), amén de las anteproyectadas presas La Isidora y Manantiales, sobre los arroyos Azul y Videla respectivamente, aguas arriba de la ciudad de Azul (Provincia de Buenos Aires), aunque estas dos últimas son de estructura diferente a la del A° Blanco (*Giaconi, 1993*).

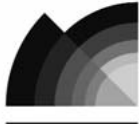
Por consiguiente, se infiere necesario que a futuro en el área de desarrollo de proyectos como el presente, se tengan en cuenta los aspectos aquí expuestos toda vez que ello implica, independientemente de las tareas de inyecciones cementíceas que posteriormente se desarrollen, una particular y laboriosa tarea de tratamiento dental de la fundación y, en consecuencia, un mayor tiempo de ejecución y un incremento en el costo de la obra.

**TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- DEARMAN, W.R; SERGEEV, E. Y SHIBAKOVA, V. 1989.  
Engineering Geology of the Earth  
*Moscú.*
- FLORES, R. M. 2009.  
Presa del Ramal H - Informe de Ingeniería Geotécnica.  
*(Inédito).*
- FLORES, R. M. Y L. M. GIACONI. 2010.  
Aspectos geotécnicos de la fundación de la Presa del Ramal H. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG).  
*Mendoza (Argentina).*
- GIACONI, L. M. 1993.  
Presas La Isidora y Manantiales - Informe de Prefactibilidad de Geología y Geotécnica.  
*(Inédito).*
- GIACONI, L. M. 1994.  
Estudio geológico superficial Ramal H.  
*(Inédito).*
- GIACONI, L. M. 2009.  
Presa del Ramal H - Informe de Geología y Geotécnica.  
*(Inédito).*
- GIACONI, L. M. 2011.  
Presa del Ramal H - Informe Complementario de Geología y Geotécnica.  
*(Inédito).*
- GIACONI, L. M. 2011.  
Presa del Arroyo, Tandil - Informe preliminar de Geología y Geotécnica.  
*(Inédito).*
- GIACONI, L. M., GIORDANO R. E. Y CUMBA A. 2009.  
Métodos de excavabilidad para la fundación de la presa del Ramal H (Tandil).  
*IV Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología - II Reunión del Cuaternario de América del Sur. La Plata. Págs. 526 - 535.*
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. I.; FERRER M.; ORTUÑO, L. Y OTEO C. 2004.  
Ingeniería Geológica.  
*Pearson Educación S. A.. 715 pp. Madrid*
- US ARMY CORP OF ENGINEERS (USACE). 1983.  
Seepage Analysis and Control for Dams CH1 (Change 1),  
*EM 1110-2-1901, Apendix C. 389 pp.*







## Metodologias para a análise de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens LANDSAT e SPOT: o exemplo da região entre Vigo e Viana do Castelo (NW da Península Ibérica)

## Methodologies for the analysis of geo-structural lineaments from LANDSAT and SPOT images: the example of the region between Vigo and Viana do Castelo (NW Iberian Peninsula)

Pinho, R. <sup>1</sup> ✉ - Gomes, A. <sup>1</sup> - Pérez - Alberti, A. <sup>2</sup> - Chaminé, H. I. <sup>3</sup>

Recibido: 29 de Junio de 2012 • Aceptado: 24 de Setiembre de 2012

### Resumo

*O presente estudo tem como objectivo a apresentação de metodologias para a detecção remota de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens dos satélites LANDSAT e SPOT. Será dada ênfase aos lineamentos com potencial interesse geomorfológico no NW de Portugal Continental e no SW da Galiza (Espanha), através da utilização combinada de dados espectrais de detecção remota espacial, dos sensores ETM+ e HRVIR (satélites Landsat 7 e SPOT 4, respectivamente), bem como de dados altimétricos. A interpretação visual dos dados espectrais foi aperfeiçoada através da aplicação de técnicas de processamento digital, que consistiram na melhoria do contraste tonal por expansão linear do histograma e na aplicação de um filtro espacial de realce de contornos não direccional. Foram utilizadas várias composições coloridas RGB para a identificação de lineamentos estruturais e compararam-se as potencialidades e fragilidades exibidas pela interpretação morfoestrutural que as imagens de satélite permitiram evidenciar para a área de estudo. A identificação deste tipo de estruturas culminou na elaboração de uma cartografia de lineamentos geo-estruturais, que integrou os elementos lineares vectorizados sobre as imagens de satélite e sobre o modelo digital de terreno (MDT).*

<sup>1</sup> Departamento de Geografia da Universidade do Porto e Centro CEGOT, Portugal;

✉ rfcpinho@yahoo.com

<sup>2</sup> Departamento de Geografia e Instituto de Investigaciones Tecnológicas (Área de Geomorfología), Universidade de Santiago de Compostela, Galicia, España;

<sup>3</sup> Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, DEG, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto e Centro GeoBioTec|UA, Portugal

**Palavras-Chave:** Geomorfologia estrutural, Lineamentos, Detecção Remota, LANDSAT, SPOT, NW da Península Ibérica

## Abstract

This study aims to present methodologies to obtain geo-structural lineaments from LANDSAT and SPOT satellite images. Emphasis will be given to lineaments with potential geomorphological interest in the NW Portugal and SW Galicia (Spain), through the combined use of spectral data from spatial remote sensing, obtained by ETM+ and HRVIR sensors (Landsat 7 and SPOT 4 satellites, respectively), and altimetric data. Visual interpretation of the spectral data was improved by the application of digital processing enhancement techniques. Those consisted in tonal contrast improvement by linear expansion of the histogram and the application of a nondirectional spatial filter of contours enhancement. Several RGB color compositions were used for the identification of geo-structural lineaments in the study area and the strengths and weaknesses shown by the morphostructural interpretation that the satellite images could highlight were compared. The identification of these structures culminated in geo-structural lineaments mapping, which integrated the vectorized linear features on the satellite imagery and on the digital terrain model (DTM).

**Key words:** Structural Geomorphology, Lineaments, Remote Sensing, LANDSAT, SPOT, NW Iberia

## INTRODUÇÃO

A noção de lineamento pode ser encarada como “um elemento linear cartografável, simples ou composto, de características rectilíneas ou ligeiramente curvilíneas, observado à distância e na superfície da Terra, relacionado com um fenómeno geológico/geomorfológico natural e não antrópico” (Brum da Silveira, 2002) e, por isso, revelador de uma estrutura tectónica ou de uma zona de fraqueza crustal (Sabins, 1997).

A detecção remota tem registado grandes avanços e tem apoiado fortemente a aquisição de dados em trabalho de campo. As suas aplicações são múltiplas e, nos últimos anos, as técnicas de detecção remota têm sido amplamente utilizadas no Maciço Ibérico no domínio das Ciências da Terra, incluindo, por exemplo, várias áreas disciplinares da geomorfologia, da geologia estrutural e da geologia económica, como as cartografias geológico-estrutural e geomorfológica (e.g., Carvalho et al. 1978, Blanchard et al. 1979, Gutiérrez Claverol et al., 1988, Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002; Rabaça et al., 2004; Silva et al., 2006; Martín-González et al., 2007; Pinho et al., 2008, 2009; Pérez-Alberti et al., 2009). Contudo, a análise e interpretação de dados adquiridos por sensores a bordo de plataformas aéreas, como as fotografias aéreas, continua a ser a metodologia mais utilizada para a detecção de lineamentos. O recurso a dados de detecção remota espacial, como as imagens de satélite, tem tido um papel de menor relevo neste contexto.

Neste estudo, essencialmente de carácter metodológico, a identificação de lineamentos realizou-se através da interpretação de dados digitais de detecção remota espacial, adquiridos pelo sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), do satélite Landsat, série 7, e pelo sensor HRVIR (High Resolution InfraRed), do satélite SPOT, série 4. A consecução deste objectivo consubstanciou-se, igualmente, no recurso a dados altimétricos, que serviram de base à construção do modelo digital de terreno, representação espacial que realça os aspectos geomorfológicos da área e, portanto, extremamente útil para a detecção e reconhecimento dessas estruturas lineares. A interpretação visual das imagens Landsat 7 e SPOT 4 foi aperfeiçoada através da aplicação de duas técnicas de processamento digital: melhoria do contraste tonal por expansão linear do histograma (Sabins, 1997; Mather, 2006; Salinero, 2007) e aplicação de uma técnica digital automática de detecção de elementos lineares – filtro espacial de realce de contornos não direccional (Richards & Jia, 2006; Salinero, 2007) – para cada uma das bandas dos sensores ETM+ e HRVIR usadas nas composições coloridas RGB.

O presente estudo tem como objectivo principal a identificação de lineamentos com potencial interesse geomorfológico numa área luso-galaica, que compreende um sector do noroeste de Portugal continental e um sector do sudoeste da Galiza, em Espanha.

## ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo seleccionada para este trabalho constitui um polígono quadrangular, com uma área de aproximadamente 3600 km<sup>2</sup> (60 km x 60 km) e corresponde à área abrangida pela cena SPOT (sensor HRVIR) utilizada neste estudo (Figura 1). Na área em estudo, o relevo assemelha-se a um amplo anfiteatro aberto a Oeste, configurado por uma série de “degraus” que descem até ao mar (Araújo & Pérez Alberti, 1999).

A análise da topografia sugere que a área em estudo pode ser subdividida em três unidades principais (Figura 2). A primeira corresponde a uma superfície de aplanamento pouco desenvolvida e imperfeita, de idade provavelmente Plio-quadernária, que penetra ao longo dos rios principais – Minho, Lima e Coura (Brum Ferreira, 1983). Estes rios, sensivelmente paralelos, possuem uma direcção NE-SW a ENE-WSW. Os seus vales são muito largos a jusante, com fundo plano que denuncia o fraco encaixe na superfície. Estas características esbatem-se no sector oriental da área de estudo, em que o encaixe vigoroso dos vales passa a dominar a morfologia (e.g., Teixeira, 1944; Brum Ferreira, 1983; Soares de Carvalho, 1992; Soares, 2007). A segunda unidade de relevo é constituída por um conjunto de depressões de direcção meridiana (Araújo & Pérez Alberti, 1999), como é o caso da do Porriño, que constituem a segunda unidade de relevo. A superfície de aplanamento é interrompida por serras litorais, como a serra de Arga (823 m), no sector português, e serras interiores de direcção principal NNW-SSE, tanto no sector galego como no sector português, que constituem a terceira grande unidade de relevo. O relevo da área é um autêntico “puzzle” de blocos alternadamente afundados e soerguidos que se encadeiam entre a faixa costeira e as áreas mais interiores (Araújo & Pérez Alberti, 1999). Este escalonamento do relevo, formando blocos cada vez mais elevados à medida que se avança para o interior, é igualmente notório no sector português da área de estudo, em que a tectónica também parece actuar de forma directa no modelado, configurando uma sequência de escarpas de falha (Soares, 2007).

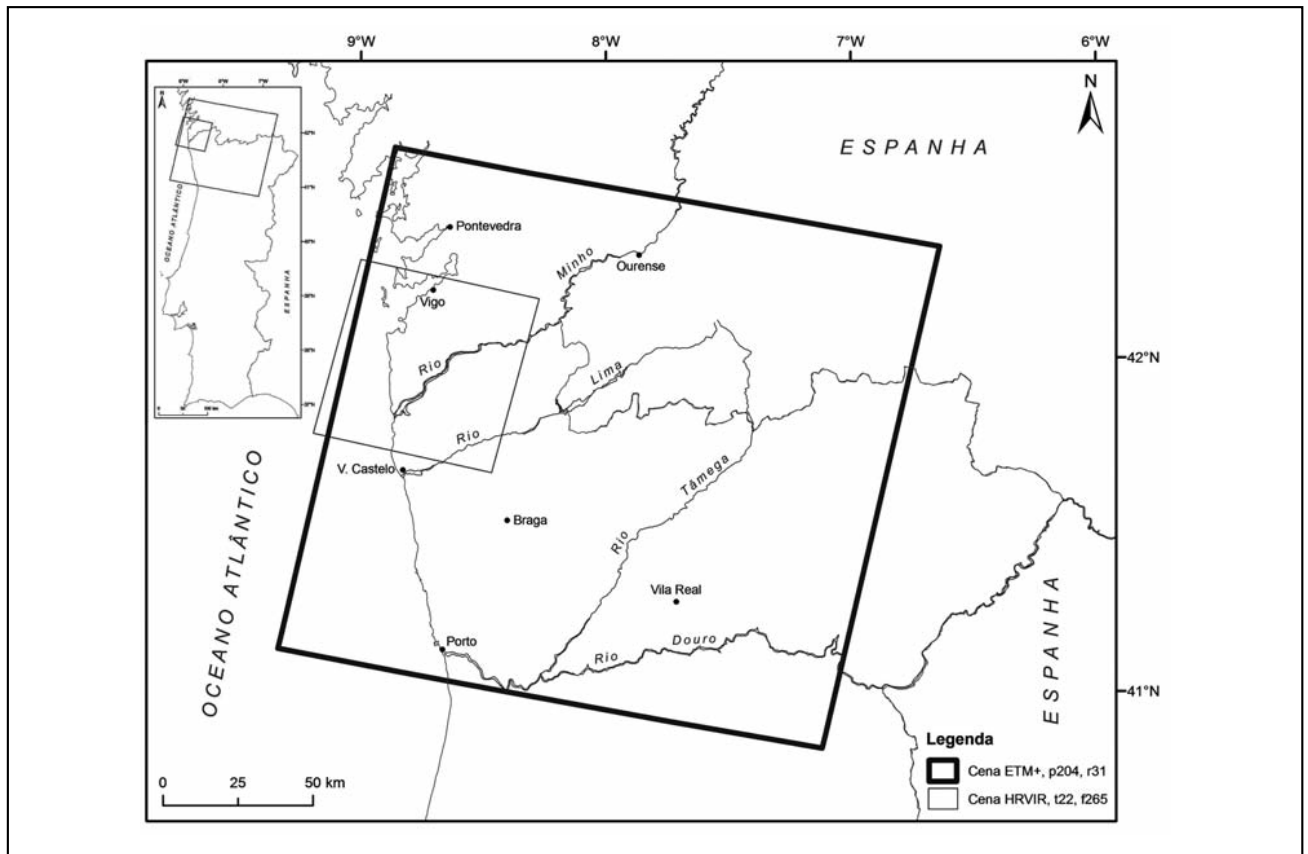


Figura 1. Enquadramento regional do sector de estudo e das cenas ETM+ e HRVIR utilizadas.

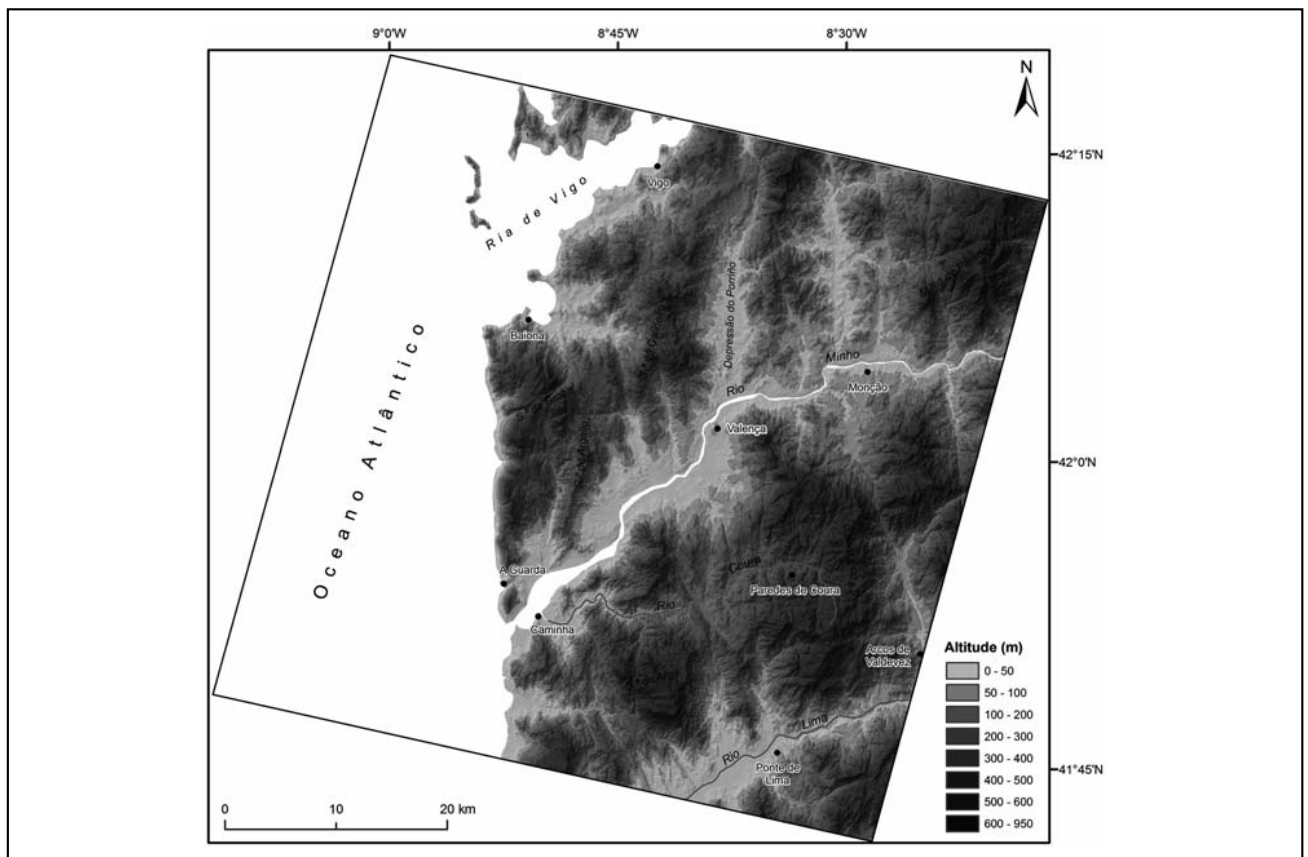


Figura 2. Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobre-elevação) para o sector em estudo.

## MATERIAIS E MÉTODOS E RESULTADOS

### A) Dados espectrais

A cena do sensor ETM+, onde se integra a área de estudo, foi obtida na aplicação *Earth Science Data Interface (ESDI)*, do arquivo *Global Land Cover Facility* (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>), com distribuição gratuita. Esta cena tem centro nominal orbital/ponto (*path/row*) 204/31 e abrange uma vasta área da região Norte de Portugal continental, tal como se pode observar na Figura 1. Foi adquirida no dia 24 de Junho de 2000, com ausência de nuvens e com as seguintes condições de iluminação: ângulo de elevação do Sol de aproximadamente 63,9° e azimute do Sol de aproximadamente 127,7°. O ficheiro de metadados revelou que os dados de imagem estavam georreferenciados segundo o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 e que a cena tinha sido ortorrectificada. A cena SPOT foi obtida através do projecto *HydroSPOT* (<http://leopi.esa.int/esa/esa?aoi=760&rs=1202903343469&cmd=ao-detail>) apoiado pela Agência Espacial Europeia (ESA). Esta cena tem centro nominal orbital/ponto (*path/row*) 221/265 e abarca uma área francamente menor que a cena Landsat (cf. Figura 1), correspondendo, tal como se disse atrás, à área de estudo apresentada. A análise do ficheiro de metadados da cena SPOT indicou que a imagem estava georreferenciada segundo o sistema de projecção Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA), datum ETRS 1989, e que tinha sido, igualmente, ortorrectificada. Visto que as duas cenas possuíam sistemas de projecção cartográfica diferentes, foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção comum. Transformou-se o sistema de projecção original da cena SPOT no sistema Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 (Fuso 29, hemisfério norte), de modo a permitir a sobreposição de toda a informação disponível. A cena Landsat, com uma área muito superior à cena SPOT, foi recortada por esta, de forma a manter unicamente os dados Landsat relativos à área de trabalho.

### B) Dados altimétricos

A elaboração do MDT para a área de trabalho implicou o recurso a dados altimétricos de entidades diferentes. Para o sector português da área de estudo, utilizaram-se as curvas de nível 1/25000 do IGeoE (Instituto Geográfico do Exército), com equidistância de 10 m, correspondentes às folhas 2, 3, 4, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 27, 28, 29, 40, 41 e 42. Para o sector espanhol, utilizaram-se as curvas de nível 1/25000 do Instituto Geográfico Nacional, com a mesma equidistância, correspondentes às folhas 222, 223, 224, 260, 261, 262, 298 e 299. Os dados das duas entidades possuíam sistemas de projecção cartográfica diferentes, pelo que foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção cartográfica comum. Projectaram-se com o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 (Fuso 29, hemisfério norte), ou seja, o sistema utilizado para o conjunto de toda a informação incorporada no SIG. O MDT, em formato vectorial, foi elaborado no programa ArcGIS 9.2, e, posteriormente, convertido para o formato matricial. Foi ainda realçado pela aplicação do “efeito sombra”, que gerou um mapa de sombreado da área de estudo (azimute 315° e altura do Sol 45°), ao qual se aplicou um grau de sobrelevação vertical de 5 vezes, para enfatizar os aspectos morfológicos.

### C) Processamento digital dos dados espectrais

As técnicas de melhoramento de imagem que seguidamente se descrevem foram executadas no programa PCI Geomatics 9.1.

Com vista à optimização da percepção visual dos elementos das imagens, foi necessário melhorar o contraste tonal, expandindo-o. De entre as várias técnicas de expansão do contraste existentes, optou-se pela expansão linear (“*linear contrast stretch*”), acompanhada de uma saturação de 1%, dado que foi a que evidenciou melhores resultados visuais. Segundo esta técnica, ao valor mais baixo dos níveis de cinzento originais é atribuído um novo valor – 0, enquanto que ao valor mais elevado é atribuído outro novo valor – 255. Esta técnica consiste, portanto, na expansão do histograma original para a máxima amplitude dos níveis de cinzento proporcionada pelo sensor (256). Esta operação foi executada para todas as bandas do sensor ETM+ (à excepção das bandas 6 – infravermelho térmico – e 8 – pancromática, que não foram usadas na elaboração das imagens compósitas) e do sensor HRVIR (exceptuando a banda pancromática, não fornecida pela ESA). Os resultados obtidos melhoraram claramente o processo de interpretação visual, permitindo uma melhor discriminação dos elementos da imagem.

A segunda técnica de melhoramento de imagem utilizada consistiu na aplicação de um filtro não direccional de realce de contornos (“*edge enhancement*”), que consiste numa técnica digital automática de detecção de elementos lineares. Esta técnica enfatiza diferenças locais nos níveis de cinza em estruturas lineares, como são os lineamentos estruturais (Sabins, 1997). A modificação do contraste espacial está dependente da matriz móvel de coeficientes de filtragem (“*kernel*”) utilizada. Um “*kernel*” é uma janela móvel composta por coeficientes que é movida pela imagem original, linha por linha e coluna por coluna. Na imagem resultante desta operação, o nível digital do centro do “*kernel*” obtém-se multiplicando cada coeficiente presente no “*kernel*” pelo nível digital correspondente na imagem original e somando os resultados dos produtos. Esta operação é feita para cada pixel na imagem original (Lillesand et al., 2003). Neste estudo, utilizou-se um “*kernel*” de 3x3, com coeficiente central 8 e restantes coeficientes -1. Esta operação de filtragem foi feita banda a banda e o filtro aplicado foi não direccional, realçando os elementos lineares presentes em todas as direcções. A aplicação deste filtro foi bastante útil no processo de reconhecimento e marcação de lineamentos, pois, ao aumentar o detalhe geométrico na imagem, permitiu realçar zonas de fronteira entre áreas com níveis de cinza diferentes e, deste modo, enfatizou, tal como pretendido, elementos lineares no terreno.

### D) Composições coloridas rgb e seu contributo para a identificação de lineamentos estruturais

Para as imagens do sensor ETM+, a composição colorida mais comum consiste em seleccionar uma banda do visível, outra do infravermelho próximo e outra do infravermelho médio, identificando assim, os três principais eixos de variação na imagem, excluindo o infravermelho térmico (Salinero, 2007). Porém, uma vez que o sensor ETM+ possui três bandas no domínio do visível e duas no infravermelho médio, a escolha das bandas mais adequadas para uma composição colorida afigura-se mais difícil e subjectiva. De modo a se estabelecer um critério mais objectivo para esta selecção, calculou-se o “índice óptimo” (*Optimum Index Factor – OIF*), com o objectivo de contemplar melhor a variação original dos dados numa determinada área (Salinero, 2007):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} S_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|}$$

em que Sk é o desvio-padrão de cada uma das três bandas que integram a composição colorida e rj corresponde ao coeficiente de correlação entre cada par de bandas da composição colorida. Várias composições coloridas têm sido apresentadas para o reconhecimento de estruturas geológicas e para a identificação de lineamentos (e.g., Sabins, 1997; Gutiérrez Claverol et al., 1988; Brum da Silveira, 2002; Pérez, 2002; Rabaça et al., 2004; Silva et al., 2006; Martín-González et al., 2007). A selecção das composições coloridas utilizadas no presente trabalho baseou-se, para além dos valores do OIF, nestes estudos prévios, embora se tenham verificado algumas diferenças nas suas aplicações, em virtude de as áreas de estudo possuírem contextos geológicos distintos, especificamente no que concerne ao tipo de litologia.

Seguidamente, apresentam-se as composições coloridas (imagens compósitas) que foram produzidas para a identificação de lineamentos na área de estudo (Figura 3), tendo em consideração os dados do sensor ETM+. São igualmente listadas as respectivas características, bem como as vantagens e desvantagens na prossecução desse objectivo, que a tarefa da análise visual permitiu identificar.

- 5-4-3 RGB – Foi a que maiores potencialidades ofereceu na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal de densidade variável.

Nestas áreas, os lineamentos destacam-se por apresentar tonalidades de verde mais claras (áreas associadas a concentração de humidade), distinguindo-se nitidamente dos elementos envolventes (Figura 3: 1). Esta composição colorida evidenciou grandes contrastes de cor entre os objectos e, por essa razão, foi considerada

bastante vantajosa na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal.

Nas áreas de rocha nua, a diversidade espectral é mais limitada e, por essa razão, outras composições coloridas afiguraram-se mais vantajosas na identificação de lineamentos.

- 5-7-3 RGB – Foi a composição que melhor se ajustou à identificação de lineamentos em áreas de rocha exposta, em que os lineamentos se destacavam dos elementos envolventes, por apresentarem tons acastanhados, que contrastavam claramente com as tonalidades bege e cinza (maioritariamente) dos afloramentos rochosos (Figura 3: 2) Revelou-se também útil para fazer a distinção na interpretação visual entre lineamentos e caminhos (alvos que apresentam uma forma e uma textura muito similares), nas situações em que a cor era muito parecida noutras composições coloridas. Os caminhos e as estradas são realçados, nesta composição colorida, por cores esbranquiçadas.

Nas áreas com densa cobertura vegetal, revelou-se, contudo, pouco útil, ao contrário de outras composições coloridas.

- 7-4-1 RGB – Revelou grande utilidade na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal, à semelhança da composição 5-4-3. De salientar, contudo, que ofereceu mais vantagens na detecção de lineamentos correspondentes a limites geológicos, uma vez que é utilizada a banda 7, indicada para estudos geológicos e geomorfológicos (Salinero, 2007).

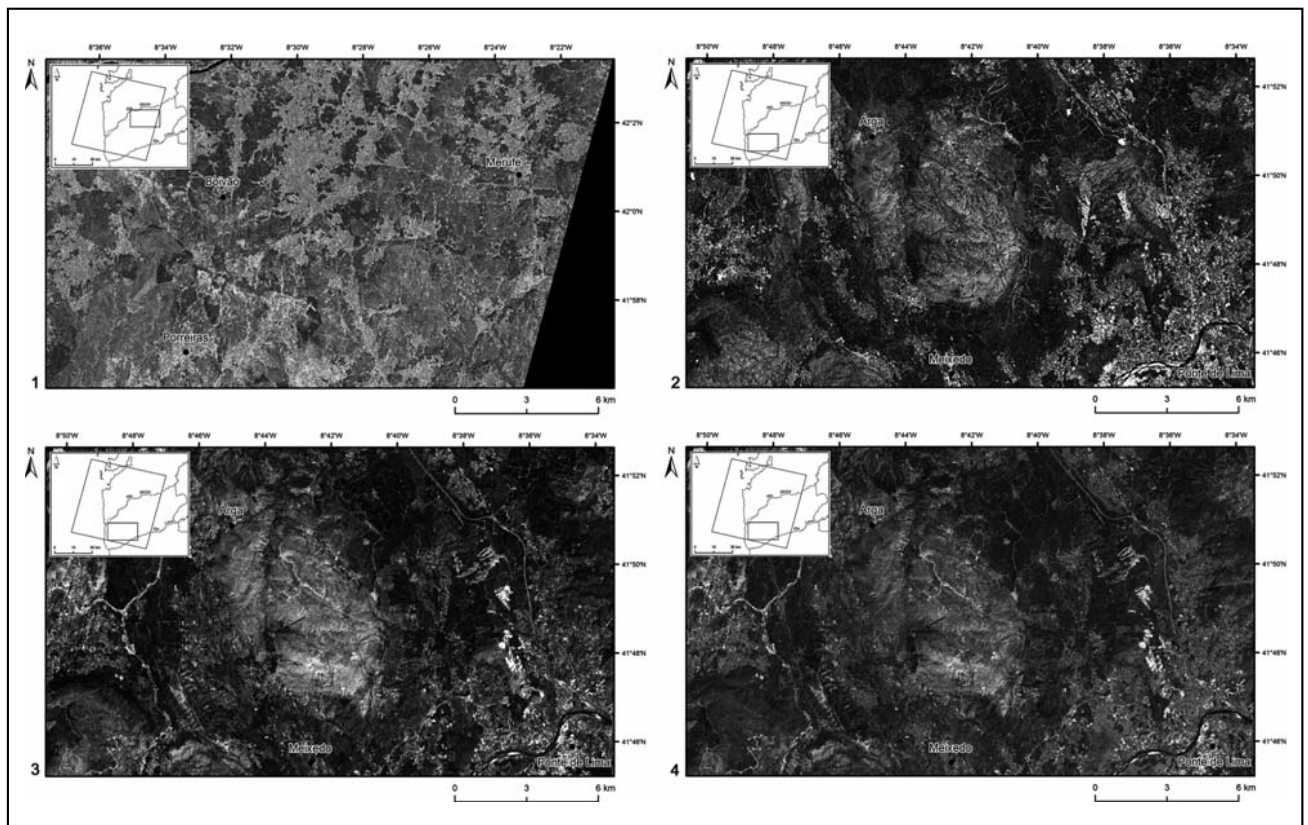


Figura 3. Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional – 1: 5-4-3 RGB (sensor ETM+); 2: 5-7-3 RGB (sensor ETM+); 3: 4-2-1 RGB (sensor HRVIR); 4: 3-2-1 RGB (sensor HRVIR).



- 7-5-4 RGB – Apresenta uma diversidade espectral limitada, por não serem utilizadas bandas do domínio do visível (Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002), pelo que o seu contributo para a identificação de lineamentos foi limitado.

A selecção das composições coloridas respeitantes ao sensor HRVIR foi feita segundo os procedimentos descritos para o sensor ETM+. Foram utilizadas as seguintes composições coloridas:

- 4-3-2 RGB – Composição colorida que se afigurou mais vantajosa para a identificação de lineamentos da área de estudo, especialmente nas áreas com cobertura vegetal. Esta composição colorida é a correspondente à composição 5-4-3 RGB do sensor ETM+, apesar de as bandas espectrais terem intervalos ligeiramente diferentes nos dois sensores, pelo que as características, potencialidades e fragilidades para a consecução do objectivo central deste trabalho são semelhantes.
- 4-2-1 RGB – Permitiu uma melhor diferenciação entre lineamentos e caminhos e estradas, pois estes são realçados por cores esbranquiçadas, enquanto aqueles são destacados por tons acastanhados (Figura 3 : 3).

Esta diferenciação, na interpretação visual da composição 4-3-2, foi mais difícil, pois estes dois tipos de elementos apresentavam, frequentemente, cor semelhante, não obstante ser esta a composição que se afigurou mais vantajosa na identificação de lineamentos.

- 3-2-1 RGB – Revelou-se vantajosa para a identificação de lineamentos nas áreas de rocha exposta. As estruturas lineares destacavam-se por apresentar uma tonalidade avermelhada, que contrastava com as tonalidades acinzentadas dos maciços rochosos expostos (Figura 3: 4).

**E) Critérios de detecção e identificação de lineamentos estruturais**

No caso específico de estruturas geomorfológicas como os lineamentos, estas podem ser reconhecidas visualmente, em fotografias aéreas ou em imagens de satélite, como assinala Brum da Silveira (2002), através da identificação de elementos lineares (traços ou linhas) que se distinguem, por exemplo, através de diferenças na tonalidade, cor, contraste, variações de textura ou de padrões pictóricos de áreas, relacionados, entre outros,

Categorias	Critérios de identificação	Simbologia	Interpretação visual
Informação radiométrica	Brilho	IRb	Os lineamentos destacam-se por apresentarem tons mais claros em relação aos elementos envolventes nas áreas com cobertura vegetal. Nas áreas de rocha exposta, apresentam, geralmente, tons mais escuros.
	Cor	IRc	A cor com que os lineamentos são destacados depende da(s) composição(ões) colorida(s) utilizada(s). Regra geral, nas áreas com cobertura vegetal, surgem com cores mais claras que os elementos vizinhos; nas áreas de rocha exposta, apresentam, usualmente, cores mais intensas.
	Textura	IRt	Os lineamentos são estruturas lineares com uma rugosidade relativamente elevada. Em relação a outros elementos lineares, como estradas e caminhos, possuem uma textura mais grosseira.
Geometria	Forma	Gf	Os lineamentos possuem uma forma rectilínea ou curvilínea, mas menos “artificial” que estradas, caminhos ou outros elementos antrópicos.
	Tamanho	Gt	Alguns lineamentos podem ter um tamanho variável entre alguns e dezenas de quilómetros (Lillesand et al., 2003).
	Continuidade	Gc	Determinados lineamentos foram mais facilmente assinalados pelo facto de apresentarem seguimento, interrompido ou continuado, em vários casos, pelos cursos de água.
	Contexto espacial	Gce	Os elementos lineares presentes em áreas de grande concentração urbana foram desprezados, pelo facto de serem, com muita probabilidade, estradas ou caminhos.
Estrutura geológica	Direcção	EGd	O reconhecimento de determinados lineamentos foi facilitado pelas direcções tectónicas preferenciais da área de estudo, nomeadamente N/S, NNE/SSW, NW/SE e NE/SW.
	Paralelismo	EGp	Determinados lineamentos foram mais facilmente reconhecidos por serem paralelos a outros previamente marcados.
	Continuidade	EGc	Nalguns casos, a continuidade de estruturas geológicas bem diferenciadas, como acontece com alguns contactos litológicos, facilitou o reconhecimento de lineamentos.

Figura 4. Síntese dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos estruturais na área de estudo.

com a diversidade na vegetação, teor de humidade, tipo de substrato rochoso ou composição dos solos.

Face ao exposto, definiram-se duas categorias de critérios para a identificação de lineamentos estruturais na área de estudo (Figura 4): a informação radiométrica e a geometria do lineamento. Relativamente à primeira, os lineamentos foram reconhecidos pelo seu brilho, cor e textura. No que concerne à segunda, foram identificados pela sua forma, tamanho, continuidade e contexto espacial.

Assim, no processo de interpretação visual das imagens de satélite, empregaram-se critérios de identificação similares aos da foto-interpretação clássica (Salinero, 2007). Estabeleceu-se, ainda, uma terceira categoria para a identificação destas estruturas lineares, denominada estrutura geológica, em que os lineamentos foram reconhecidos pela sua direcção, paralelismo e continuidade (Feio & Brito, 1949; Keller & Pinter, 1996).

#### F) Marcação de lineamentos geo-estruturais: uma metodologia

O processo de vectorização de lineamentos consubstanciou-se nos critérios de detecção e identificação caracterizados anteriormente e foi realizado no programa ArcGis 9.2, por análise visual sobre imagens expostas no monitor, segundo o esquema da Figura 5. Numa primeira fase, marcaram-se todos os lineamentos detectados e reconhecidos nas imagens compósitas do sensor HRVIR, às quais foram aplicadas as técnicas de melhoramento da qualidade visual descritas anteriormente (melhoria do contraste tonal e do contraste espacial).

A vectorização foi realizada sobre as imagens ampliadas até à escala 1/50000, estipulada como limite máximo de análise

visual, atendendo à resolução espacial proporcionada pelo sensor e à consequente perda de inteligibilidade dos dados (Salinero, 2007). As imagens utilizadas nesta primeira fase foram as do sensor HRVIR, pelo facto de este possuir excelente precisão geométrica, superior à do ETM+. Os lineamentos marcados nestas imagens foram, depois, complementados com os lineamentos vectorizados sobre as imagens compósitas do sensor ETM+, também realçadas visualmente. A escala de análise máxima utilizada para a marcação de lineamentos sobre estas imagens foi a escala 1/100000, por ser considerada, pela Associação Cartográfica Internacional, a escala limite mais idónea para a análise dos dados do sensor ETM+ (Salinero, 2007), em virtude da sua resolução espacial. A inclusão da análise de imagens do sensor ETM+ na marcação de lineamentos, apesar de estas abarcarem a mesma área que as imagens do sensor HRVIR, prendeu-se com o facto de as imagens dos dois sensores terem sido captadas em datas diferentes, com ângulos de elevação e azimutes do Sol distintos, o que possibilitava a identificação e vectorização de lineamentos que nas imagens do sensor HRVIR não eram realçados. Por outro lado, o sensor ETM+ possui um maior número de bandas que o HRVIR, permitindo, assim, a elaboração de imagens compósitas com informação espectral adicional.

Na terceira fase de marcação de lineamentos, complementaram-se os resultados obtidos pelos processos anteriores com os aspectos geomorfológicos realçados pelo mapa de sombreado, ampliado até à escala limite de 1/25000, uma vez que as curvas de nível que serviram de base à construção deste modelo possuíam esta escala. Uma vez que nesta fase se utilizaram escalas de análise mais pormenorizadas, o mapa de sombreado permitiu melhorar a precisão da localização dos lineamentos

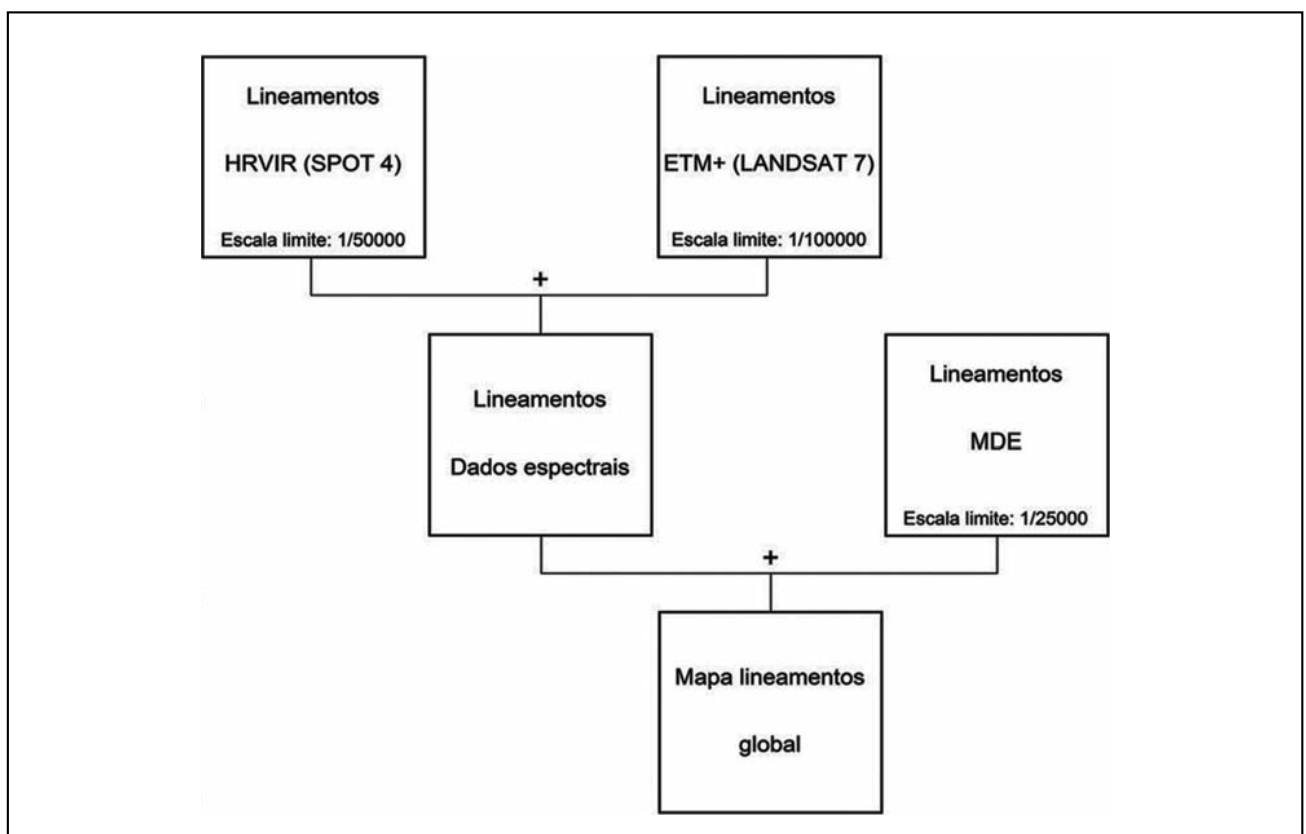


Figura 5. Esquema metodológico seguido na vectorização dos lineamentos.

marcados nas fases anteriores, sobretudo os vectorizados sobre as imagens do sensor ETM+, cujas escalas de análise proporcionavam menor pormenor e, conseqüentemente, menor rigor no seu traçado. Para além da melhoria do traçado cartográfico, o mapa de sombreado possibilitou a vectorização de mais lineamentos, principalmente nas áreas fortemente urbanizadas, em que a interpretação visual sobre as imagens de satélite apresentava, evidentemente, limitações.

A aplicação dos processos e das técnicas de processamento digital descritas anteriormente conduziu à elaboração do mapa de lineamentos estruturais, apresentado na Figura 6. Constatou-

se um predomínio de lineamentos com a direcção NNW-SSE, que parecem estar associados a escarpas de falha (coincidindo com o carácter rectilíneo das vertentes, de direcção NNW-SSE) e ao alinhamento dos afluentes principais, condicionando, nalguns casos, o seu traçado. Neste contexto, convém salientar que estas direcções principais coincidem com as assinaladas na Carta Neotectónica de Portugal para o noroeste do território continental, o que poderá indiciar, considerando a irregularidade do relevo e a frescura morfológica de algumas escarpas, que alguns destes lineamentos se podem relacionar com movimentações tectónicas de Plio-quadernárias (Soares de Carvalho, 1992; Soares, 2007).

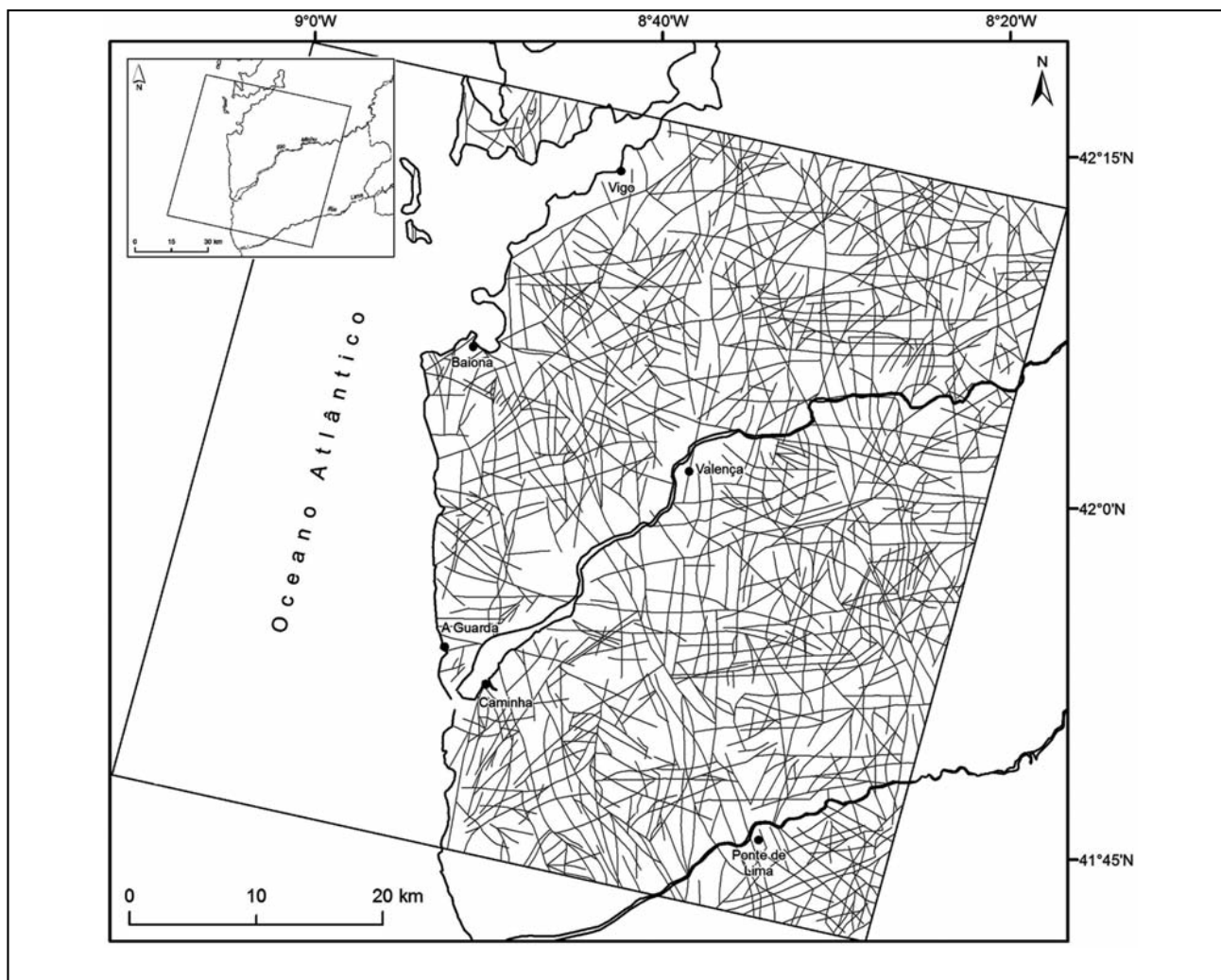


Figura 6. Mapa de lineamentos geo-estruturais para o sector entre a Ria de Vigo (SW Galiza, Espanha) e o Rio Lima (NW Portugal).

### CONCLUSÕES

As técnicas de processamento digital dos dados de detecção remota usadas, ao melhorarem a qualidade visual das imagens brutas, constituíram uma mais-valia na identificação de lineamentos estruturais, permitindo um reconhecimento visual mais expedito destas estruturas lineares. A grande maioria dos lineamentos foi identificada através das imagens do sensor HRVIR, do satélite SPOT 4. O recurso a imagens do sensor ETM+, do satélite Landsat 7, permitiu identificar outros lineamentos, em virtude da maior resolução espectral deste sensor e da diferente data de aquisição dos dados, com ângulo de

elevação e azimute do Sol distintos das imagens do sensor HRVIR, o que possibilitou a identificação de lineamentos que, nestas imagens, não eram detectados.

A interpretação dos aspectos geomorfológicos realçados no mapa de sombreado obtido a partir do MDT possibilitou um acréscimo de lineamentos ao total obtido pelos processos anteriores. Apesar de se ter verificado uma elevada coincidência entre os lineamentos vectorizados sobre as imagens de satélite e a morfologia evidenciada no mapa de sombreado, este último processo afigurou-se extremamente vantajoso na identificação de lineamentos estruturais em áreas urbanizadas, onde

a interpretação visual sobre as imagens de satélite apresentava, evidentemente, limitações. Por outro lado, ao possibilitar escalas de análise mais pormenorizadas, permitiu melhorar a precisão da localização de lineamentos estruturais previamente marcados através da análise dos dados espectrais. Por sua vez, alguns dos lineamentos obtidos pela análise visual das imagens de satélite não eram detectados no mapa de sombreado, especificamente em áreas aplanadas ou com pouca irregularidade altimétrica. O cruzamento de dados espectrais e altimétricos para a consecução do objectivo essencial deste trabalho revelou-se, desta forma, bastante útil, na medida em que as limitações de qualquer um desses processos foram compensadas pelas vantagens do outro.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o apoio da Agência Espacial Europeia (ESA), através do projecto *HydroSPOT* (FLUP/Labcarga|ISEP/USC-ESA|ID5750). HIC recebeu apoio parcial pelo projecto PEst-C/CTE/UI4035/2011-2012 (GeoBioTec|UA). As trocas de impressões com os colegas Alcides Pereira (FCT|Universidade de Coimbra), Laura Soares (FL|Universidade do Porto), José Teixeira (GeoBioTec|Universidade de Aveiro), Paulo E. Fonseca (FC|Universidade de Lisboa) revelaram-se muito úteis. Agradecem-se, por fim, todos os comentários dos revisores e da direcção da revista.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- ARAÚJO, M. A. e PÉREZ ALBERTI, A. (1999).  
Os meios geográficos no noroeste peninsular. *Geografia do Eixo Atlântico. Universidade de Santiago de Compostela*, pp. 137-200.
- BLANCHARD, J. P., COTTARD, F., ARRIBAS, A., GAGNY, C. I., OVEJERO, G., SANTIAGO, L. E. SERVAJEAN, G. (1979).  
Étude de la distribution des gîtes métallifères par l'interprétation photosatellite associé & l'autocorrélation optique: application aux gisements de Sn-W du NW de la Péninsule Ibérique. *7e. Reun. An. Sc. Terre, Lyon, SGF*, pp. 58.
- BRUM DA SILVEIRA, A. P. (2002).  
Neotectónica e sismotectónica de um sector do Alentejo oriental. *Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 339 pp.
- BRUM FERREIRA, A. D. (1983).  
Problemas da evolução geomorfológica quaternária do noroeste de Portugal. *Cuadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe*, 5: 311-332.
- CARVALHO, D. (1978).  
Lineament patterns and hypogene mineralization in Portugal. *Estudos Notas e Trabalhos do Serv. Fom. Min.*, 23: 91-106.
- FEIO, M. e BRITO, R. S. (1949).  
Les vallées de fracture dans le modelé granitique portugais. *Comptes Rendus du Congrès International de Géographie, UGI, Lisboa*, pp. 254-262.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M., LUQUE, C., MARTÍNEZ-GARCÍA, E., RUIZ, F. e SUÁREZ, V. (1988).  
Los lineamientos deducidos de imágenes de satélite de las Zonas Cantábrica y Asturoccidental Leonesa (NW de España). *Est. Geol.*, 44 (3-4): 263-270.
- KELLER, E. A. e PINTER, N. (1996).  
Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape. *Prentice Hall, New Jersey*, 338 pp.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. e CHIPMAN, J. W. (2003).  
Remote sensing and image interpretation. *John Wiley & Sons, Nova Iorque*, 704 pp.
- MATHER, P. M. (2006).  
Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. *John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex*, 324 pp.
- MARTÍN-GONZÁLEZ, F., CARREÑO CONDE, F. e PABLO, M.A. DE (2007).  
Aplicación de imágenes Landsat (TM y ETM+) en estudios geoestructurales en el NO del Macizo Ibérico. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, Coruña*. 32: 47-62.
- PÉREZ-ALBERTI, A., GOMES, A., PINHO, R. e LOPEZ-BEDOYA, J. (2009).  
The structural control on the dynamics of coastal granite (NW of the Iberian Peninsula). *Abstracts 7th International Conference on Geomorphology, Melbourne*.
- PINHO, R., GOMES, A. e CHAMINÉ, H. I. (2008).  
A utilização de técnicas de detecção remota na identificação de lineamentos com potencial interesse morfoestrutural no NW português. *In: Resumos do IV Congresso Nacional de Geomorfologia, Braga, Portugal*.

- PINHO, R., GOMES, A. E CHAMINÉ, H. I. (2009).  
A detecção de lineamentos estruturais mediante a interpretação de imagens dos satélites LANDSAT e SPOT: um estudo comparativo aplicado ao Norte de Portugal.  
*Resumos do VII Congresso da Geografia Portuguesa, Ass. Portg. Geógr., Coimbra, p. 65.*
- RABAÇA, T. J. L., CONDE, L. N., PINTO, A. F. F. E PEREIRA, A. J. S. C. (2004).  
Avaliação das potencialidades de técnicas de detecção remota como suporte à cartografia geológica na região central de Portugal.  
*Revista electrónica de Ciências da Terra: 1-14.*
- SABINS, F. F. (1997).  
Remote sensing: principles and interpretation.  
*Waveland Press, Inc., Long Groove, 494 pp.*
- SALINERO, E. C. (2007).  
Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio.  
*Editorial Ariel, Barcelona, 586 pp.*
- SILVA, S., CARANOVA, R., CABRAL, J. E COSTA, A. M. (2006).  
Análise e interpretação de imagens de satélite Landsat TM 5 da região Norte de Portugal Continental, VII Congresso Nacional de Geologia. Universidade de Évora, Pólo de Estremoz da Universidade de Évora, pp. 1133-1136.
- SOARES, L. (2007).  
A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal.  
*Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 850 pp.*
- SOARES DE CARVALHO, G. (1992).  
Depósitos quaternários e cenozóico indiferenciado.  
*In: Pereira, E. (Coord.), Carta Geológica de Portugal na escala 1/200 000. Notícia Explicativa da Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 47-50 pp.*
- TEIXEIRA, C. (1944).  
Tectónica plio-pleistocénica do noroeste-peninsular.  
*Boletim da Sociedade Geológica de Portugal, 4 (I-II): 19-40.*



# Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas

## Geotechnical treatment of "Ramal H" dam, Tandil through cementitious injections

Giaconi, Luis Mario <sup>1</sup> ✉ - Flores, Roberto M. <sup>2</sup> - Giaconi, Mario Nicolás <sup>3</sup>

Recibido: 17 de Marzo de 2012 • Aceptado: 10 de Octubre 2012

### Resumen

*El presente trabajo trata sobre los aspectos geológicos y geotécnicos del macizo rocoso sujeto de la fundación de la presa del Ramal H sita en Tandil, Provincia de Buenos Aires, y el tratamiento de mitigación geotécnica aplicado mediante inyecciones cementíceas.*

*El área de influencia de la presa abarca la cuenca hidrográfica del arroyo que desemboca precisamente en el denominado Ramal H, desagüe pluvial entubado, siendo que las nacientes de la cuenca se ubican dentro del cordón serrano que domina el área (Sierras de las Animas), hacia la zona oriental de la ciudad.*

*La presa posee una longitud de 160 m y una altura sobre su fundación de 18,60 metros, siendo el objetivo de su construcción la laminación de crecidas extraordinarias que anegan los barrios del sector oriental de la ciudad.*

*La misma se proyectó a gravedad en hormigón sobre un macizo rocoso de características geotécnicas heterogéneas, utilizándose para la mitigación de dichas condiciones el método de inyección GIN. El resultado final del tratamiento, a través de la inyección de 340,04 toneladas de cemento mediante la ejecución de 11,968 metros de taladros, se visualiza en los testigos de roca obtenidos en perforaciones de control con la presencia efectiva de lechada fraguada en las discontinuidades y absorciones de agua menores o iguales a 1 UL (Unidad Lugeon), muy excepcionalmente 3 Unidades Lugeon, en sectores donde los ensayos Lugeon previos arrojaron absorciones mayores a 10 UL llegando a máximos de 75 UL, todo lo cual corrobora la efectividad del método empleado.*

**Palabras Clave:** Presa - fundación - macizo rocoso - homogeneización - inyecciones cementíceas.

### Abstract

*This paper discusses the rock mass geotechnical conditions for the foundation of the dam H Branch located in Tandil, Buenos Aires and the geotechnical mitigation treatment applied by cement slurry injections.*

*The area of influence of the dam includes the watershed of the*

<sup>1</sup> Cátedra de Geología Aplicada, FCNyM, UNLP

✉ [imgiaconi@gmail.com](mailto:imgiaconi@gmail.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP - UTN, Regional La Plata

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP

stream which flows precisely in the so-called "H branch", a piped storm drain. The headwaters of the basin are located within the cord mountain that dominates the area ("Sierra de las Animas"), to the east of the city.

The "H branch" Dam has a length of 160 m and a height above its foundation of 18.60 m, being the objective of the dam the lamination of extraordinary floods that inundate the eastern suburbs of the city.

The dam was projected to a concrete gravity dam above the rock mass with dissimilar geomechanical and hydraulic characteristics, the method used to mitigate these conditions was the GIN injection method. The end result of the treatment, through the injection of 340.04 tons of cement through the execution of 11,968 meters of drilling, is visualized in the witnesses of drilling rock, obtained in after control perforations, the actual presence of grout forged in the discontinuities and water absorptions less than or equal to 1 UL (Lugeon Units), very rarely a value of 3 Lugeon Units, in sectors where previous Lugeon tests threw absorptions values greater than 10 UL reaching peak values of 75 UL., all of which confirms the effectiveness of the used method.

**Keywords: Dam - foundation - solid rock - homogenization - cement slurry injections**

## OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es comunicar los aspectos geológico-geotécnicos del macizo rocoso sujeto de la fundación de la Presa del Ramal H en la Ciudad de Tandil, Provincia de Buenos Aires, y el consecuente tratamiento geotécnico ejecutado mediante inyecciones cementíceas a los fines de homogeneizar las heterogéneas características geomecánicas e hidráulicas del substrato de apoyo.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS

La geología del sitio se encuentra integrada por una cubierta de materiales sueltos compuesta por suelos orgánicos, depósitos sedimentarios fluviales y eólicos y materiales friables de origen antrópico por lo que, dadas las características geotécnicas determinadas, el espesor y la disposición de los materiales de cobertura, los mismos fueron excavados mecánicamente hasta el techo de roca a los fines de la fundación de la obra que nos ocupa.

Subyace a estos materiales un macizo rocoso compuesto por rocas del Basamento Cristalino Precámbrico. Litológicamente, en corte delgado, constituyen rocas granudas, milonitas de composición tonalítica y rocas microgranudas, milonitas de un protolito aplítico o granítico, de grano fino. Macroscópicamente, las rocas dominantes en el área de fundación son granitoides, gneises gris verdosos de composición tonalítica que han sido intruidos por rocas de origen pegmatítico de grano muy fino, de color rosado.

En el análisis del grado de la alteración, se detectaron cuatro formas de ocurrencia dentro del modelo geológico de macizo rocoso determinado para la fundación de la presa. Las mismas serán descriptas más adelante, en el análisis litoestructural del macizo.

La estructura regional del macizo rocoso responde a la existencia de una amplia zona de fajas ultramilonitizadas de orientación E-O (Dalla Salda et al., 2006). Consecuencia de la reactivación geodinámica de los antiguos planos estructurales correspondientes a las fases deformacionales producidas desde el Ciclo Transamazónico, la situación estructural se resume según tres orientaciones claramente definidas constituyendo los Dominios Estructurales A, de orientación E-O; B, de orientación NE-SO y C, de orientación NO-SE (Teruggi y Kilmurray, 1980) que se sintetiza en el sitio de la presa de la siguiente manera:

- a) Se visualiza una distinta morfología en ambas márgenes. La izquierda posee una tendencia a la concavidad mientras que la derecha existe tendencia a la convexidad. El cuadro lito-estructural y la diferente disposición y respuesta de las rocas resultantes a la degradación explican las tendencias descriptas.
- b) El cuadro estructural detectado reconoce cuatro familias de discontinuidades a nivel superficial y subsuperficial. Tres de ellas, de orientaciones generales coincidentes con las de los dominios estructurales A, B y C, poseen inclinaciones que varían desde subvertical hasta 30° y la restante es subhorizontal (< 15°).
- c) Las estructuras de cizallamiento son de rumbo subparalelo y de rumbo diagonal al eje de la presa y afectan directamente a la fundación de la presa en ambas márgenes. Corresponderían a líneas estructurales de envergadura mayor, de espesor variable y longitud no detectable pero, por inferencia, extensos. Consecuente con ello, existen evidencias de lajosidad y arenización en margen derecha, en el estribo y en los sondeos a medio faldeo, en margen izquierda a medio faldeo y en el estribo; y en la zona central de la presa coincidente con la vía fluvial del ramal H.
- d) Respecto a las estructuras cortantes de falla son contrastantes en margen derecha y margen izquierda. Mientras en la primera toda una zona de falla o de corte con intensa microfisuración recorre el empotramiento en forma diagonal al mismo siguiendo una orientación desfavorable a los fines de la estabilidad de la presa (progresivas 110 m a 150 m), en la margen izquierda mayormente predomina un macizo fracturado en menor magnitud habiéndose detectado evidencias de falla a medio faldeo (progresivas 45 a 70 m aprox.) y en las cercanías del sitio de empotramiento como lo detectado en progresiva 24 m.

En margen izquierda se detectó, además, la presencia, si bien en menor magnitud que en la otra margen, de un efecto combinado entre fajas de cizalla de orientación diagonal (E-O) al eje e inclinación subvertical hacia aguas abajo y, en profundidad, fallas de corte, de rumbos no conocidos pero de inferencia diagonal al eje, lo cual también constituye una orientación desfavorable de la estructura respecto al eje y el estribo izquierdo constituyendo potenciales vías preferenciales de circulación de agua en el subsuelo.

Como resultado de los relevamientos realizados fueron identificadas y caracterizadas 2 (dos) zonas litoestructurales generales consecuentes con la litología, grado de meteorización/alteración y estructura (Giaconi, 2009).

La zona litoestructural 1 se caracteriza por la predominancia de los procesos de alteración del macizo en contraposición con la zona 2 donde predominan rocas mayormente frescas, inalteradas a muy poco alteradas.

Espacialmente la zona 1 se presentó, en líneas generales, subsuperficialmente paralela pero varió su espesor de acuerdo a la ocurrencia local de los modelos de alteración, por lo que la zona 2 se encontróa veces inmediatamente subyacente, a mayor o menor profundidad, y otras veces de manera lateral, poniendo en contacto neto en ambos casos rocas frescas con rocas muy alteradas. La casuística de tal condición fue localmente aleatoria, cuestión a la que no es ajena la larga historia geológica del Basamento Cristalino en la región.

Las características de cada zona se resumen de la siguiente manera:

- **Zona Litoestructural 1 (ZLE1):** Responde a tres formas de alteración de las cuatro descritas en el macizo:
  - a) Zona meteorizada paralela a la superficie del terreno y a la roca no alterada (Figura 1).



Figura 1. Detalle del material rocoso aflorante en la margen derecha (ZLE1). Se observa alteración y con precisión las características del complejo diaclasamiento superficial del milonitizado Basamento Cristalino, característico en toda el área de estudio.



Figura 2. Zona de cizalla en margen izquierda, grado de alteración A4 - A5 (ZLE1) en afloramientos de rocas gneissicas levemente meteorizadas (ZLE2)

- b) La zona alterada se ubica entre discontinuidades. La alteración se produjo a expensas de las zonas fracturadas de inclinación vertical a subvertical. Se presenta como zonas alteradas de espesor reducido que se ubican entre rocas de menor alteración y que han dejado importante material intersticial de zona fracturada, brecha, microbrecha, etc. Se distribuye en toda el área de la presa.

- c) Variante de la anterior pero de mayores dimensiones. Corresponde a la alteración en zonas de cizallamiento (lajosidad y arenización) o de intenso fracturamiento superficial. Rocas alteradas de manera intensa, como mínimo tipo A4 (Dearman, Sergeev y Shibakova, 1989) en los niveles superficiales del macizo presentando subsuperficialmente intensa lajosidad. Se encuentra en margen derecha e izquierda ligado al empotramiento de los estribos y en el subsuelo de la fundación del cuerpo principal de la presa que es precisamente por donde corre la vía fluvial del ramal H (Figura 2).

- **Zona Litoestructural 2 (ZLE2):** Responde a la forma de alteración 4 mencionada: Roca masiva con bajo grado de alteración o no alterada (fresca), exceptuando fallas localizadas. Subyace a la forma de alteración 1 de la ZLE1 y, en ocasiones, se encuentra interceptada vertical y subverticalmente por las formas de alteración 2 y 3 de la ZLE1 anteriormente descritas.

Esta zona ZLE2 ha sido detectada en todas las perforaciones, a distintas profundidades en todo el área de fundación constituyendo rocas frescas o débilmente alteradas, A1 o A1-A2 (Dearman, Sergeev y Shibakova, 1989), con cristales brillantes, observándose en general una leve decoloración del macizo en las paredes de los planos de discontinuidad. Litológicamente son gneises gris verdosos (Figura 3) y pegmatitas aplíticas rosadas (Figura 4). La presencia de estas últimas se detectó mayormente en margen derecha aunque fueron observadas también en margen izquierda en menor grado y en el sector de aguas abajo del área de fundación en el área central de la presa.

En esta ZLE2, las orientaciones de las discontinuidades dominantes respecto al eje de la presa (azimut N40°) guardan una relación desfavorable respecto a la estabilidad de los estribos y cuerpo central de la presa toda vez que las mejor caracterizadas poseen una disposición subparalela o diagonal al eje coincidentes con los dominios estructurales mencionados (mayormente N30° a N300°, llegando a extremos de N90° a N270°)



Figura 3. ZLE2. Sondeo S2 en margen izquierda. Testigo de gneis tonalítico, grado de Alteración A1 a A2



con planos de inclinación subverticales, > 60°, 45°, 30° y hasta < de 15°, orientados indistintamente hacia aguas abajo y hacia aguas arriba del eje de presa.

En términos generales, la ZLE2 constituye las rocas objeto de la fundación.



**Figura 4. Sondeo S7 en el estribo de margen derecha. Testigo intrusivo aplítico milonitizado, de color rosado, grado de alteración A<sub>1</sub>**

#### Determinaciones geotécnicas de campo - Síntesis

En función de las 12 perforaciones ejecutadas como parte de los trabajos de campo durante la etapa de proyecto y de acuerdo a la zonificación litoestructural realizada, en la ZLE1 se verificó mayormente la presencia de rocas de alteración A4 a A6 por lo que, entre otros parámetros, el RQD (Rock Quality Design) no resultó evaluable. Sin embargo, existieron también áreas subsuperficiales muy fracturadas, donde la alteración y el grado de fracturamiento, de orientación desfavorable, no alcanzaron la magnitud extrema de lo mencionado anteriormente, poseyendo separación de las discontinuidades que variaron entre 0,06 m - 0,2 m y < 0,06 m o brechosa dando como resultado RQD de valores muy bajos a valores 0 (cero), siendo por lo general muy permeables con valores Lugeon muy altos. Giaconi (2009 y 2011).

La zona ZLE2 presentó rocas duras, gneises y pegmatitas aplíticas, de peso específico general entre 2,6 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>, poco meteorizadas a frescas, algo fracturadas donde si bien las orientaciones estructurales fueron relevadas de manera desfavorables respecto a la estabilidad de estribos y/o circulación del flujo subterráneo, las matrices rocosas en cuanto al grado de alteración mayoritariamente fueron A1 a A1-A2, cuestión de importancia respecto a la posibilidad de mejoramiento de las condiciones mecánicas e hidráulicas del macizo por tratamiento mediante inyecciones.

En gran parte, aunque existieron excepciones como en las pegmatitas aplíticas de margen derecha (RQD < 25 %), se determinó para esta zona 2 un valor de RQD superior al 75 % con valores modales en 90 a 100 % siendo que las separaciones de las discontinuidades se presentaron por lo general superiores a 0,6 m. con diaclasas cerradas o con muy baja apertura (< 0,1 mm.), rugosas, por lo general sin relleno (excepto en zonas localizadas de fallas o, de manera eventual, en las pegmatitas aplíticas muy fracturadas de la margen derecha: presencia de relleno de arcilla) y donde los planos o paredes de las diaclasas no presentaron alteración o la poseyeron en grado ligero. Los valores de los ensayos Lugeon resultaron bajos a muy bajos, incluso sin

admisiones a excepción de las zonas localizadas de falla y en las pegmatitas aplíticas del estribo de margen derecha donde los valores fueron altos a muy altos (Giaconi, 2009). Cabe destacar que muchas veces no existió correspondencia entre la fisuración relevada de los testigos extraídos en las perforaciones y los valores de absorción de agua de los ensayos Lugeon (Flores y Giaconi, 2010). Finalmente, se obtuvieron numerosas muestras de testigos en zonas de interés geotécnico y se enviaron a laboratorio para realizar ensayos a los fines de conocer los valores de resistencia uniaxial y módulo de deformación con el objeto de clasificar al macizo (Giaconi, 2009 y Flores y Giaconi, 2010)

#### CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

Se exponen a continuación breves comentarios conceptuales respecto a los parámetros geotécnicos de caracterización del macizo. El análisis detallado ha sido publicado en el Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) en 2010 (Flores y Giaconi, 2010).

##### Clasificaciones Geomecánicas

Se consideraron tres clasificaciones geomecánicas de uso habitual en Mecánica de Rocas. Son ellas las que se expresan como los índices RMR, Q y GSI.

La clasificación que asigna al macizo rocoso un índice denominado RMR (Rock Mass Ratio) ha sido desarrollada en el Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) de Sud África (Bieniawski, 1979). Si bien esta clasificación tiene su origen en el estudio y predicción de comportamiento de macizos rocosos asociados a obras subterráneas está plenamente difundido su uso para la evaluación de obras en superficie como es nuestro caso. En la misma se utilizan como parámetro de evaluación: la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el RQD, la valoración de la separación entre discontinuidades, el estado de las mismas y la valoración respecto a la presencia de agua. Finalmente se corrige la clasificación por la influencia de la orientación de las discontinuidades respecto a la orientación de las obras.

El índice Q (Rock Tunnelling Quality Index) ha sido desarrollado en el Norwegian Geotechnical Institute (Barton, Lien y Lunde, 1974). El índice tiene la siguiente expresión:  $Q = (RQD/J_n) (J_r/J_a) (J_w/SRF)$ , siendo  $J_n$  un parámetro que evalúa la cantidad de familias de discontinuidades,  $J_r$  la rugosidad y  $J_a$  el grado de alteración de las discontinuidades,  $J_w$  un parámetro que evalúa la acción del agua y SRF un parámetro que tiene en cuenta la influencia del nivel de tensiones en el macizo. Se debe puntualizar que esta clasificación es específica para el diseño de sostenimiento en túneles. Sin embargo se la presenta como un indicador más sobre el comportamiento del macizo.

Finalmente el índice GSI (Geological Strength Index). Tiene como parámetros el tipo de macizo rocoso atendiendo a su fracturación y la condición de las superficies de las discontinuidades. En nuestro caso este índice fue considerado sólo como referencia a partir de la relación conocida con el índice RMR ( $GSI = RMR - 5$ ).

##### Tensiones Admisibles

La adopción de las tensiones admisibles en el macizo rocoso fue realizada a partir de criterios de evaluación reconocidos en los que se adoptan distintos parámetros geomecánicos. El análisis detallado de las mismas ha sido publicado en CAMSIG 2010 (Flores y Giaconi, 2010) por lo que sólo se mencionarán aquí los criterios utilizados en la adopción de dichos valores.

Uno de los criterios más reconocidos es la vinculación de la tensión admisible con la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Esta recomendación es particularmente válida con diaclasamiento vertical a subvertical. Para una condición más general (con diaclasamiento con orientación variable) muchos reglamentos reducen el valor de la tensión admisible a  $\sigma_{adm} = 0,2 q_u$  (siendo  $q_u$  el valor de la resistencia a compresión simple) (Peck, Hanson y Thornburn, 1982).

Otro de los criterios de aplicación es el que considera la influencia de la fracturación como un limitante de las deformaciones esperables, adoptando valores de tensiones admisibles a partir de la evaluación del RQD. En nuestro caso este criterio es el que proporciona el valor más bajo de la tensión admisible dados los valores de RQD observados. No obstante se debe puntualizar que según esta recomendación el mínimo valor de tensión admisible a considerar es de 1 MPa. (Peck et al, 1982).

El tercer criterio considerado fue el de valorar la resistencia del macizo rocoso ante un estado triaxial de tensiones con la presión de confinamiento limitada a la resistencia a la compresión simple de la roca. En este caso se adoptaron como parámetros de corte del macizo a los que surgen de la clasificación del CSIR comentada anteriormente (valor de RMR). Para esta teoría se adoptó un Factor de Seguridad igual a 5. Este tipo de rotura aparece como la que mejor se ajusta al comportamiento esperable, aunque cuenta con la dificultad en la estimación de la resistencia del macizo ante un estado triaxial que como se dijo se obtuvo de una estimación empírica a partir de la clasificación del mismo. (Goodman, 1989; Suarez, 1985).

**Módulo de Deformabilidad**

A partir de los datos de clasificación del macizo rocoso se pudieron obtener valores del módulo de deformabilidad utilizando fórmulas reconocidas en la bibliografía internacional.

Del análisis de las mismas surge que la aplicación de la expresión (1) (Höek y Diederichs, 2006) brinda valores que resultan aproximadamente un promedio del conjunto analizado y pueden ser adoptados como referenciales para la estimación del módulo de deformabilidad del macizo.

$$E_{mr} = (0,02 + ((1-D)/2) / (1 + e^{((60+15D-GSI)/11)})) \quad (1)$$

Dónde:  $E_{mr}$  = Módulo de Deformación del Macizo Rocosos [GPa]; GSI = Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index) y D = Factor de Perturbación Mecánica (Disturbance Factor).

La aplicación de este criterio permitió zonificar con criterio geotécnico a lo largo de la traza y adoptar valores de cálculo del módulo de deformabilidad (Flores et al, 2010).

**Resistencia al Corte**

A los efectos de recomendar parámetros de cálculo para el análisis de estabilidad de la presa se consideraron, con criterio conservador, las recomendaciones de Bieniawski (Bieniawski, 1989).

**Permeabilidad**

La realización de pruebas de agua a presión Lugeon no mostró ninguna vinculación directa con la fracturación de la roca, evaluada a partir de la recuperación RQD. Se observó que no existe ninguna tendencia clara que las vincule (Flores y Giacconi, 2010).

**ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA**

A partir de los análisis de los parámetros geotécnicos descriptos, se confeccionó un perfil longitudinal simplificado en el que se han zonificado los parámetros de interés. La Figura 5 muestra tal zonificación.

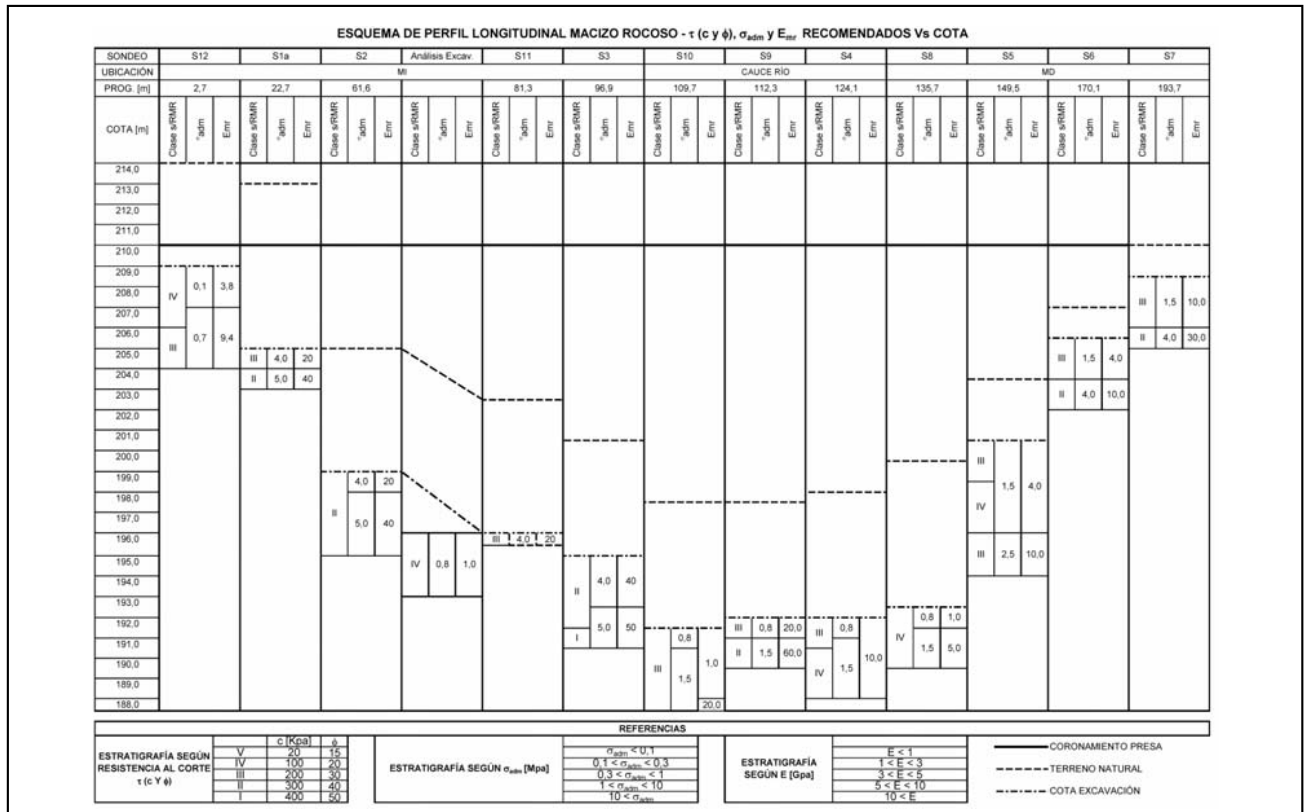


Figura 5. Zonificación geotécnica – Esquema del perfil longitudinal

En conclusión, la investigación geotécnica llevada a cabo a partir de reconocimientos de geología de superficie, rozas y calicatas manuales y 12 sondeos ejecutados durante la etapa del proyecto de detalle mostró un macizo heterogéneo desde el punto de vista de sus propiedades geotécnicas.

La heterogeneidad observada es producto de procesos de fracturamiento y alteración diferencial y significó un difícil escollo en el momento de realizar las recomendaciones sobre los parámetros de cálculo para el diseño de la presa.

Se dispuso de suficiente cantidad de datos por lo que se desarrollaron análisis estadísticos de las distintas variables que intervienen en las clasificaciones geomecánicas más usuales (RMR, Q y GSI). Esto permitió desarrollar un esquema de parámetros de cálculo como el que se muestra en la Figura 5.

El proceso de construcción permitió observar más exhaustivamente las características del macizo y ajustar el esquema de recomendaciones para el análisis de la presa.

La observación del fondo de excavación permitió detectar que, entre las progresivas 80 m a 110 m y 120 m a 145 m, se presentó en aproximadamente la mitad de aguas arriba roca de superior calidad y, en espesores variables entre 2 m y 5 m en la mitad de aguas abajo, un macizo rocoso de calidad inferior.

Asimismo, en los sectores de presa comprendidos entre las progresivas 62 m y 80 m en la margen izquierda, se detectó un sector con condiciones geotécnicas sensiblemente inferiores a las encontradas en los sondeos de investigación previamente ejecutados. En este lugar, como así también entre las progresivas mencionadas en el párrafo anterior, se realizaron labores de investigación complementaria (perforaciones adicionales y ensayos de laboratorio de mecánica de rocas) a efectos de tomar eventuales medidas correctivas (Figura 6).

Como ocurre en general en este tipo de obra, el proceso de investigación geotécnica es dinámico y recibe retroalimentación durante el período de obra, ajustándose las conclusiones a medida que se cuenta con información más detallada.

En la Figura 7 se presenta un resumen de las recomendaciones ajustadas finalmente a las condiciones de obra.

## TRATAMIENTOS DE CIMENTACIÓN Y CONTROL DE FILTRACIONES - INYECCIONES CEMENTÍCEAS

Dadas las condiciones geotécnicas de la superficie de apoyo, una vez finalizadas las tareas de excavación y saneamiento y construido el hormigón de regularización, se ejecutó el tratamiento geotécnico de mitigación a través de la realización de inyecciones cementíceas de consolidación e impermeabilización como tratamientos de la cimentación y control de las filtraciones en el área del macizo rocoso sujeto a la fundación de la presa. (Giaconi et al., 2011)

### Problemas geológicos y soluciones adoptadas

En fundaciones rocosas como la presente, cabe precisar que la presencia de discontinuidades de gran longitud frente al tamaño de la presa, horizontales o de bajo ángulo inclinando hacia aguas abajo, que eventualmente pudieron encontrarse durante las excavaciones representa a priori un problema geológico-geotécnico de importancia, muy común en rocas duras. Cuando estas discontinuidades se encontraron a escasa profundidad, la solución fue la excavación completa. Cuando así no fue y se encontró en profundidad, se excavaron y rellenaron esas discontinuidades con hormigón H-13 hasta una profundidad determinada durante los trabajos, procediéndose luego a la construcción del hormigón de regularización de la fundación y las consecuentes tareas de inyección.



Figura 6. Progresiva 130 m. Sondeo complementario SC1. Perforación con extracción continua de testigos en el área del pie de presa sobre margen derecha (Actual Bloque 7).

PROGRESIVAS [m]		ROCA TIPO	c [KPa]	$\phi$ [°]	$\sigma_{adm}$ [MPa]	$E_{mr}$ [Gpa]	OBSERVACIONES	
De	A							
0	62	III	200	30	4,0	20		
62	80	IV	100	20	0,8	1	Ajustar con nueva investigación	
80	110	III	200	30	4,0	4	Caso General	
80	110	III	200	30	4,0	4	Mitad Aguas Arriba	Verificación
		IV	100	20	0,8	1	Mitad Aguas Abajo	Particular
110	145	IV	100	20	0,8	1	Caso General	
110	145	III	200	30	4,0	4	Mitad Aguas Arriba	Verificación
		IV	100	20	0,8	1	Mitad Aguas Abajo	Particular
145	189	III	200	30	1,5	4		

Figura 7. Recomendaciones finales, corregidas por observaciones durante la construcción.

### Presencia de fallas y zonas de trituración tectónica

En este caso, y como fue establecido en los sondeos de la investigación, los tratamientos variaron en función de cada problema. En general estas discontinuidades son de escaso espesor y el tratamiento común es la excavación de la zona superficial reemplazando el material saneado por hormigón para luego realizar inyecciones desde superficie. Las zonas de fracturación intensa están asociadas a permeabilidades altas y compresibilidades elevadas con baja resistencia al corte requiriéndose tratamientos de consolidación.

### Presencia de zonas de cizalla

En este caso, y como fue establecido en los estudios previos y fundamentalmente a la luz de la excavación, los tratamientos aplicados fueron la remoción profunda del material cizallado y alterado. En general estas discontinuidades son de mayor espesor y el tratamiento común es la excavación de la zona reemplazando el material saneado por hormigón para luego realizar inyecciones desde superficie.

### INYECCIONES CEMENTÍCEAS

Finalmente se procedió al tratamiento correctivo o de mejoramiento de las condiciones de la fundación de la presa a través de la inyección de lechada de cemento con los siguientes objetivos:

- Reducir las deformaciones
- Aumentar la resistencia
- Controlar las filtraciones y permitir el drenaje

Para ello las medidas adoptadas fueron las siguientes:

*Control de la deformación.* La inyección de consolidación de fracturas mejora las condiciones de deformación del macizo ya que el módulo de deformación depende principalmente de la apertura de fracturas en macizos diaclasados, siendo este tratamiento en general el más apropiado.

*Aumento de la resistencia.* En general, el control de las deformaciones mediante inyecciones cementíneas en macizos rocosos diaclasados conlleva implícito el aumento de la resistencia del mismo. En los casos donde la matriz rocosa se encuentra alterada, el eventual relleno cementíneo de pequeñas oquedades en dicha matriz coadyuva a la ligazón y en consecuencia al incremento resistente.

*Control de la permeabilidad.* Se utilizan inyecciones localizadas. Las altas permeabilidades suelen localizarse en fracturas abiertas.

*Control de las subpresiones.* Mediante pantalla de inyección y drenajes se reducen las subpresiones consiguiendo aumentar la estabilidad de la presa.

### CONSIDERACIONES RESPECTO AL MÉTODO ELEGIDO DE INYECCIÓN

El principio empleado para el control de las inyecciones fue el método GIN (Grouting Intensity Number). El mismo ha sido desarrollado primigeniamente por *G. Lombardi, 1990* y descrito más extensamente por *G. Lombardi y D. Deere, 1993*. Por tal razón se consigna en este documento solamente una descripción general para referencia del lector y la adaptación del método a la obra de referencia.

El método GIN elegido para el control de las inyecciones cementíneas se sostiene bajo la línea argumental que la limita-

ción por intensidad (Número GIN) evita la combinación de presiones elevadas con volúmenes de mezcla o lechada elevados, lo cual significa presiones elevadas actuando sobre grandes superficies. *Lombardi (Lombardi, 2001)*, expresa que "...se elimina de esta manera o por lo menos se reduce substancialmente el riesgo de hidrofracturación y de hidrogateo".

En un macizo rocoso las tareas de inyección afectan tanto las diaclasas de gran espesor como a las máscerradas. En las primeras la solución técnica y económica más aconsejable para limitar el radio de acción de la lechada es utilizar un volumen limitado siendo que para el caso de las diaclasas de pequeño espesor la alternativa más segura para evitar una hidrofracturación, es continuar con la misma lechada pero aumentando la presión delimitando los volúmenes de inyección.

Así el método GIN permite la utilización de presiones altas ya que ello es necesario "*pues la presión máxima de inyección debe ser lo suficientemente alta (2 o 3 veces la presión futura del agua en el sitio, es decir la boca del taladro) como para que al llenar el embalse las fisuras no se abran de nuevo por hidrogateo*" (*Lombardi, 2001*).

De esta manera se definen dos límites claros para la inyección de un macizo rocoso. Ellos son: la *Presión límite* y el *Volumen límite* utilizados en el principio del método GIN.

El GIN utiliza el concepto de *energía específica consumida* que indica que en un tramo de inyección determinado la energía consumida es directamente proporcional al producto de la presión final "p" por el volumen final inyectado "V". Este producto  $p \times V$  es el llamado *Numero de Intensidad de Inyección o GIN*.

Si se grafica el producto  $p \times V$ , se obtiene una curva hiperbólica que junto con la presión y volumen límite componen la curva envolvente de inyección.

El volumen está referido a la longitud del tramo inyectado en litros por metro (l/m) o peso de cemento inyectado, en kilogramos por metro (kg/m) y la presión se mide en Bares. (1 Bar = 1 kg/cm<sup>2</sup> = 100 KNm<sup>2</sup> = 0,1 MPa)

La aplicación del presente método permite que la decisión de la realización de uno o más órdenes de inyección a los efectos de una mitigación efectiva dependa de lo que se denomina Valor Crítico Teórico de Inyectabilidad (VCTI). El mismo se encuentra dado por la ecuación:  $VCTI = 0,5GIN/Presión\ máxima$ .

Es decir, las inyecciones de orden superior (que se intercalan entre los taladros ya inyectados en el orden precedente dependiendo su arreglo geométrico al tipo de inyecciones que se aplica) se realizaron cuando se registró, una vez alcanzada la envolvente del Número GIN, una toma superior a lo calculado mediante la ecuación anterior.

### Control de la ejecución de las inyecciones

Consecuentemente, el método GIN requiere un monitoreo completo por medio de gráficos de computadora entre los que se destacan las curvas de tiempo real de la presión contra el tiempo, de la velocidad de flujo de la lechada contra el tiempo, y del volumen total inyectado contra el tiempo, además de la curva derivada de la penetrabilidad (velocidad de flujo dividida por la presión, q/p) contra el tiempo. Esta última curva es de un valor particular ya que señala el alcance del rechazo de la inyección o por lo menos las absorciones que se van reduciendo.

Para ello el monitoreo de los trabajos de inyección fue realizado mediante el empleo de ordenadores especialmente adaptados para la adquisición, procesamiento, y graficación en *tiempo real* de los datos de inyección y su comparación con el modelo teórico de los autores o el ocasionalmente contrastado en obra. Se utilizó un sistema computarizado integrado por los siguientes elementos: bomba de inyección de lechada cementícea, unidad central de control de presión y caudal de inyección (marca Maquesonda), caballote de inyección compuesto por caudalímetro y sensores de presión, registrador continuo de presión y caudal de lechada, unidad PC, monitor color con impresora para el registro de las curvas GIN en tiempo real y la explotación de los datos de inyección. El sistema permitió controlar a través del monitor de la PC el desarrollo de la inyección en *tiempo real* mostrando la curva característica de la intensidad GIN adoptada, y los gráficos: presión-tiempo, caudal-tiempo, penetrabilidad-tiempo, penetrabilidad-volumen y presión-volumen, y en forma numérica los valores instantáneos de caudal, presión, volumen, presión x volumen, velocidad y tiempo.

#### Características de la Mezcla o Lechada

Se utilizó para la inyección del macizo rocoso una misma mezcla estable que se comporta como un flujo binghamiano con cohesión y viscosidad dinámica, denominada 0,5/1, cuya dosificación final se obtuvo a partir de pruebas de laboratorio dando una relación agua:cemento 0,5:1 + el agregado del 1% en peso de cemento de un superplastificante. Por razones de disponibilidad de mercado, se utilizó cemento compuesto en bolsa denominado CP40.

Se controló la estabilidad de la misma realizando un ensayo cada 2 toneladas de cemento inyectadas. En dicho ensayo se verificó que la decantación a las 2 horas en probeta de 1 litro fuera menor de 5%.

La mezcla utilizada poseyó los siguientes parámetros medios: una cohesión menor a igual 0,2 mm, un tiempo en el cono de Marsh (viscosidad) menor o igual a 34 segundos y una densidad de 1,9 gr/cm<sup>3</sup>.

La resistencia de la mezcla se controló en obra realizando un ensayo cada 5 toneladas de cemento inyectadas. En dicho caso se verificó que la Resistencia a Edad de Referencia  $\geq 15$  MPa y, dado que se utilizó cemento compuesto, se estableció como edad de referencia 30 días.

La lechada elegida posee una densidad alta. Ello se decidió debido a las características relevadas del macizo de fundación con presencia de rocas gneissicas alteradas y zonas de cizalla, existiendo en algunos sectores relleno de arcilla en las fracturas. Por otra parte, dado el complejo geotécnico a ser inyectado, durante la vida útil en el seno de discontinuidades rocosas (diacclas y fallas, fisuras o fracturas en general), la lechada descripta endurecida asegura: a) menor contracción durante el fraguado y con esto una mayor ligazón a lo largo de las paredes de la fisura en la roca y menor riesgo de reapertura. b) mayor densidad y mayor resistencia mecánica debido al mayor contenido de cemento. Con ello subsecuentemente se obtiene una mayor resistencia a la erosión física y a la tubificación. c) menor porosidad, menor permeabilidad y una mayor resistencia mecánica o de liga. Subsecuentemente se obtiene una resistencia química mayor contra la lixiviación y una mayor durabilidad del material inyectado.

#### INYECCIONES - PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En función de las características del macizo, se representó en un plano la ubicación de la malla de taladros primarios tanto para la ejecución de las inyecciones de consolidación como para la ejecución de la pantalla de impermeabilización (Figura 8). La Figura 9 muestra en perfil la pantalla de impermeabilización mientras que en la Tabla 1 se brindan las profundidades adoptadas de los taladros de inyección tanto los de las inyecciones de consolidación como los de la pantalla de impermeabilización. En la determinación de dichas profundidades se tuvo en cuenta lo solicitado en los informes previos (Giaconi, 2009) como se verá más adelante y el relevamiento del espesor del hormigón de regularización de la fundación desde donde se ejecutaron los taladros.

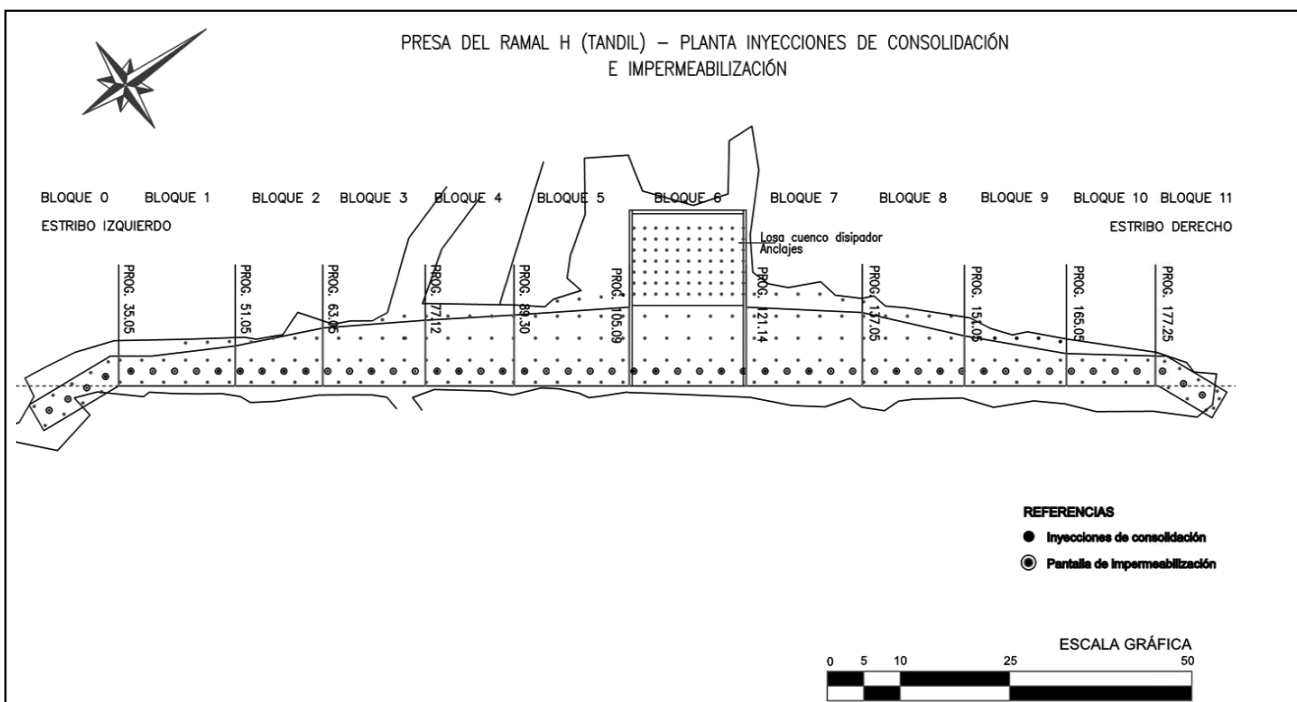


Figura 8. Ramal H - Planta - Plano de inyecciones primarias

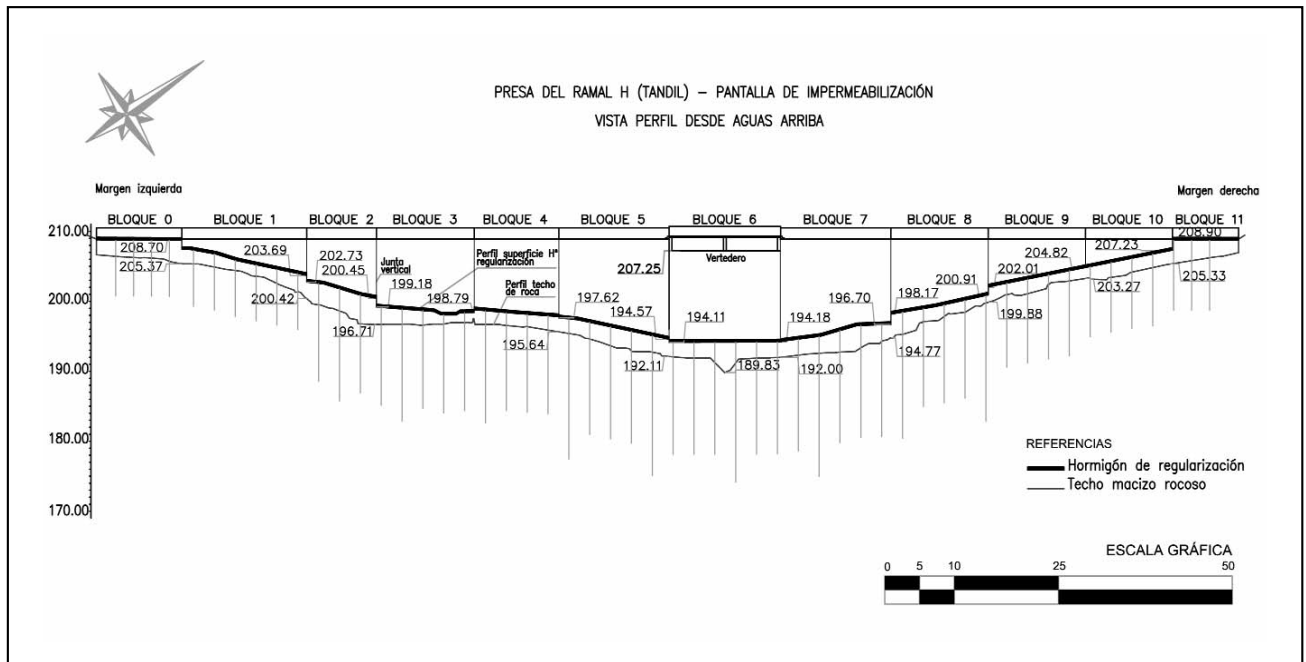


Figura 9. Ramal 11 - Perfil inyecciones primarias

Tabla 1. Profundidades de los taladros de inyección desde el hormigón de regularización

TALADROS INYECCIONES / BLOQUES	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Taladros de Consolidación Profundidad (m)	8	8	10	10	10	12	14	12	12	10	8	8
Taladros de Impermeabilización (orden primario) Profundidad (m)	8	8	16	16	16	20	20	20	18	12	10	10
Taladros de Impermeabilización (órd. subsecuentes) Profundidad (m)	8	8	14	14	14	16	16	16	14	12	10	10

En la Figura 10, se ilustra sobre la heterogeneidad geotécnica descrita en párrafos anteriores mediante el mapeo de la alteración de las rocas (Dearman et al., 1989) en la superficie de fundación a la cual se sobre impuso a escala la malla de taladros primarios de inyección (Giacconi, 2011).

Los taladros de inyección se dispusieron de manera vertical tomando en cuenta la distribución de las discontinuidades y la configuración y dimensión de la presa. Previamente en estereogramas se plotearon los diferentes juegos de diaclasas que se obtuvieron en el mapeo de la superficie de la fundación. Para el caso de la pantalla de impermeabilización, vale indicar que es común configurar los taladros de inyección en forma perpendicular a la superficie del terreno (Weaver y Bruce, 2007). Sin embargo resulta óptimo para la inclinación de discontinuidades entre 0° y 60°, la disposición vertical o, en su defecto, ejecutar los taladros con una inclinación a 60° respecto a la

horizontal ya que se intersecan la mayor cantidad de fracturas posibles (Houlsby, 1990), cuestión no aplicable en nuestro caso.

En ambos tipos de inyecciones, se inyectó de manera ascendente desde fondo de taladro en tramos de longitud decreciente hasta el contacto roca - hormigón de regularización. En este último tramo se inyectó siempre a presiones menores llegando hasta un límite máximo de 10 bares.

**Tratamiento de consolidación - Parámetros**

Estas inyecciones tienen como objetivos específicos homogeneizar el comportamiento del macizo de fundación mejorando las características geomecánicas y, subsecuentemente, la impermeabilidad de la roca de cimentación a profundidades someras, en donde algunas discontinuidades pudiesen estar abiertas y conectadas, sea debido a la calidad intrínseca de la roca o por efecto de las excavaciones mediante voladura.

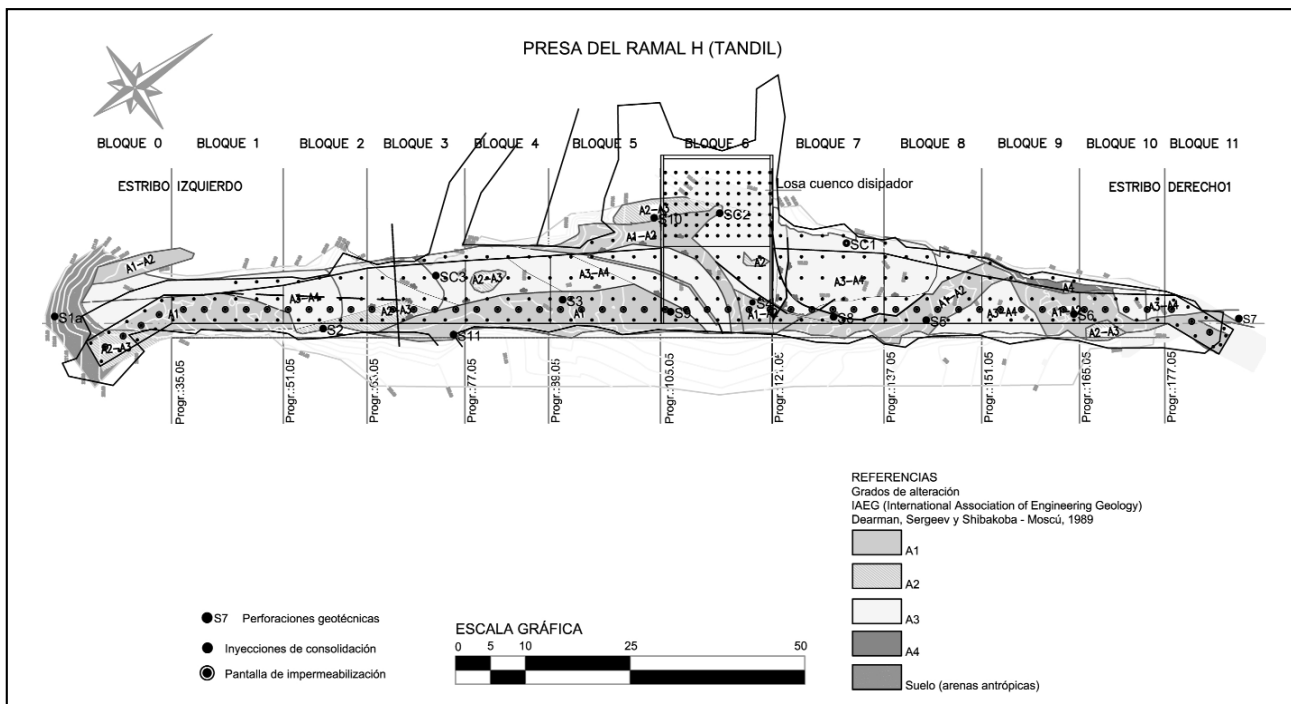


Figura 10. Planta - Plano Relevamiento Geotécnico - Alteración / Planta taladros de inyección primarios.

La malla de inyecciones primarias de consolidación es un arreglo de barrenos dispuestos en filas espaciadas a igual distancia en ambas direcciones. La matriz básica cubrió una zona establecida por dos hileras separadas por 3 metros entre sí, adaptándose dicho espaciamiento en el área de los estribos a las dimensiones de los mismos. La primera fila de las inyecciones de consolidación se dispuso a partir de 0,5 m. aguas abajo de la línea de empate de aguas arriba de la presa. Luego se dispusieron las sucesivas líneas hacia agua abajo dentro del área de la presa disponiéndose finalmente una fila adicional fuera de ella hacia aguas abajo a los efectos de reforzar el tratamiento con el objeto de mitigar posibles deformaciones de la fundación ante requerimientos excepcionales en el pie de presa.

La Figura 11 ilustra sobre el equipo utilizado para la perforación de los taladros de inyección.



Figura 11. Sobre la superficie del hormigón de regularización se observa el equipo de perforación de los taladros de inyección sobre el lateral derecho de la fundación de la presa y personal colocando el sistema de obturación para la inyección de un tramo en un taladro de consolidación.

Por otra parte y respecto a la profundidad de los taladros, en los estudios previos se sugirió profundizar las inyecciones de consolidación hasta cotas inferiores a 184 metros en la zona central de la presa, desde progresivas 110 a 150 m. En ese sector se relevaron fallas cortantes hasta cota 185 m en los sondeos S8 y S4 (ver Figura 10), "...debiéndose tener en cuenta que la presencia de dichas fallas podrá ameritar, incluso, el uso de las inyecciones de "puntada". (Giaconi, 2009).

El GIN determinado para este tipo de tratamiento en función de la parametrización realizada y su ajuste en pruebas de campo de intensidad de inyección ejecutadas previamente al tratamiento definitivo, fue GIN 1000 (intensidad moderada-baja).

Sus parámetros fueron: Presión Máxima: 20 kg/cm<sup>2</sup> - Volumen Máximo: 150 litros/m - Caudal Máximo de Inyección por metro de taladro: 3 litros/minuto - VCTI = 25 l/m.

**Tratamiento de impermeabilización mediante pantalla - Parámetros**

El objetivo de la ejecución de esta pantalla es producir una barrera al paso de los filetes de flujo subterráneo de tal manera de aumentar el recorrido de los mismos y, de ese modo, disminuir el gradiente de permeabilidad por debajo del área de la presa a los efectos finales de mitigar el efecto de subpresión. Su ejecución fue posterior a la ejecución de las inyecciones de consolidación.

Para el análisis de las operaciones de inyección en roca, el uso internacional ha estandarizado a las Unidades Lugeon, más que en un término de volumen de agua admitido en determinado tiempo, en un término de velocidad de ingreso. Así, una Unidad Lugeon es muy aproximadamente igual a 1,2 a 1,4 x 10<sup>-5</sup> cm/seg.

La inyectabilidad del macizo se estima a partir del ensayo Lugeon, según los siguientes criterios:



- 1 Lugeon es el grado de permeabilidad encontrado en aquellas fundaciones casi compactas que no requieren de inyección.
- 3 Lugeons representa una fundación en donde puede llegar a requerirse algo de inyección más, si la presa será de concreto o en donde el agua es tan preciosa o la formación de canales probable, cualquier filtración debe ser detenida.
- 5 lugeons garantiza una inyección extensiva para una presa de concreto o una inyección leve para algunas presas de tierra o de enrocado.
- 10 lugeons ( $1,4 \times 10^{-4}$  cm/seg.) garantiza la inyección para la mayoría de los tipos de presa, siendo 20 lugeons la expresión típica de sitios altamente diaclasados con relativamente poca abertura de diaclasas.
- 100 lugeons ( $1,4 \times 10^{-3}$  cm/seg.) se encuentra en sitios altamente diaclasados con diaclasas relativamente abiertas. Cabe aclarar en este punto que 100 lugeons representa el límite máximo de razonabilidad, de tal manera que admisiones mayores de 100 se registran mejor como "100" que especificando el valor medido. Son tan grandes que su valor exacto no tiene significado.

Enunciadas las pautas de inyectabilidad de un macizo en base a la valoración de los ensayos Lugeon, vale la reflexión que se estima demarca el tratamiento general respecto a la necesidad y características de una pantalla de impermeabilización ya que las consideraciones que se viertan respecto a este tópico *"deberán estar en un acuerdo con las hipótesis de subpresión que fije el proyecto, sobre todo teniendo en cuenta que la presa permanecerá llena sólo unas 24 horas y muy esporádicamente..."* (Giacconi, 2009)

Independientemente de ello, la permeabilidad del macizo rocoso sigue constituyendo, aunque no único como se verá inmediatamente, el aspecto dominante respecto a la pertinencia de la ejecución de inyecciones de impermeabilización. Para dilucidar sobre esta cuestión se analizó específicamente la zona geotécnica 2 por lo que se excluyó del análisis de permeabilidad a las rocas alteradas de la zona geotécnica 1 ya que la misma fue excavada. Para esta evaluación en el caso del ramal H se podría discurrir, de manera equivocada, que los ensayos de presión o absorción de agua tipo Lugeon realizados no habrían demostrado absorciones de gran importancia ya que los promedios indicarían valores bajos. Sin embargo, así como se han registrado valores 0 (cero) de absorción también se han detectado zonas de absorción muy alta por la presencia de discontinuidades en el subsuelo. Entra aquí en consideración el "efecto alcance" de las investigaciones (Giacconi, 2009).

Por otra parte, una cortina de inyecciones, además de 1) la absorción de agua bajo presión en Unidades Lugeon, también se evalúa teniendo en cuenta otros factores de entrada: 2) el valor del agua en casos de pérdidas de la misma por filtración (despreciable, muy valiosa, etc.). Este es un valor económico social y no un valor cualitativo a los efectos técnicos. 3) Las posibilidades de erosión interna (piping) de la fundación en caso de que la misma sea atravesada por flujos de agua. 4) Tipo de presa.

En definitiva, como resultado de la evaluación de los factores propuestos se determinó:

1) Respecto a la absorción de agua bajo presión: Existe anisotropía. El estribo de margen derecha presenta valores Lugeon superiores a 10 llegando incluso a 100. En la zona media de la presa sobre margen izquierda se aprecian valores de 9 Lugeon y 6 Lugeon y en el estribo de la misma margen valores muy altos (UL 79), estando todos los valores mencionados referidos a ensayos en la zona geotécnica 2. 2) Valor del agua en caso de existir filtraciones = despreciable ya que la presa es para control de crecidas extraordinarias temporarias y no para almacenamiento y consumo, sea humano y/o para riego. 3) Prevención de erosión interna (piping) = Sí, ya que hay materiales alterados que pueden sufrir este proceso. 4) Tipo de presa: gravedad de hormigón.

Acreditada la necesidad de impermeabilización al influjo que el criterio de permeabilidad máxima eventual de un macizo rocoso para la implantación de una presa de hormigón es de 3 Unidades Lugeon, se dispuso la realización de una cortina de inyecciones ubicada entre la primera y segunda hilera de inyecciones de consolidación, es decir a 2 metros de la línea de empate de aguas arriba y cuyo dimensionado se encuentra ilustrado en las Figuras 8 y 9 y en la Tabla 1 precedentes. Las inyecciones de impermeabilización serán realizadas una vez finalizadas las inyecciones de consolidación.

Para ello, el GIN determinado en pruebas previas de campo realizadas para este tipo de tratamiento en función de las condiciones geológico-geotécnicas de la fundación fue GIN 1500 (intensidad moderada) adoptando una presión máxima de 25 kg/cm<sup>2</sup> y volumen máximo de 150 l/m, lo cual indica la adopción de una envolvente de rasgos particulares para el caso respecto a la estándar de los autores del método. El objeto de tal determinación encuentra fundamento en las características del macizo y la necesidad de evitar desplazamientos superficiales, hidrofracturación y eventual hidrogateo, teniéndose además en cuenta que la presión máxima de mayor compromiso que deberá soportar el macizo con el embalse lleno sólo será durante 24 hs., cuando ocurran precipitaciones de recurrencia milenaria. En este aspecto cabe consignar que la altura máxima de la presa sobre la superficie de fundación es de 18,60 metros.

Sus parámetros fueron: Presión Máxima: 25 kg/cm<sup>2</sup> - Volumen Máximo: 150 litros/m - Caudal Máximo de Inyección por metro de taladro: 3 litros/minuto - VCTI = 16 l/m. (Figura 12).

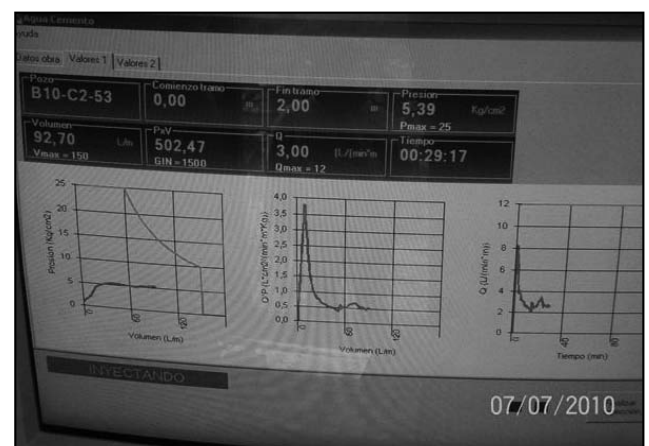


Figura 12. Método GIN. Monitor de control parámetros de inyección de prueba, previo a la definición de los parámetros definitivos de tratamiento.

La marcha de inyecciones de impermeabilización se realizó en forma secuente y obligatoria para los taladros primarios, luego los secundarios y terciarios. De los valores de absorción determinados y en función del valor crítico resultante para la intensidad de GIN adoptada, se realizó la intensificación de la pantalla en órdenes sucesivos intercalados entre los anteriores conforme lo descripto por Lombardi (Lombardi, 2003).

### RESULTADOS OBTENIDOS

En total se realizaron 11968 metros de perforación en los cuales se inyectaron 340,04 toneladas de cemento, lo cual determina un promedio general de 28,4 kg de cemento por metro de taladro inyectado, tal como se destaca en la Tabla 2, en tanto que en la Figura 13 se brinda información sobre la disposición final del des13 se observa la intensidad de tratamiento desarrollado, debiéndose tener en consideración que la heterogeneidad geotécnica detectada en todas las fases del trabajo, tanto de estudio como constructivas, arrojó como resultado que existiera una marcada absorción diferencial de las inyecciones en función de la calidad de roca objeto de la fundación.

#### Inyecciones de consolidación

En las inyecciones de consolidación se inyectaron 288,4 toneladas de cemento en 9564 metros de taladros. Ello arroja un promedio de 33,2 kg de cemento por metro de taladro, lo

cual significa un valor de absorción moderado-bajo (Deere, 1982). Sin embargo, el tratamiento poseyó valores de absorción muy dispares en algunos sectores respecto de otros como puede observarse en la Figura 6 donde la concentración de taladros es referencia manifiesta de un tratamiento laborioso con la necesidad de ejecución de taladros de órdenes superiores hasta lograr cerrar las absorciones por debajo del valor crítico.

En el bloque 6 (vertedero) las tareas de saneamiento y tratamiento dental efectuados determinaron que, en las posteriores tareas de inyección, los valores de absorción superficiales y subsuperficiales registrados fueran de bajo rango y sólo en los sectores donde se mapeó en dicho bloque la presencia de pegmatitas fisuradas se registraron absorciones de alto valor puntual lo cual ameritó el tratamiento puntual de tal situación. En el área del cuenco de disipación se realizaron inyecciones de consolidación para finalmente construir anclajes.

Por tanto, existió consonancia entre los relevamientos geológico-geotécnicos, el tratamiento de la fundación efectuado mediante saneamiento tratamiento dental y la intensidad de la disposición de los taladros de inyección y su absorción respectiva.

Un caso aparte fue la concreción del tratamiento en ambos estribos. Las características morfológicas de la presa y las cotas respectivas de excavación coadyudaron a la existencia de un mayor gasto relativo de lechada de inyección por su afloramiento en superficie en sectores adyacentes al área de fundación.

Tabla 2. Inyecciones cementíceas. Valores de absorción registrados en el tratamiento.

INYECCIONES CEMENTÍCEAS	Taladros (m)	Cemento (t)	t/m	kg/m
TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN	9564	288,438	0,0332	33,2
PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN	2404	51,602	0,0215	21,5
<b>TOTALES</b>	<b>11968</b>	<b>340,04</b>	<b>0,0284</b>	<b>28,4</b>

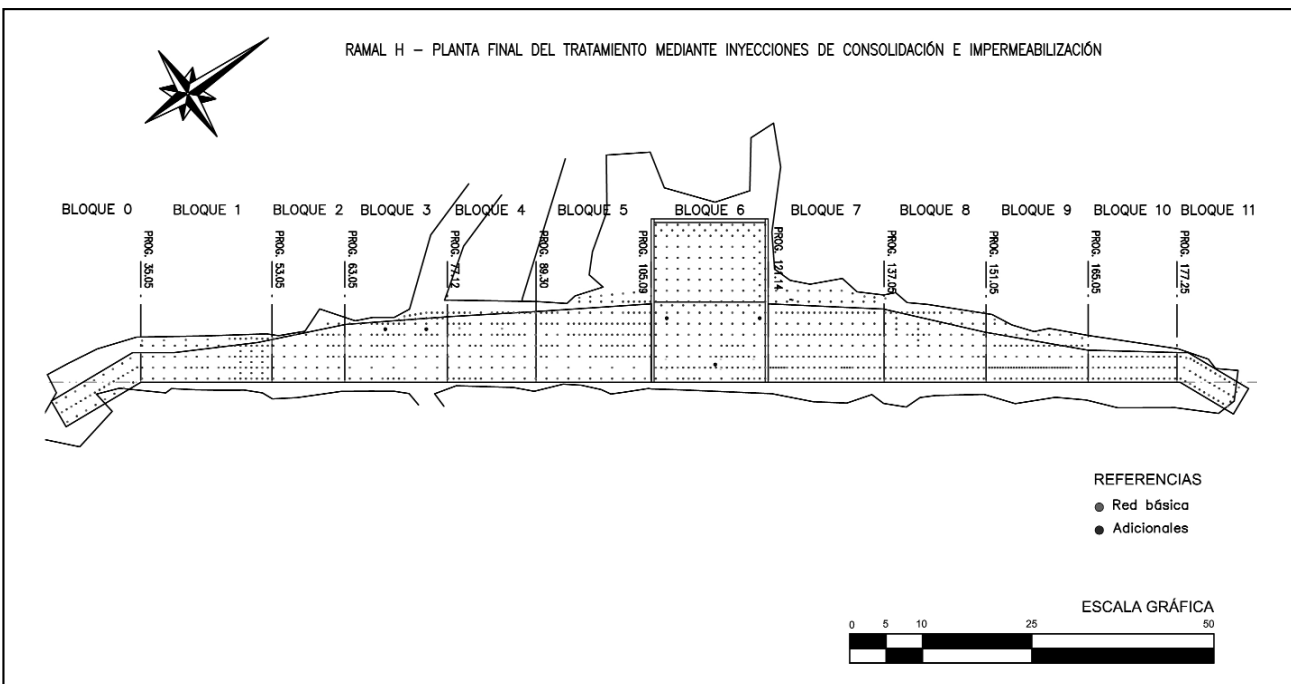


Figura 13. Ramal H

En definitiva se cumplió con la técnica en cuanto a que las inyecciones primarias llenaran las fisuras mayores, la serie siguiente de inyecciones secundarias llenaran las fisuras más anchas no colmatadas con las primarias, y así siguiendo hasta la inyección de las fisuras más finas. En la Figura 14 se visualiza la disposición de los taladros de inyección de diferentes órdenes en un sector de la presa.



Figura 14. Bloque 1. Al fondo, obturador instalado en un taladro de inyección. En primer plano se observan los taladros de inyección de consolidación finalizados y demarcados para su individualización y control del desarrollo de la operación del tratamiento.

#### Inyecciones de impermeabilización

Respecto a la pantalla de impermeabilización, la discriminación entre taladros de distintos órdenes y sus respectivas admisiones en toneladas/metro (t/m) y kilogramos/metro (kg/m), arroja el detalle ilustrado en la Tabla 3.

Para su ejecución se realizaron 2404 metros de taladros y se inyectaron 51,6 toneladas de cemento. La absorción promedio fue de 21,5 kg/m, el cual responde a un valor bajo (Deere, 1982)

La admisión de lechada de inyección en la pantalla de impermeabilización en los bloques 7 a 10 (mayormente pegmatitas poco alteradas muy fisuradas) fue mucho más significativa que lo acontecido respecto a la misma pantalla de impermeabilización en los bloques 2 a 5 (rocas gneissicas inalteradas a poco alteradas con baja intensidad de fisuración). El relativo elevado consumo de cemento por metro de taladro inyectado en el orden cuartario respecto a la marcha de los demás

órdenes de la pantalla de impermeabilización que se referencia en la Tabla 3 (28,7 kg/m) se debe precisamente a la inyección de las pegmatitas muy fisuradas en el lateral derecho de la presa en contacto con gneis alterado. En el bloque central de la presa (Bloque 6) la marcha de la pantalla no mostró mayores dificultades al influjo de los ya mencionados previos tratamientos superficiales y subsuperficiales de saneamiento existiendo en profundidad también muy bajos valores de absorción, signo de la existencia de condiciones hidráulicas de baja conductividad.

Al igual que en las inyecciones de consolidación, la concreción del tratamiento de impermeabilización en ambos estribos poseyó las mismas dificultades por las mismas razones.

#### EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO REALIZADO - SÍNTESIS

Las perforaciones de control ejecutadas luego de finalizadas las tareas de inyección arrojaron como resultado la efectiva respuesta del macizo al tratamiento visualizándose la presencia efectiva de lechada fraguada en las discontinuidades. (Figura 15)

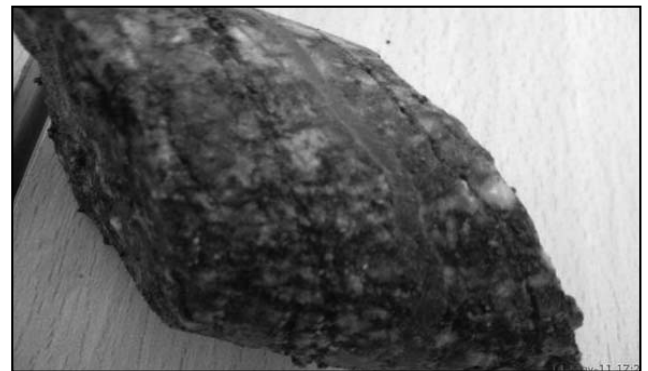


Figura 15. Control de la inyección. Lechada fraguada relleno fisuras en fragmento de testigo de perforación (gneis alterado y cizallado).

Si bien existen controversias respecto a la utilización de los ensayos Lugeon post tratamiento mediante inyecciones como elemento de evaluación de la efectividad alcanzada, en las perforaciones de control del tratamiento se realizaron dichos ensayos fundamentalmente en la zona de consolidación del macizo no así en la verificación de la pantalla de impermeabilización debido al tipo y características del cierre de los taladros verificado durante las tareas y a las recomendaciones de reconocidos investigadores (G. Lombardi, 2001) que desaconsejan tal práctica.

Tabla 3. Inyecciones de impermeabilización. Detalle de absorciones por número de orden

PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN	Taladros (m)	Cemento (t)	t/m	kg/m
Primarias, Secundarias y Terciarias (cada 3 m)	758	16,671	0,0220	22,0
Cuartarias (cada 1,5 m)	546	15,667	0,0287	28,7
Quintarias (cada 0,75 m)	792	13,927	0,0176	17,6
Sextarias (cada 0,375 m)	260	3,747	0,0144	14,4
Otras (puntuales)	48	1,59	0,0331	33,1
<b>TOTALES</b>	<b>2404</b>	<b>51,602</b>	<b>0,0215</b>	<b>21,5</b>

La decisión respecto a la realización de dichos ensayos se fundamenta en las absorciones Lugeon registradas en sectores críticos, no sólo en los estudios previos (Giaconi, 2009 y Flores, 2009) sino también en los realizados en el ámbito de la excavación durante el desarrollo de las perforaciones geotécnicas complementarias realizadas a los fines de ajustar la cota definitiva de fundación en los bloques de mayor compromiso estructural (Giaconi, 2011). Las ubicaciones de las perforaciones se encuentran en la Figura 11 y sus coordenadas se informan en la Tabla 4.

La descripción sintética de las características litológicas de los testigos extraídos en las perforaciones adicionales puede

observarse en la Tabla 5, lo cual ameritó también estudios geotécnicos complementarios realizados en laboratorio respecto a la determinación de las características geomecánicas de resistencia y deformación (Giaconi, 2011).

Los ensayos de admisión de agua realizados, previos al tratamiento mediante inyecciones, en dichas perforaciones complementarias SC1 a SC3, arrojaron valores Lugeon muy altos, evidencia de la presencia de un macizo de características geotécnicas comprometidas (Tabla 6).

**Tabla 4. Ubicación y coordenadas de las perforaciones geotécnicas realizadas en los estudios previos (S) y durante las tareas de excavación (SC)**

BLOQUE	PERFORACION	X	Y	COTA (m)
	Mojón Eje MI	5578413,83	5867539,14	214,07
0	S12	5578413,8	5867539,19	213,91
0	S1a	5578427,4	5867559,09	212,83
2	S2	5578450,56	5867589,82	204,86
3	S11	5578461,82	5867604,75	202,35
3	SC3	5578453,5	5867607,41	196,73
5	S3	5578466,56	5867620,43	200,73
5	S10	5578464,34	5867637,84	197,74
6	S9	5578476,71	5867632,22	197,55
6	SC2	5578489,1	5867645,96	192,10
6	S4	5578482,23	5867642,64	197,87
7	S8	5578490,5	5867651,06	199,61
7	SC1	5578482,9	5867658,50	192,80
8	S5	5578498,39	5867661,72	203,57
9	S6	5578509,62	5867679,66	206,78
11	S7	5578523,52	5867698,78	209,89
	Mojón Eje MD	5578527,56	5867705,03	211,04

**Tabla 5. Características litológicas relevadas en las perforaciones geotécnicas complementarias**

BLOQUE	PERFORACIÓN	LITOLOGÍA
B7	SC1	De 0,00 m a 7,70 m: Gneis muy alterado y fisurado. RQD muy malo
B6	SC2	De 0,00 m. a 4,75 m: Gneis muy alterado y fisurado. RQD muy malo
B3	SC3	De 0,00 m a 3,90 m: Gneis muy alterado. RQD muy malo. De 3,90 a 6,00 m: Gneis sano. RQD 100%

**Tabla 6. Valores Lugeon en perforaciones complementarias, previo a las tareas de inyección.**

BLOQUE	PERF.	COTA (m)	PROF. TOTAL (m)	ENSAYO LUGEON 1 Intervalo (m)	VL 1	ENSAYO LUGEON 2 Intervalo (m)	VL2
7	SC1	192,80	7,70	1 a 2,3	75	2,7 a 7,7	15
6	SC2	192,10	4,75	1,5 a 4,75	Pérdida de agua	-	-
3	SC3	196,73	6,00	0,50 a 3,90	60	3,90 a 6,00	0

Los ensayos Lugeon en las perforaciones de verificación post tratamiento mediante inyecciones fueron ejecutados de manera especialmente controlada no verificándose en las curvas de inyección, determinadas por la marcha de presiones de ensayo (tres ascendentes y dos descendentes) vs. sus respectivas admisiones, los efectos de hidrofracturación.

Como puede observarse en la Tabla 7 respecto a la condición litológica del macizo descrita en cada perforación post tratamiento, las profundidades de auscultación no fueron ma-

yormente profundas debido precisamente a que la búsqueda se orientó básicamente a detectar la eficacia del tratamiento de consolidación cerrando las fisuras preexistentes donde precisamente, por arbitrio de las características litológicas del macizo superior, pudiera haber un mayor compromiso mecánico e hidráulico frente a la estabilidad de la presa.

El resultado de los ensayos Lugeon post tratamiento arroja como dato emergente que las absorciones se redujeron de manera manifiesta, tal como lo ilustra la Tabla 8. (Figura 16)

**Tabla 7. Características litológicas de las perforaciones de control post tratamiento.**

BLOQUE - PERF.	LITOLOGÍA
B7 - A	De 3,80 (techo roca) a 10 m:Gneis poco alterado. RQD regular a bueno. De 10 a 13 m:Gneis poco alterado a sano. RQD > 75 %.
B7 - B	De 6,00 (techo roca) a 9,70 m:Gneis poco alt.a sano. RQD reg.a bueno. De 9,70 a 13,85 m: Gneis sano. RQD > 75 %.
B4 - C	De 2,00 (techo roca) a 3,80 m:Gneis alterado a sano. RQD regular. De 3,80 a 7,10 m:Gneis inalterado. RQD > 75 %.
B4 - D	De 2,25 (techo roca) a 4,6 m:Gneis alterado a sano. RQD regular a malo. De 4,6 a 9 m:Gneis inalterado. RQD 100%
B5 - E	De 2,85 (techo roca) a 5,50 m:Gneis inalterado. RQD 100 %
B5 - F	De 3,60 (techo roca) a 5,00 m:Gneis poco alterado a inalt. RQD > 75 %.
B6 - G	De 4,65 (techo roca) a 11,40 m:Gneis alterado. RQD regular a malo. De 11,40 a 12,30 m:Pegmatita inalterada y muy fracturada (RQD < 25 %)
B6 - H	De 5,3 (techo roca) a 6,9 m.: Pegmatita inalt. y muy fracturada (RQD <25%) De 6,9 a 7,9 m: Gneis alterado. RQD <25% De 7,9 a 9,1: Gneis sano. RQD >75% De 9,1 a 9,8 m: Pegmatitainalterada y muy fracturada(RQD <25%) De 9,8 a 12,9 m.: Gneis sano. RQD 100%.
B3 - I	De 2,70 (techo roca) a 4,70 m:Gneis poco alterado a inalt. RQD > 75 % De 4,70 a 7,30 m. = Gneis inalterado. RQD 100 %.

Cabe consignar que desde la superficie (0,00 m) hasta la profundidad del techo de roca corresponde al espesor del H° de reemplazo mediante tratamiento dental y/o H° de regularización

**Tabla 8. Valores Lugeon en perforaciones de control post tratamiento inyecciones.**

BLOQUE - PERF.	COTA (m)	Prof. Total (m)	Prof. H° tratamiento dental y/o regularización (m)	Prof. en roca° (m)	ENSAYO LUGEON 1 Intervalo (m)	VL 1	ENSAYO LUGEON 2 Intervalo (m)	VL2
B7 - A	196,7	13	3,8	9,2	5 a 9,9	0	10 a 13	0
B7 - B	196,7	13,85	6	7,85	6 a 9,7	0	9,7 a 13,85	0
B4 - C	198,5	7,1	2	5,1	2,10 a 7,10	1	-	-
B4 - D	198,1	9	2,25	6,75	2,25 a 6,00	0	6,00 a 9,00	0
B5 - E	197,2	5,5	2,85	2,65	2,85 a 5,50	0	-	-
B5 - F	195,6	5	3,6	1,4	3,60 a 5,00	1	-	-
B6 - G	194,11	12,3	4,65	7,65	6,00 a 11,00	3	-	-
B6 - H	194,11	12,9	5,3	7,6	5,80 a 10,80	3	-	-
B3 - I	198	7,3	2,7	4,6	3,00 a 7,30	2	-	-



Figura 16. Control del tratamiento de inyecciones. Ejecución de ensayos Lugeon en el Bloque 4 - Perforación C.

### CONCLUSIONES

- 1) La investigación geotécnica llevada a cabo durante la etapa del proyecto de detalle y estudios complementarios mostró un macizo heterogéneo desde el punto de vista de sus propiedades geotécnicas. La heterogeneidad observada es producto de procesos de fracturamiento y alteración diferencial.
- 2) El proceso de construcción permitió observar más exhaustivamente las características del macizo y ajustar el esquema de recomendaciones para el análisis de la presa. La observación del fondo de excavación permitió detectar que, entre las progresivas 80 m a 110 m y 120 m a 145 m, se presentó en aproximadamente la mitad de aguas arriba roca de superior calidad y, en espesores variables entre 2 m y 5 m en la mitad de aguas abajo, un macizo rocoso de calidad inferior. Asimismo, en los sectores de presa comprendidos entre las progresivas 62 m y 80 m en la margen izquierda, se detectó un sector

subsuperficial con condiciones geotécnicas sensiblemente inferiores.

- 3) Para la mitigación de las heterogeneidades registradas se dispuso la realización de tratamiento geotécnico mediante inyecciones cementíceas.
- 4) Las intensidades de inyección aplicadas fueron GIN 1000 (moderada-baja) para la consolidación y GIN 1500 (moderada) para la ejecución de la pantalla de impermeabilización
- 5) Las absorciones promedio de lechada de inyección para toda la presa, 28,4 kg/m, responden al límite inferior de clase la moderada-baja (Deere, 1982).
- 6) La heterogeneidad detectada del macizo rocoso en todas las fases del trabajo, tanto de estudio como constructivas, y la absorción de lechada de inyección arrojó como resultado que existiera una marcada absorción diferencial de las inyecciones en función de la calidad de roca objeto de la fundación.
- 7) En los sectores donde los ensayos Lugeon previos al tratamiento dieron como resultado valores de orden de magnitud alta, luego del tratamiento efectuado se registraron valores no mayores de 3 UL, siendo en la mayoría de los casos menores o iguales a 1 UL.
- 8) Tales condiciones ameritan como resultado final un tratamiento efectivo del macizo acorde a los objetivos originalmente planteados.
- 9) Finalmente, se logró el objetivo impuesto de homogeneización de las condiciones mecánicas e hidráulicas del macizo de apoyo de la presa, siendo que las intensidades GIN adoptadas bajo control del sistema computarizado de las inyecciones permitió llevar a cabo los trabajos con un alto grado de eficacia y seguridad controlándose los volúmenes inyectados y fundamentalmente las presiones del tratamiento en tiempo real evitando desplazamientos no queridos y la consecuente posibilidad de hidrofracturación dadas las características comentadas del macizo rocoso de fundación.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BIENIAWSKY, Z.T. 1989.  
Engineering Rock Mass  
Classifications. Wiley
- BARTON, N. LIEN, R. AND LUNDE, J. 1974.  
Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.  
*Rock Mechanics. Springer Verlag, vol. 6, pp 189-236.*
- DALLA SALDA, L.; SPALLETTI, L; POIRÉ, D.; DE BARRIO, R.; ECHEVESTE, H.; BENIALGO, A. 2006.  
Tandilia. Temas de Geología Argentina I.  
*INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21: 17-46. Págs. 17 a 45.*
- DEARMAN, W., SERGEEV, E Y SHIBAKOVA, V. 1989.  
Engineering Geology of the Earth, Moscú
- DEERE, D. U. 1982.  
Cement-bentonite grouting. Grouting in Geotechnical Engineering.  
*Proceedings of conference sponsored by the Geotechnical Engineering Division.*
- FLORES, R. M. 2009.  
Presa del Ramal H - Informe de Ingeniería Geotécnica.  
(Inédito).

- FLORES, R. M. Y GIACONI, L. M..2010.  
Aspectos geotécnicos de la fundación de la Presa del Ramal H.  
*Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG). Mendoza (Argentina).*
- FLORES, R.M. Y MASSABIE, A.C. 2008.  
Ejecución de una galería piloto para investigar un macizo granítico muy figurado.  
*XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG)*
- GIACONI, L. M. 2009.  
Presa del Ramal H -  
*Informe de Geología y Geotécnia. (Inédito).*
- GIACONI, L. M. 2011.  
Presa del Ramal H -  
*Informe complementario de Geología y Geotécnia. (Inédito).*
- GOODMAN, R.E. 1989.  
Introduction to Rock Mechanics.  
*John Wiley & Sons.*
- HÖEK, E Y DIEDERICHS, M.S. 2006.  
Empirical estimation of rock mass modulus,  
*International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.*
- HOULSBY, A. C. 1990.  
Construction and design of cement grouting.  
*A guide to grouting in rock foundations. John Willey and Sons. New York. 442 pp*
- LOMBARDI, G. 1990.  
La Permeabilite et L'inyectabilite des massifrocheuxfissures.  
*Geotech N-51. Págs. 5-29.*
- LOMBARDI, G. AND DEERE, D.1993  
Grouting desing and control using the GIN principle,  
*Water Power & Dam Construction. p 15 - 22*
- LOMBARDI, G. 2001.  
Presa de enrrocados con cara de hormigón.  
*Usos de los criterios GIN para consolidación e impermeabilización de la roca. N. Ref.: 102.1-R-141*
- LOMBARDI, G. 2003.  
Grouting of Rock Masses.  
*Third International Conference on Grouting Treatment. Geotechnical Special Publication. N° 120. Págs. 164 - 197*
- PECK, R.B., HANSON, W.E. Y THORNBURN, T. H. 1982.  
Ingeniería de Cimentaciones.  
*Editorial Limusa.*
- SERRANO, A. Y OLALLA, C. 2001.  
Cálculo de Cimentaciones Superficiales en Roca.  
*Ingeopres N° 90.*
- WEAWER, K. D. Y BRUCE, D.A. 2007.  
Dam Foundation Grouting.  
*Revised and expanded. Edition ASCE press. 473 pp.*







## Estudo da recuperação de áreas degradadas por erosão no Município de Franca, São Paulo, Brasil

### Reclamation study of degraded lands by erosion process: Franca, São Paulo, Brazil

Rotta, Cláudia Marisse dos Santos ✉ - Zuquette, Lázaro Valentin

Recibido: 26 de Julio de 2012 • Aceptado: 19 de Noviembre de 2012

#### Resumen

*El presente trabajo aborda el estudio realizado en siete espacios degradados por procesos de erosión, en el municipio de Franca, departamento de São Paulo, Brasil, los quais fueron recuperados por la adopción de medidas diferentes. Su desarrollo siguió una serie de pasos, como la identificación de álos espacios degradados, seguidas por la evaluación temporal y espacial del proceso erosivo y caracterización geológica y geotécnica. En secuencia, se llevaron a cabo trabajo de campo, con el objetivo principal para identificar las medidas de recuperación empleadass en cada espacio y también para evaluar su resultado. Finalmente, se realizó un análisis conjunto de toda la información obtenida, tratando de evaluar las técnicas utilizadas, así como su eficiencia. Se puede concluir a través de este trabajo que, a pesar de la mejora en escenarios de degradación evaluados, varios problemas se asociaron con las técnicas de recuperación, siendo consecuente de la no consideración de las informaciones geológica, geotécnica, y ambiental, incluso las sociales.*

**Palavras claves:** *Espacios degradados, Erosion, medidas de recuperación, Franca (SP), Brasil.*

#### Abstract

*The present work deals with the study carried out in seven degraded areas by erosion processes, in the municipality of Franca, São Paulo State, Brazil; that were rehabilitated by adopting of different measures. Its development followed a series of steps: identification of degraded areas, followed by the temporal and spatial evaluation of erosive process, and geological-geotechnical characterization. In sequence, were carried out field work, with the main objective to identify the rehabilitation measures used in each area, and also to evaluate its performance. Finally, it was held a joint analysis of all information obtained to evaluate the appropriateness of the techniques used, as well as their efficiency. It can be concluded through this work that, despite the improvement in degradation scenarios assessed, several problems were associated with rehabilitation measures and mainly due to non-consideration of geological, geotechnical, environmental information and even social.*

**Keywords:** *Land Degradation, Erosion, rehabilitation measures, Franca (SP), Brasil.*

✉ claudia.rotta@usp.br

## Resumo

O presente trabalho trata do estudo realizado em sete áreas degradadas por processos erosivos, no município de Franca, Estado de São Paulo, Brasil; que foram recuperadas através da adoção diferentes medidas. Seu desenvolvimento seguiu uma série de etapas, sendo a primeira a identificação das áreas degradadas, seguida da avaliação temporal e espacial do processo erosivo, e da caracterização geológico-geotécnica. Em sequência, foram realizados trabalhos de campo, com o objetivo principal de identificar as medidas de recuperação implantadas em cada área, e também de avaliar seu desempenho. Finalmente, foi realizada uma análise conjunta de todas as informações obtidas, buscando-se avaliar a adequação das técnicas utilizadas, assim como sua eficiência. Pode-se concluir através desse trabalho que, apesar da melhora nos cenários de degradação avaliados, vários problemas ocorreram associados às técnicas de recuperação, sendo estes consequentes da não consideração de informações geológicas, geotécnicas, ambientais e até mesmo sociais.

**Palavras-chave:** Área degradada, Erosão, Recuperação de erosão, Franca - São Paulo.

## INTRODUÇÃO

A aceleração dos processos naturais devido à ação antrópica no meio ambiente pode, muitas vezes, resultar em situações de degradação, envolvendo sérios prejuízos ambientais e econômicos. Apesar da abrangência do termo degradação, esta pode ser empregada quando se ocorre o declínio de qualquer componente ambiental, seja solo, água ou relevo, entre outros; sendo que um dos fenômenos naturais que, quando acelerado, altera a dinâmica desses aspectos é a erosão, bastante frequentes no Brasil, tanto em áreas urbanas quanto rurais.

Existem inúmeros procedimentos utilizados para recuperar áreas degradadas por erosão, porém, muitas vezes, estes são aplicados sem alcançar os resultados desejáveis, envolvendo altos custos. Nesse contexto, justifica-se a importância de estudos sobre métodos de prevenção, mitigação, controle e recuperação de áreas erodidas, desenvolvidos tanto por autores internacionais, quanto brasileiros. Dentre estes, podem ser citados os trabalhos de Ayres (1936), Morgan (1994, 1995), Lal (1990), Zachar (1982), Fao (1986), DAEE (1989), Bertoni e Lombardi Neto (1993), Bidone e Tucci (1995), Salomão e Iwasa (1995), Fendrich (1997a, b), Tragsa et al (1998), Ridente Jr. (1999), Souza (2001), Orea (2004).

De acordo com a bibliografia existente sobre o tema, as medidas de recuperação de áreas erodidas podem ser diferenciadas tanto pelo objetivo pretendido com sua aplicação, quanto pelo tipo, sendo que este varia entre mecânicas, ecológicas, estruturais, agrícolas e de bioengenharia. Algumas das técnicas mais comuns e mais frequentes foram selecionadas e listadas na Tabela 1, evidenciando essa diferenciação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento desse trabalho envolveu uma série de etapas, esquematizadas no fluxograma da Figura 1. Para isso, foram empregados materiais como mapa topográfico na escala de 1:12.500, imagens de satélite, fotografias aéreas de diferentes anos e em diferentes escalas, o software AutoCAD Map, e outros equipamentos de laboratório.

A primeira etapa contou com a identificação de sete áreas degradadas pelos processos erosivos que sofreram processos de recuperação, controle ou prevenção de erosão; sendo que, em seguida, essas áreas foram localizadas no mapa topográfico. A partir das imagens de satélite e de fotografia aérea, de diferentes períodos, realizou-se uma análise temporal do uso e ocupação, dos processos erosivos e mesmo das medidas de recuperação,

possibilitando a realização de uma avaliação preliminar desses aspectos.

A próxima etapa envolveu a caracterização geológico-geotécnica dos materiais geológicos, considerando-se aspectos como distribuição espacial, tipos e textura; e também dos aspectos geomorfológicos gerais de cada área. Foi feito também um levantamento de trabalhos prévios existentes na área.

Em seguida foram realizados os trabalhos de campo, com o objetivo de realizar a caracterização geológico-geotécnica em termos de propriedades relacionadas à erodibilidade e as morfométricas específicas de cada área, e de cada feição. Também foram realizadas atividades no sentido de avaliar a eficiência das medidas implantadas, considerando-se alguns aspectos pré-definidos.

Por fim, considerando-se as condições para implantação de cada medida de recuperação adotada foi desenvolvida uma análise, com o objetivo de avaliar o seu sucesso ou fracasso, tal qual a sua adequação.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas estudadas são pertencentes ao Município de Franca - SP, Brasil (Figura 2), sendo todas na área urbana. A região encontra-se no interior da zona geomorfológica denominada de Planalto Isolado de Franca, e apresenta altitudes variando entre 800 e 1010 metros, e clima do tipo A, segundo a classificação de Koepfen (1948), ou seja, apresenta temperaturas médias em torno de 24°C e pluviosidade anual superior a 1300 mm.

A região tem como substrato rochoso litologias das Formações Itaqueri (arenitos, argilitos e siltitos); e Botucatu (arenito). Essas litologias são recobertas por materiais inconsolidados residuais e transportados com textura predominantemente arenosa (que normalmente ocupam a metade superior das encostas e topos). As feições ocorrem predominantemente no limite entre os materiais inconsolidados retrabalhados arenosos e os residuais arenosos relacionados as litologias da Formação Itaqueri.

## RESULTADOS

### Processos Erosivos

De acordo com Zuquette et al. (1994), o processo erosivo existente na região ocorre sob a forma de inúmeras feições erosivas, que vão desde voçorocas à pequenos ravinaamentos. No caso das sete áreas estudadas nesse trabalho, foi observada a presença de voçorocas associadas à cabeceira de canais de drenagem de primeira ordem, cujo desenvolvimento foi resultado da

Tabela 1. Medidas para prevenção, controle, mitigação e/ou recuperação que podem ser usadas para áreas degradadas por processos erosivos.

	Medidas	Objetivo das Medidas				
		Prevenção	Controle	Mitigação	Recuperação	
Ecológicas	Revegetação	X	X	X	X	
	Pastagem	X	X	X	X	
	Faixa ripariana	X	X	X	X	
	Zonas de buffer	X	X	X	X	
	Barreira de galhos (Brush barrier)	X	X	X		
Agrícolas	Plantas de cobertura	X	X	X		
	Culturas em faixa	X	X	X		
	Cordões de vegetação permanente	X	X	X		
	Faixas de bordadura	X	X	X		
	Alternância de capinas	X	X	X		
	Ceifa do mato	X	X	X		
	Cobertura morta	X	X	X		
	Controle do fogo	X				
	Adubação (verde, química e orgânica)	X	X	X		
	Plantio Direto	X	X	X		
Rotação de culturas	X	X	X			
Calagem			X			
Bioengenharia	Gabião Vegetado	X	X	X	X	
	Geogrelha vegetada	X	X	X	X	
	Mantas de gramíneas	X	X	X	X	
	Sistemas de celas de confinamento	X	X	X	X	
	Tapete Biodegradável	X	X	X		
Estruturais	Microdrenagem	Meios-fios/Guias	X	X	X	X
		Sarjetas	X	X	X	X
		Bocas-de-Lobo/Bocas coletoras	X	X	X	X
		Galerias	X	X	X	X
		Poços de visita	X	X	X	X
		Tubos de ligações	X	X	X	X
	Caixas de ligação	X	X	X	X	
	Macro-drenagem	Canais: naturais ou artificiais	X	X	X	X
		Dissipadores de energia	X	X	X	X
		Ressalto Hidráulico: Canais abertos		X	X	X
		- Tipo SAF para n° Froude 1,7 a 17		X	X	X
		- Tipo USBR II para n° Froude $\geq 4,5$		X	X	X
		- Tipo USBR III para n° Froude $\leq 4,5$		X	X	X
		- Tipo USBR IV para n° Froude = 2,5 a 4,5		X	X	X
		Barragens	X	X	X	X
Vertedores: Queda, Calha e Degrau "Cacimbo"			X	X	X	
Bacia de acumulação			X	X		
Bacias dissipadoras		X	X	X		
Proteção de taludes	X	X	X	X		
Aterramento com obras hidráulicas		X	X	X		
Obras de Pavimentação	X	X	X	X		
Drenos		X	X	X		
Mecânicas	Plantio em contorno	X	X	X	X	
	Terraceamento	X	X	X	X	
	Sulcos e camalhões em contorno	X				
	Canais escoadouros	X	X	X		
	Barragens	X	X	X		
	Adequação e conservação de estradas vicinais e carreadores	X	X	X		
	Caixas de infiltração	X	X	X		
	Aterramento		X	X	X	
	Rip rap	X	X	X	X	
	Muro de contenção	X	X	X		
	Dique de Proteção	X	X	X		
	Cordões em nível	X	X	X	X	
	Aterramento com resíduo		X	X	X	
	Retaludamento	X	X	X	X	
	Bermas	X	X	X	X	
Barragem de Sedimento	X	X	X			

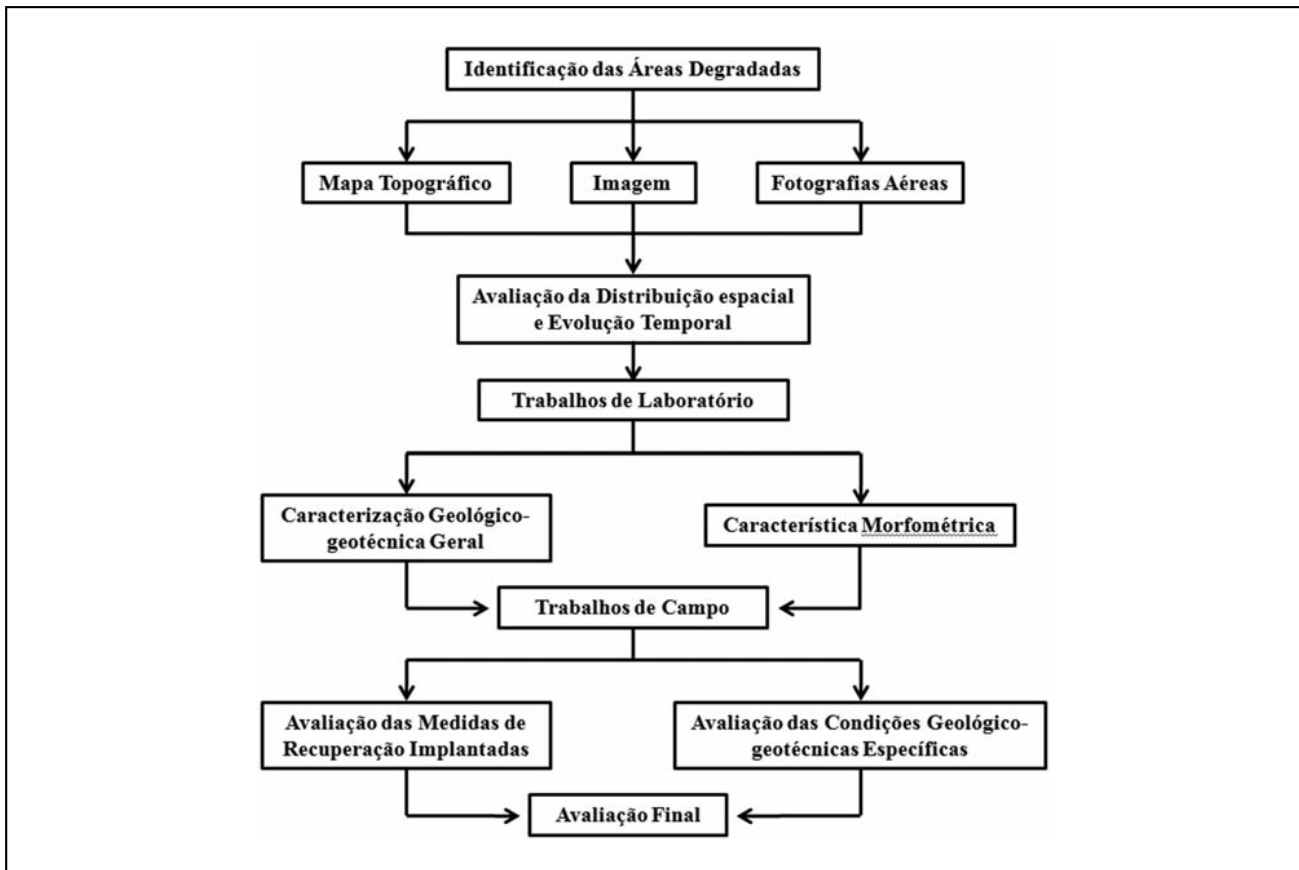


Figura 1. Fluxograma indicando as principais etapas do trabalho.

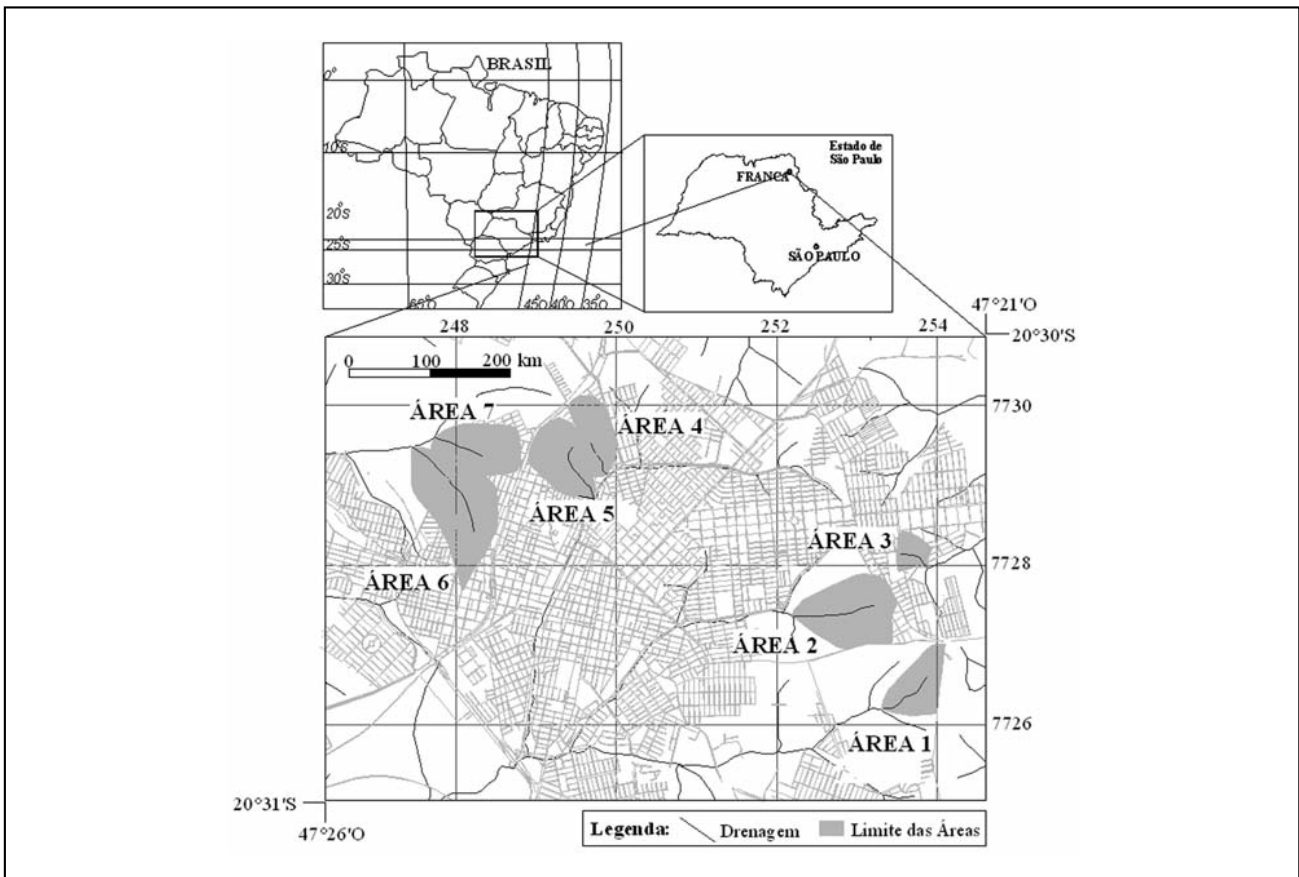


Figura 2. Localização das Áreas de Estudo na região urbanizada do Município de Franca (SP), Brasil.

influência do intenso processo de ocupação urbana associado às características geológico-geotécnicas dos materiais geológicos.

Estas feições apresentam dimensões de até 200 metros de comprimento, 50 metros de largura e 30 metros de profundidade. Atualmente, verifica-se que estas feições sofreram diferentes processos de recuperação, ao longo dos anos, envolvendo sucessos e insucessos bastante particulares.

#### Descrição das medidas de recuperação: Área 1.

A Área 1, apesar de inserida na área urbana, não apresenta elementos construídos, de modo que diferentes estruturas são empregadas, para garantir sua manutenção para usos futuros, relacionados à prevenção dos processos erosivos. Pela observação das fotografias aéreas de diferentes anos, verificou-se nessa área a presença de uma feição principal, de cabeceira e contínua em relação à drenagem. Através dos trabalhos de campo verificou-se que essa feição ainda existe associada às medidas de controle de sua evolução.

Para garantir sua estabilidade, a feição foi parcialmente aterrada, sendo então construída uma barragem com blocos de rocha para evitar a ação erosiva do escoamento acelerado, protegendo o trecho aterrado. Além disso, foram dispostas canaletas em vários trechos das encostas, para direcionar a água de forma disciplinada até uma abertura na barragem (Figura 3). Nas áreas próximas a feição, onde houve movimento de terra, foram plantadas mudas de diferentes espécies vegetais. Essa técnica apresentou dois problemas principais: primeiramente, muitas mudas não se desenvolveram de forma adequada; e ainda, observou-se o surgimento de canais preferenciais associados à sequência de cavas (para a inserção das mudas); conforme pode ser observado na Figura 4. Finalmente, nos trechos mais distantes da feição, foram empregados cordões de nível em conjunto com a cobertura vegetal de gramíneas, com o objetivo principal de conter o escoamento acelerado, protegendo tanto as encostas, quanto impedindo o avanço da feição principal (Figura 5).

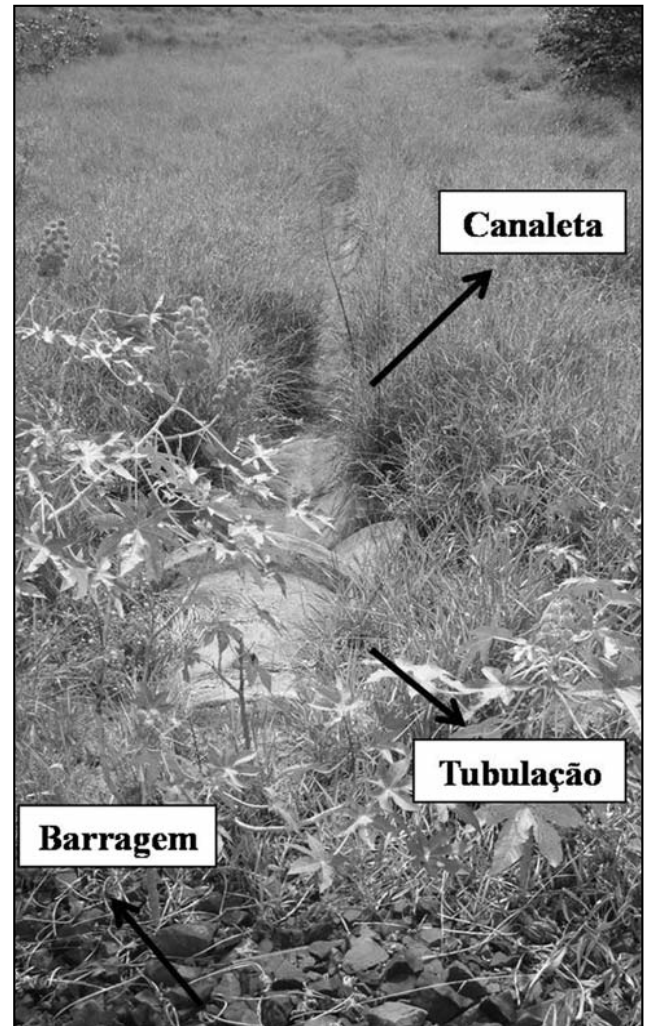


Figura 3. Barragem e canaleta associadas à feição principal.

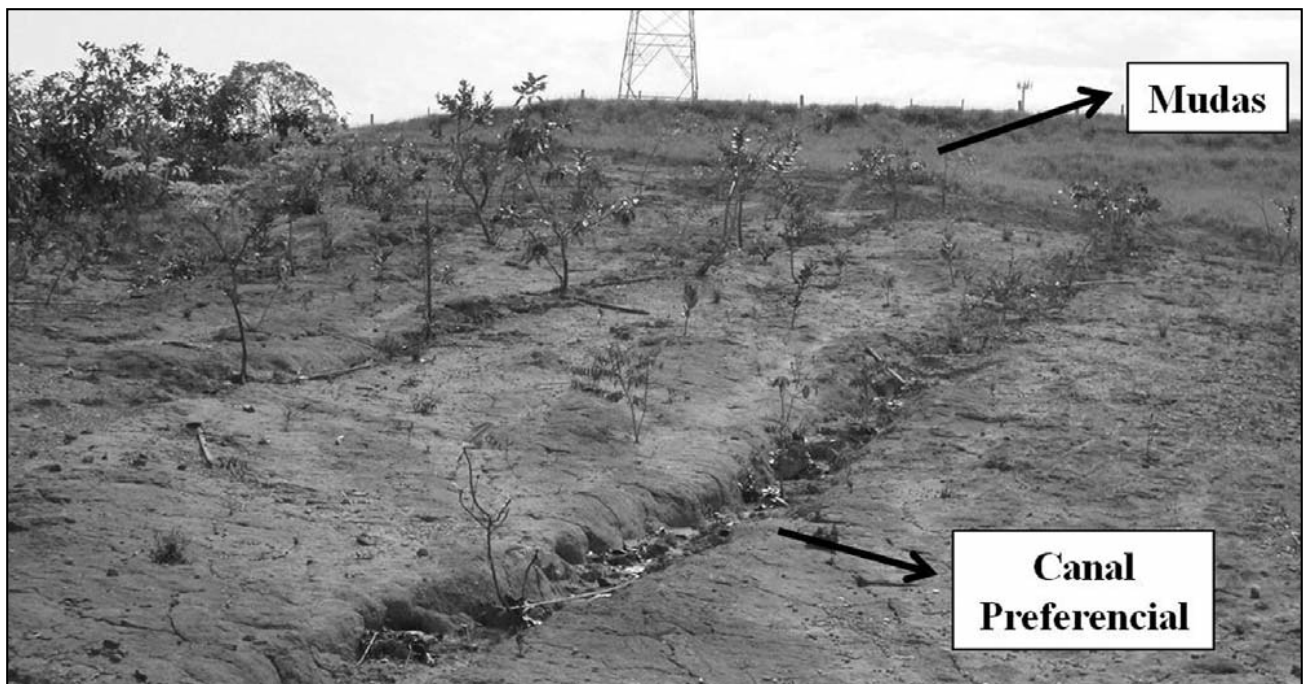


Figura 4. Mudas para revegetação da área na proximidade da feição principal.

Em termos de relevo e da disposição dos materiais geológicos, o perfil representado na Figura 6 mostra esquematicamente a situação geral dessa área. Pela figura pode-se observar a forma como a atividade de recuperação modificou a situação original. O perfil em questão foi gerado a partir da base topográfica de escala 1:12.500; apresentando exagero na escala vertical (sobrelevação) para melhor representação dos diferentes materiais presentes na área.

**Descrição das medidas de recuperação: Área 2.**

A Área 2 é circundada por um bairro residencial, porém, a feição recuperada não é ocupada, nem possui um uso definido. Essa feição foi recuperada através de obras de retaludamento, com a construção de 5 patamares, que foram cobertos por gramíneas. Na base dos taludes de cada patamar existem canaletas, com a função de conduzir a água de chuva para fora do sistema, evitando que esta esco de forma acelerada para o patamar



Figura 5. Cordões em nível e gramíneas nas encostas da Área 1.

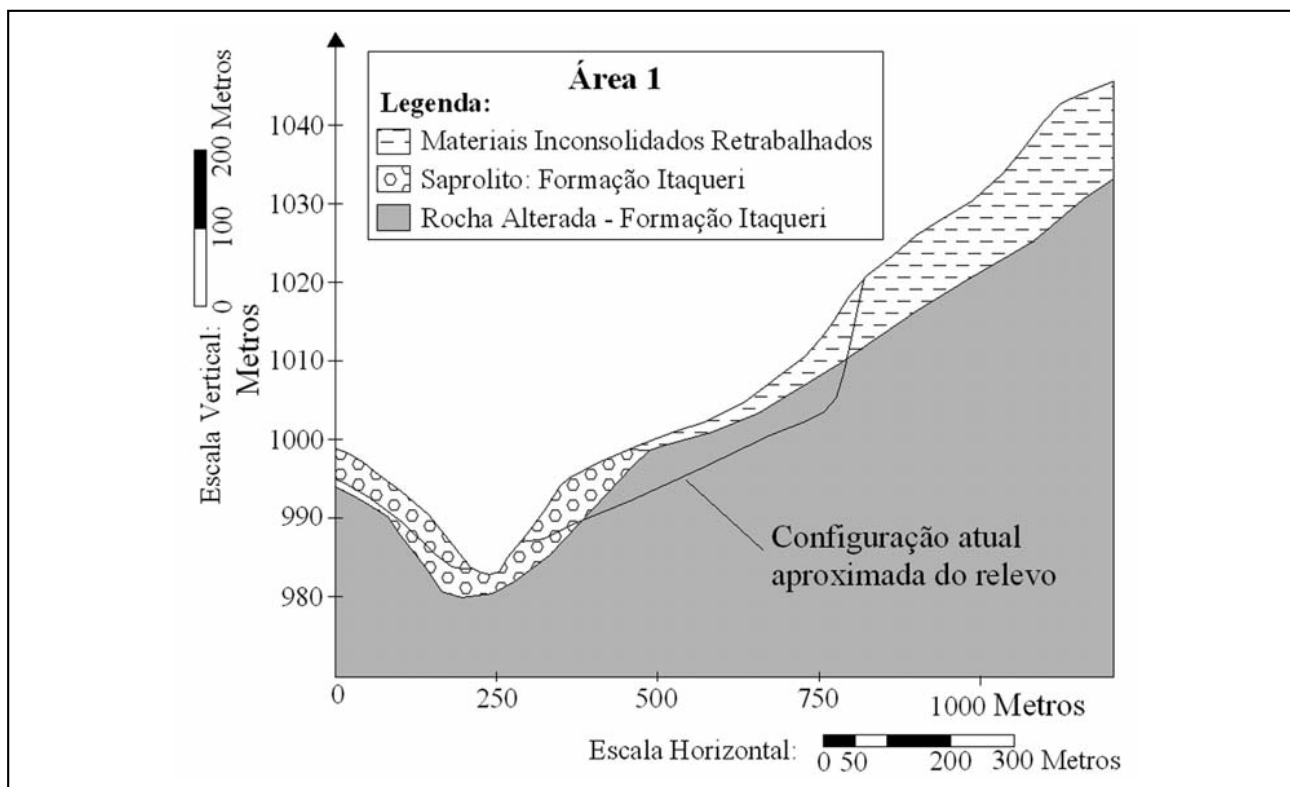


Figura 6. Perfil Geológico com a distribuição dos materiais geológicos e representação da superfície atual e anterior da Área 1. (Sobrelevação igual a 12, sendo o exagero vertical em função da melhor visualização dos materiais representados)



abaixo. Além disso, o canal principal dessa área foi canalizado através de obra de macrodrenagem (Figura 7). A área se apresenta estável, no que diz respeito aos processos erosivos, porém houve o surgimento de três escorregamentos no nível inferior dos patamares, como indica a Figura 8.

Em sequência, a Figura 9 representa o relevo anterior à recuperação, assim como as modificações geradas pelo retaludamento e os materiais geológicos encontrados na área em questão. Esse perfil, gerado a partir da base topográfica 1:12.500 apresenta exagero vertical da ordem de 6,7, aproximadamente, com o objetivo de facilitar a representação dos diferentes materiais.

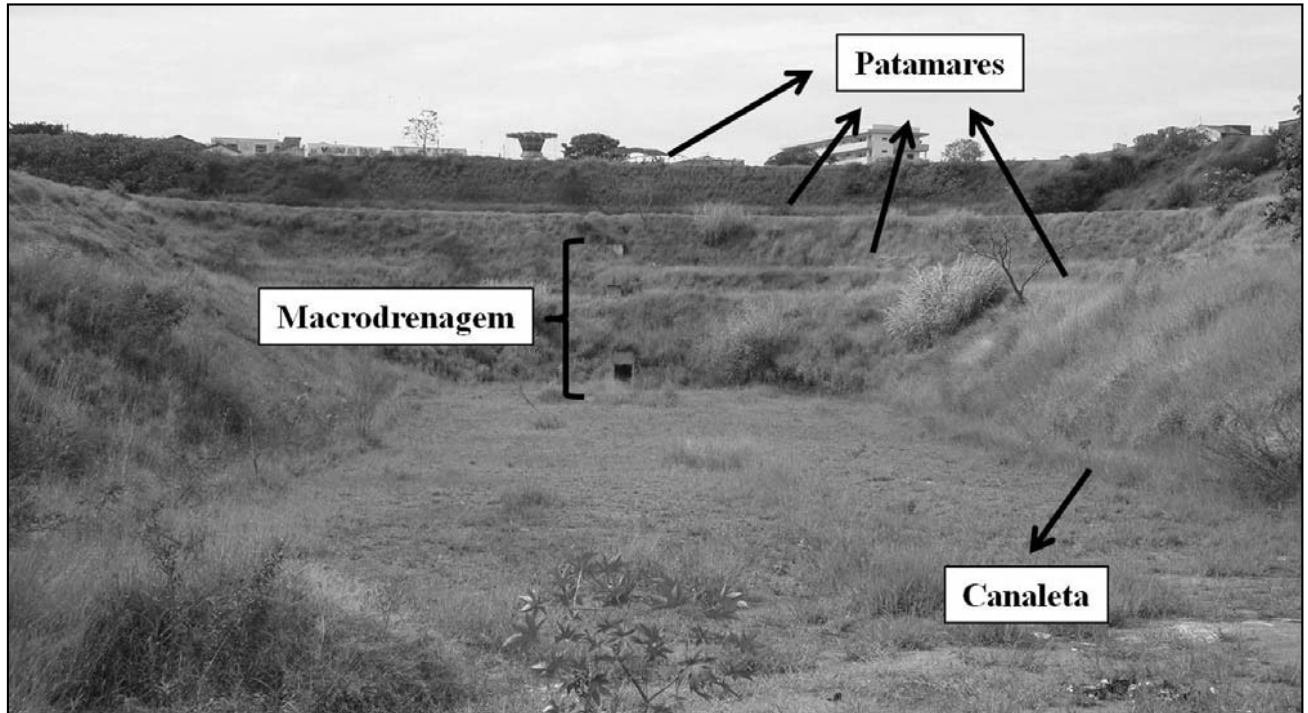


Figura 7. Feição recuperada por retaludamento em associação às obras de micro e macrodrenagem.

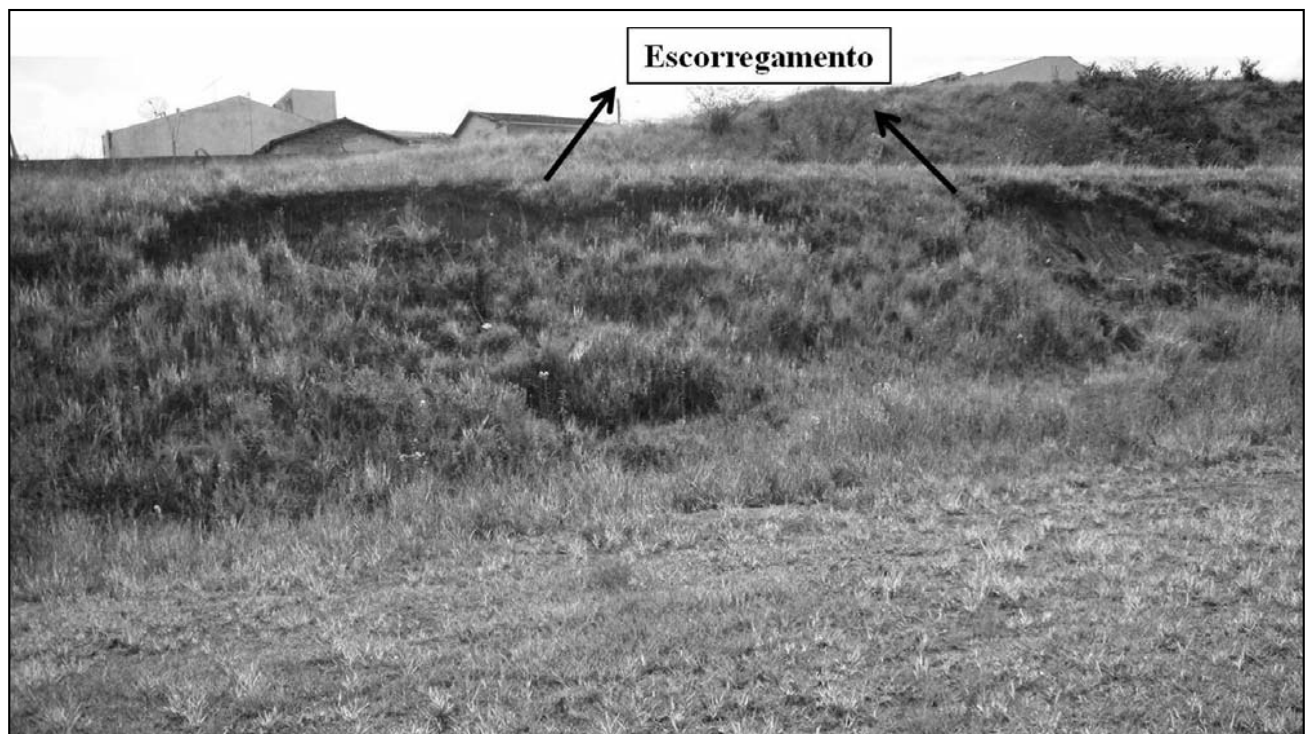


Figura 8. Escorregamento no talude do patamar inferior.

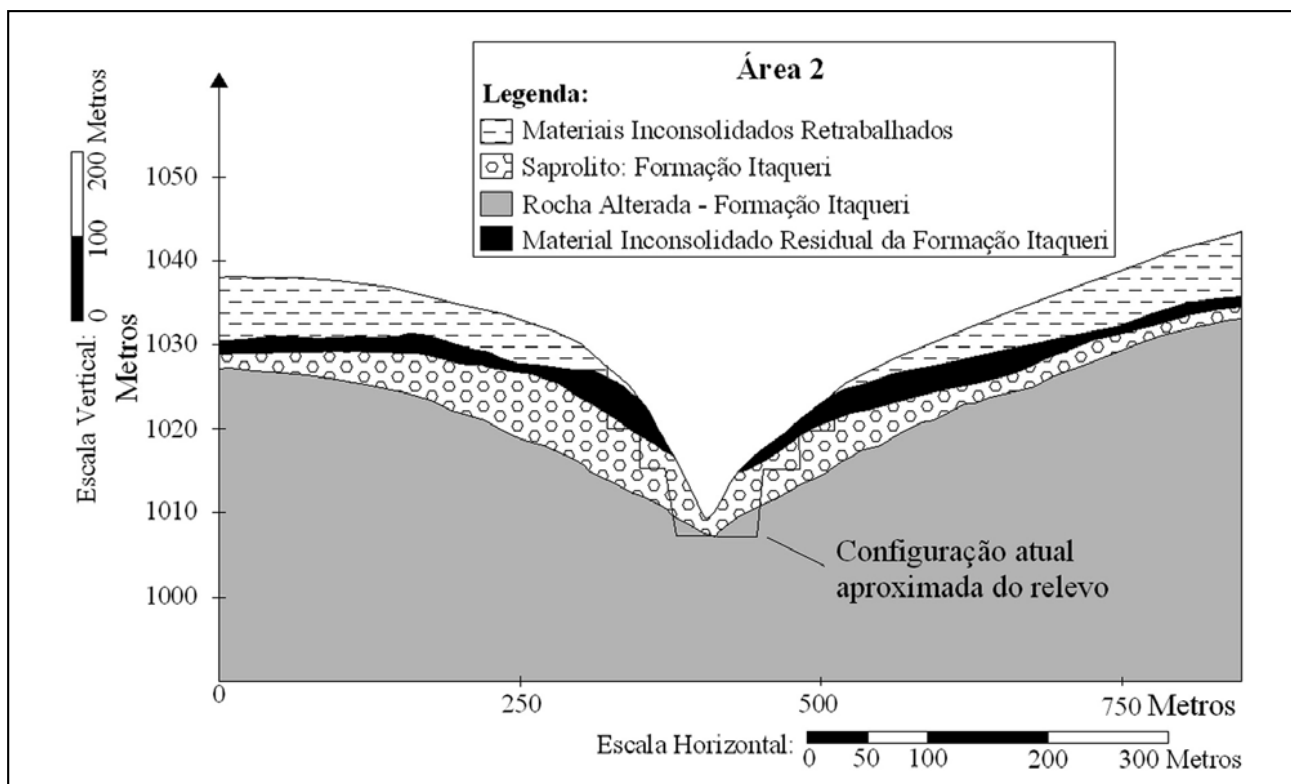


Figura 9. Perfil Geológico com a distribuição dos materiais geológicos e representação da superfície atual e anterior da Área 2 (Sobrelevação 6,7 para facilitar a visualização dos materiais).

**Descrição das medidas de recuperação: Área 3.**

A Área 3 é circundada por um bairro residencial, sendo assim, sua recuperação teve como objetivo conferir um uso à área, em benefício da população local. A reabilitação foi realizada através da construção de um parque, com campos, pista para caminhada, bancos, brinquedos, entre outras estruturas. Para isso, foram realizadas obras de retaludamento e canalização da drenagem, por meio de obras de macrodrenagem (Figura 10).

As bermas principais foram ocupadas por pistas de caminhada, e os trechos inferiores, mais planos, por quadras e outras estruturas de lazer. No geral a área apresenta-se estável, a não ser por surgimento de sulcos nas bases de alguns taludes, como indica a Figura 11, gerados pela concentração de águas pluviais associadas à surgência de água na base de alguns taludes (Figura 12).

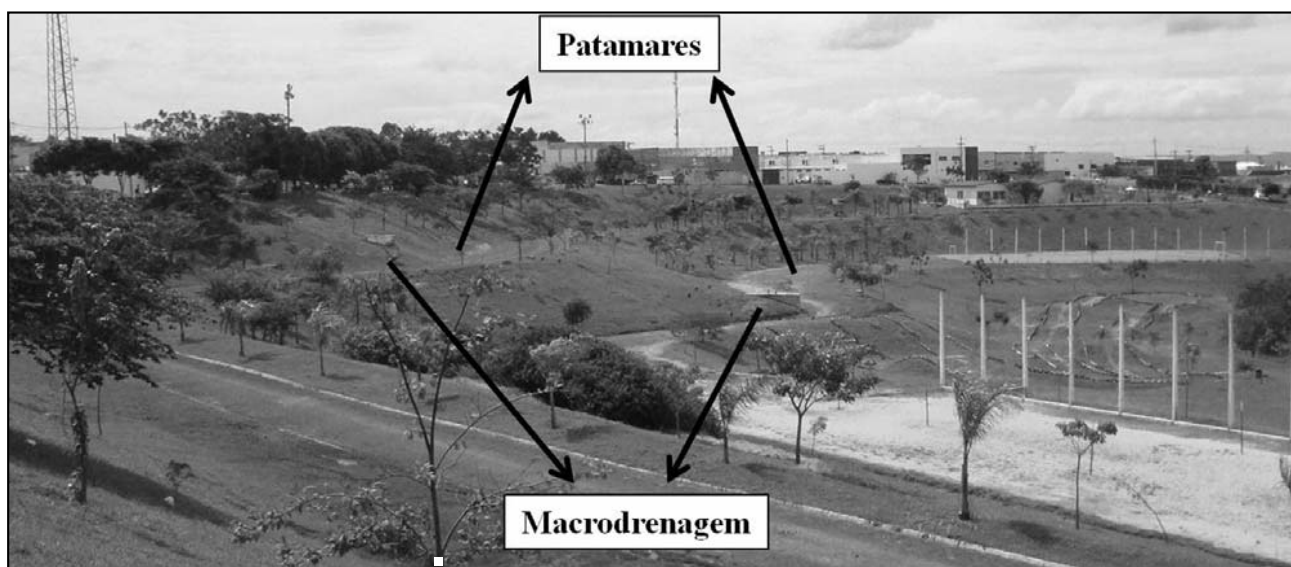


Figura 10. Área reabilitada através da construção de um parque de lazer, com destaque para o retaludamento e obra de macrodrenagem.



Figura 11. Sulcos erosivos em talude da Área 3.

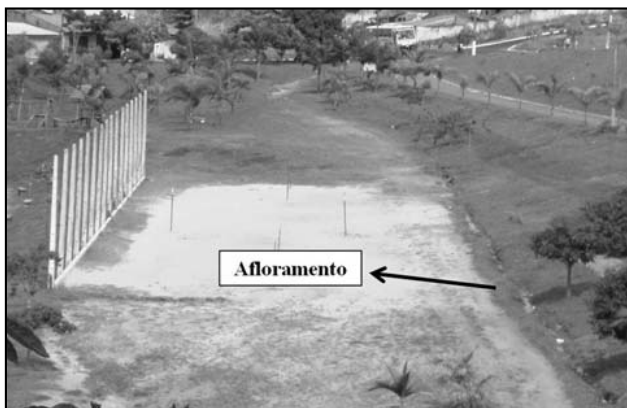


Figura 12. Afloramento de água na base de talude da Área 3.

Observando-se o Perfil da Figura 13, pode-se comparar a configuração original do relevo e a atual, modificada pelas atividades de reabilitação; associadas à disposição dos materiais geológicos. O perfil em questão, gerado a partir da base topográfica de escala 1:12.500, apresenta exagero vertical igual a 10, para facilitar a visualização dos materiais geológicos.

#### Descrição das medidas de recuperação: Área 4.

Esta área corresponde a uma antiga voçoroca que foi aterrada com resíduos sólidos tanto domiciliares quanto industriais. No início dessa prática a feição funcionava como um lixão, recebendo os resíduos sem nenhuma impermeabilização de base, ou princípio de engenharia. Essa situação mudou após alguns anos de operação, mas apenas nas células subsequentes. Em seguida, as atividades foram interrompidas, mas foram retomadas para a deposição de resíduos industriais, sobretudo rejeitos de couro, acrescidos de cromo; sem respeitar normas ou medidas adequadas. Como resultado dessa prática, os líquidos percolados do aterro foram depositados em um córrego a jusante da feição, contaminando suas águas. A feição da Área 4 encontra-se inserida em um bairro densamente ocupado, próximo a uma grande avenida. Atualmente, verificou-se que a área está estabilizada no que se refere aos processos erosivos, mas o problema de contaminação ainda existe. Além disso, apesar da localização privilegiada, a área não pode ser ocupada por elementos construídos, dado o aterro com lixo. Na Figura 14 a seguir, pode-se observar a configuração atual da área, com a presença de antigos queimadores de gás. Em sequência, na Figura 15, tem-se o perfil da Área 4, que indica a configuração original do relevo e a atual, modificada pelo aterro, em relação aos materiais geológicos. O perfil, também gerado a partir da citada base topográfica, apresenta exagero vertical da ordem de 7,7, para melhor visualização dos materiais topográficos.

#### Descrição das medidas de recuperação: Área 5.

Essa área, assim como as demais, consistia em uma feição erosiva de cabeceira, cuja recuperação envolveu obras de macrodrenagem. Porém, esta se deu através da retificação do canal, sem a canalização do mesmo; e em associação, foram dispostos drenos subsuperficiais e estruturas de encaminhamento da água de escoamento pluvial, com saídas para o canal principal. Além disso, no entorno do canal, foi construída uma pista para caminhada, bancos, brinquedos, e outras estruturas sob a forma de um parque. Na Figura 15, observa-se o perfil geológico desta Área, com a distribuição dos materiais geológicos, e a representação da configuração do relevo.

#### Descrição das medidas de recuperação: Área 6 e Área 7.

As áreas 6 e 7 constituem trechos de canais de drenagem que foram parcialmente canalizados em função da construção de uma rodovia. O trecho dos canais a jusante da rodovia foi alterado de modo a evitar os processos erosivos antes a eles associados, garantindo assim a manutenção da via.

Na Área 6, o canal teve parte canalizada, sendo a tubulação recoberta por aterro. Nesse trecho foram construídas canaletas com o objetivo de recolher a água de escoamento pluvial, e encaminha-la de forma disciplinada até o canal principal, que torna a correr a céu aberto (Figura 18). Nesse ponto, para amenizar a ação concentrada da água, há a presença de um dissipador de energia constituído de blocos de alvenaria, conforme indica a Figura 19. Nessa mesma figura, verifica-se a utilização de estruturas de gabião para reforço da estrutura de macrodrenagem.

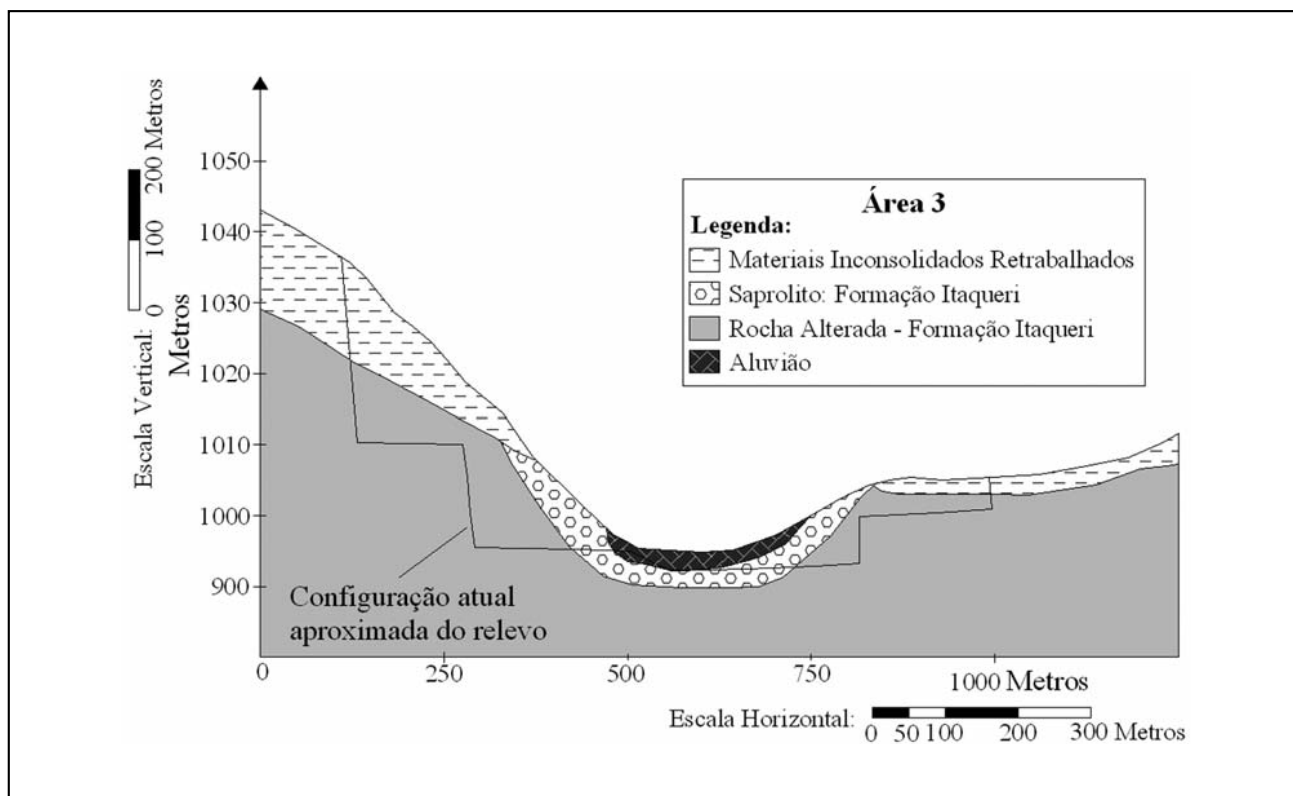


Figura 13. Perfil Geológico com a distribuição dos materiais geológicos e representação da superfície atual e anterior da Área 3 (Sobrelevação 10 para facilitar a visualização dos materiais).



Figura 14. Configuração atual da Área 4, com detalhe de antigos queimadores de gás do aterro sanitário.

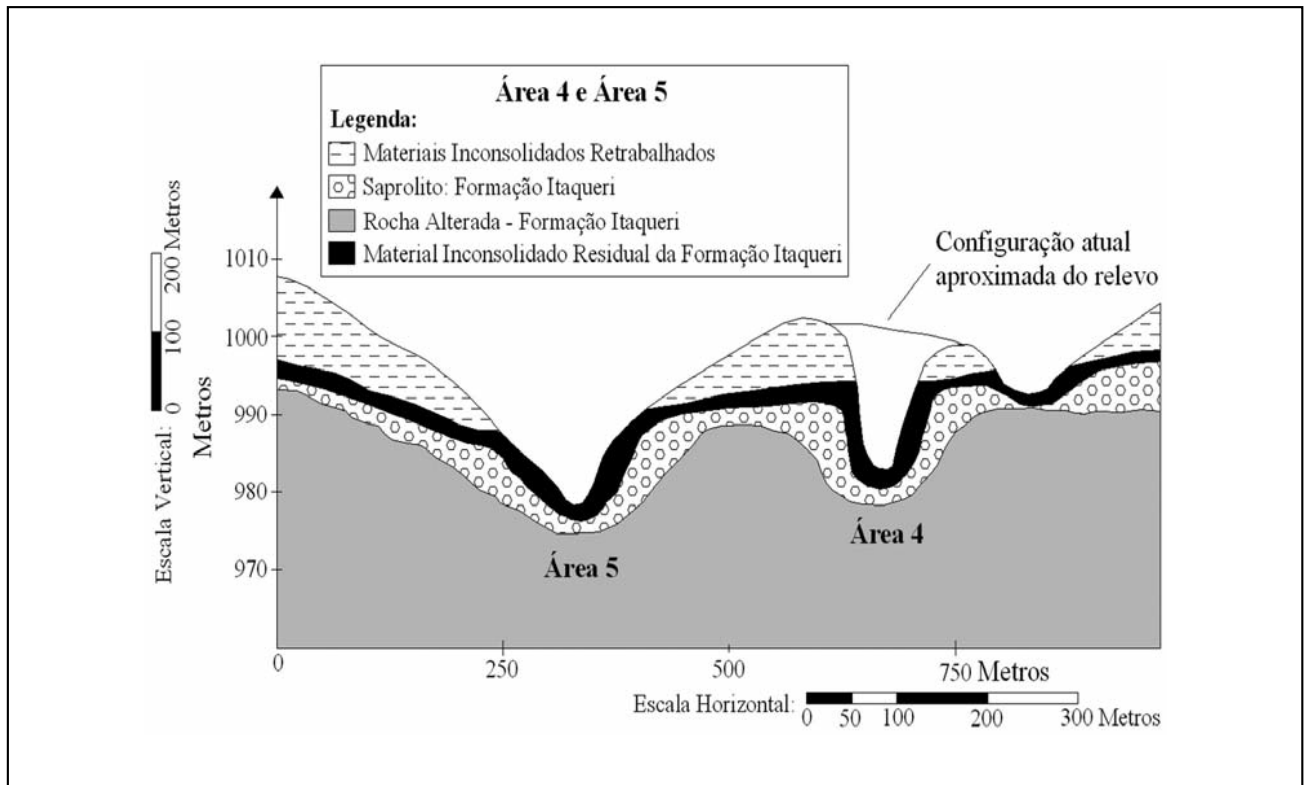


Figura 15. Perfil Geológico com a distribuição dos materiais geológicos e representação da superfície atual e anterior das Áreas 4 e 5 (Sobrelevação igual a 7,7 para facilitar a visualização dos materiais).

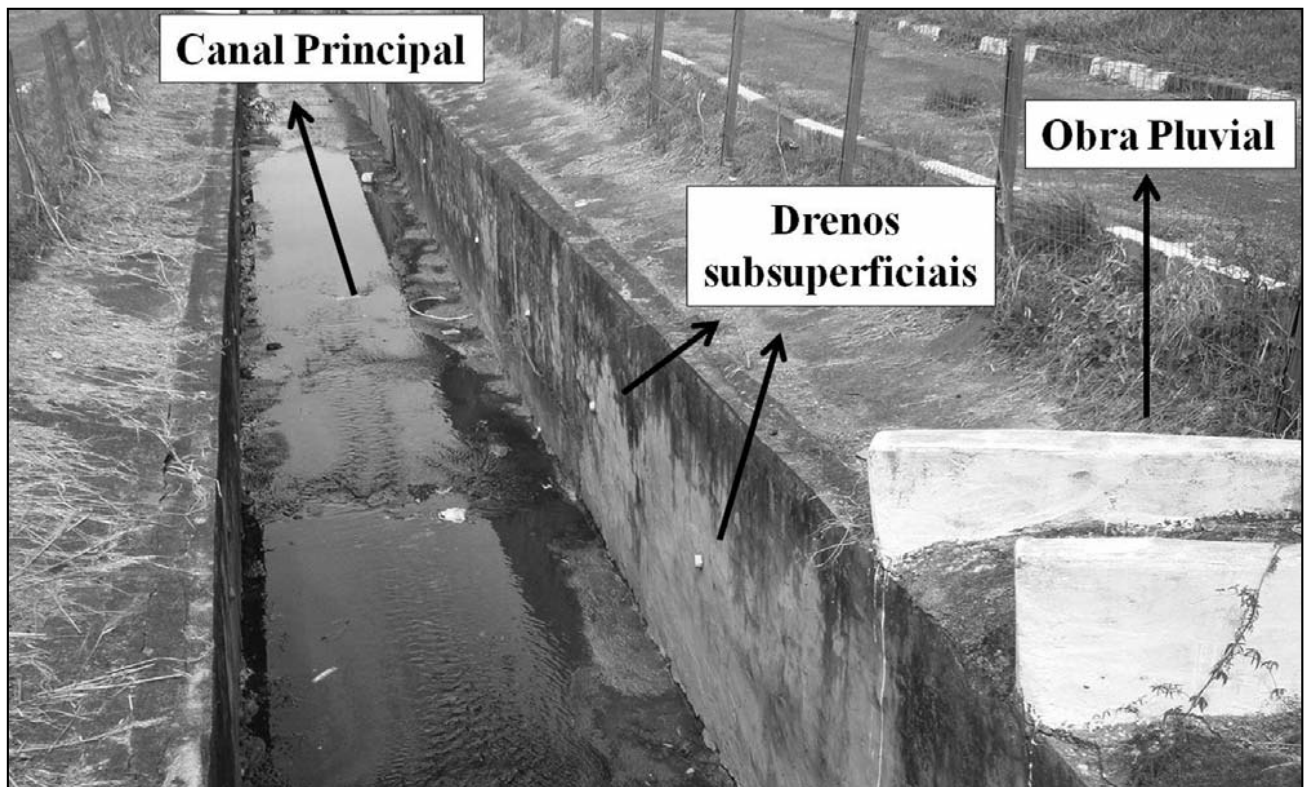


Figura 16. Canal principal com detalhe para os drenos subsuperficiais e obras de drenagem pluvial.



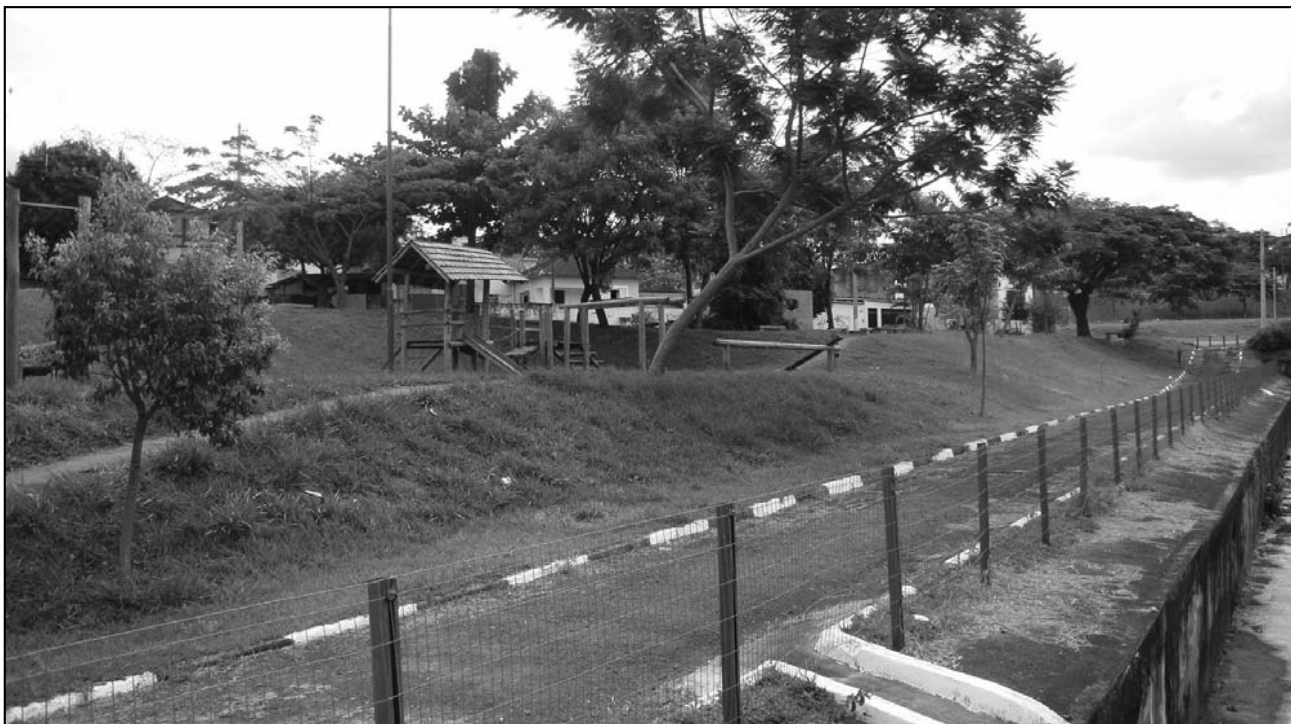


Figura 17. Parque no entorno do canal principal da Área 5.

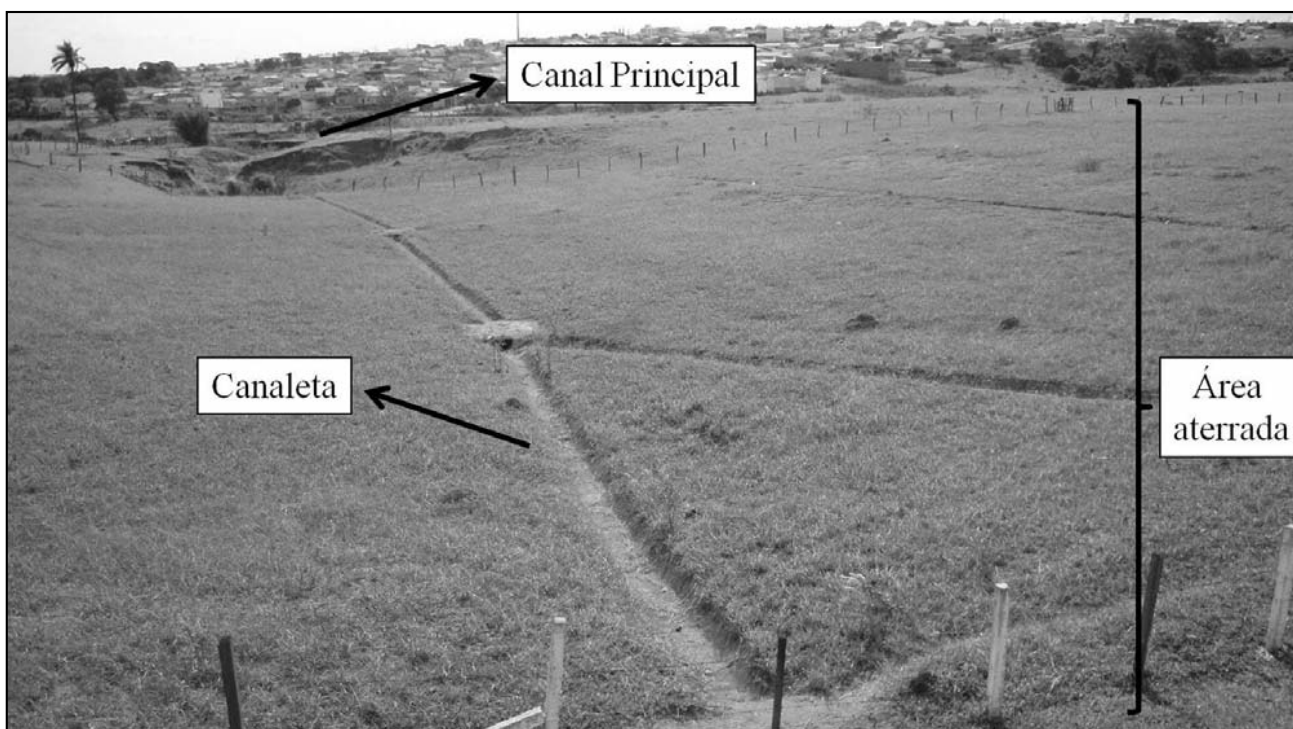


Figura 18. Área aterrada sobre a canalização da drenagem principal da Área 6, com a presença de canaletas para a captação da água de escoamento pluvial.

A Área 7 apresenta configuração muito próxima à Área 6. A drenagem principal foi canalizada, seguida de aterro do trecho próximo à rodovia. Nesse ponto foram construídas canaletas, com o intuito de encaminhar a água pluvial, até o canal principal, de modo a evitar processos erosivos. O canal

principal volta a correr a céu aberto em certo ponto, sendo que, a jusante da abertura de canalização, há um trecho reforçado por telas de arame, configurando um canal bem definido. Porém, a jusante do reforço o canal volta a correr naturalmente (Figura 20).



Figura 19. Fim da canalização do canal de drenagem da Área 6, com a presença de dissipadores de energia na saída da canalização.

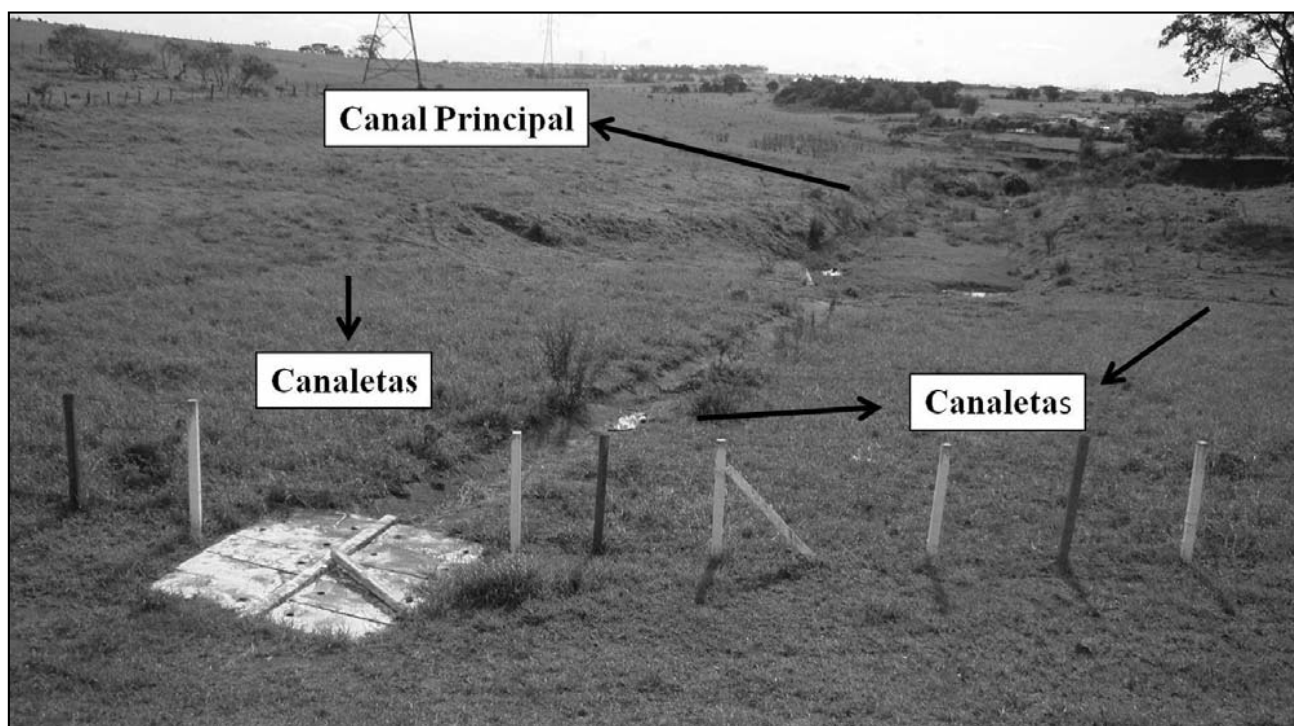


Figura 20. Trecho aterrado com presença de canaletas, seguido do canal principal, sem canalização.

O perfil representado pela Figura 21 indica a disposição dos materiais geológicos, assim como a configuração atual e original do relevo, tanto da Área 6, quanto da Área 7. Este perfil foi gerado a partir da base topográfica de escala 1:12.500, e

apresenta exagero vertical igual a 12,5 com o intuito de melhor representar os materiais geológicos.

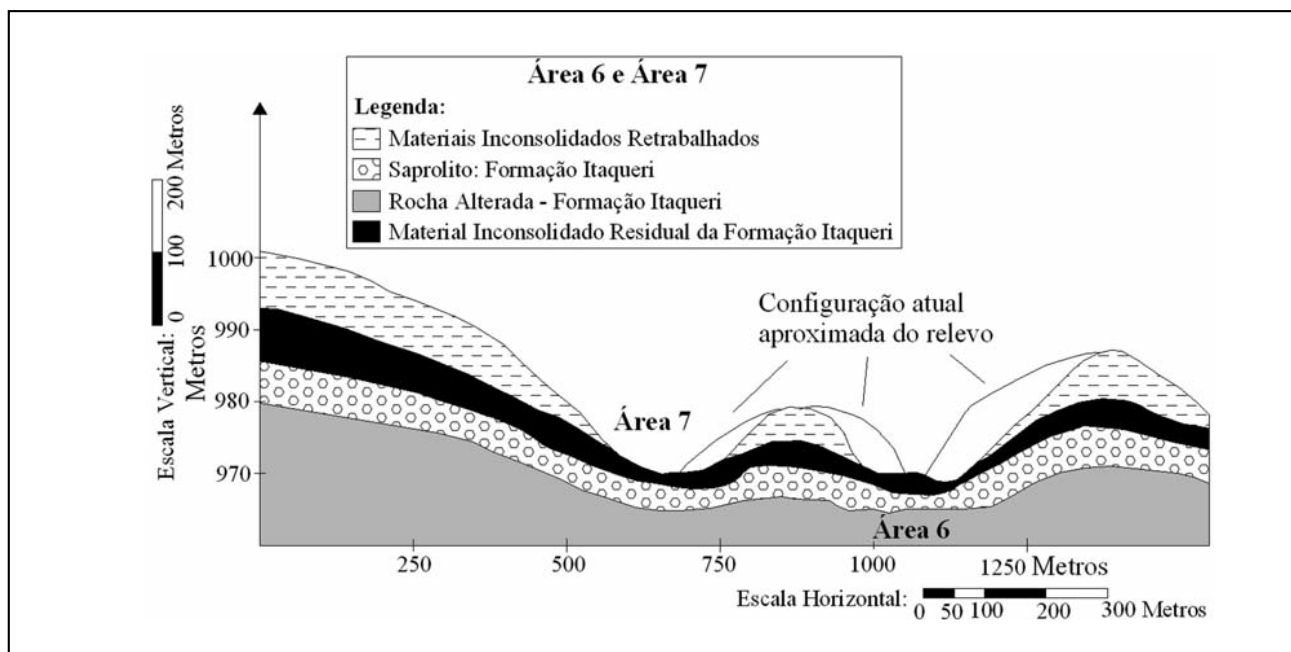


Figura 21. Perfil Geológico com a distribuição dos materiais geológicos e representação da superfície atual e anterior das Áreas 6 e 7.

## ANÁLISE DOS PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO

### Área 1

O processo de recuperação dos processos erosivos da Área 1 teve como principal objetivo controlar a evolução da feição erosiva, sem recuperá-la completamente. Também foi verificada a preocupação em prevenir os processos erosivos nas encostas adjacentes à feição principal. Nesse contexto, as principais considerações acerca do processo de recuperação dos processos erosivos nessa área estão sumarizadas na Tabela 2 a seguir.

### Área 2

A área 2 teve sua feição erosiva totalmente recuperada, porém, o projeto final não conferiu nenhum uso definido para o local. Dado que o entorno dessa feição compreende um bairro bastante povoado, pode-se dizer que o fator social do projeto foi falho, principalmente se considerados os custos associados. A Tabela 3 indica as principais técnicas empregadas nesse local, e as principais considerações sobre as mesmas.

### Área 3

A feição principal da Área 3 foi totalmente recuperada, sendo que foi conferido um novo uso ao local, o que configurou seu projeto como sendo de reabilitação. Esse tipo de ação trás benefícios tanto ambientais, quanto sociais. As principais técnicas empregadas nesse projeto estão descritas e analisadas na Tabela 4.

### Área 4

A Área 4 envolveu a recuperação da voçoroca inicial por meio do aterro com resíduos sólidos. Essa medida, apesar de recuperar totalmente a feição, e de torná-la estável, criou um novo problema ambiental muito mais sério do que o anterior: a contaminação tanto do solo, quanto do nível freático, e da

drenagem localizada a jusante. As principais considerações sobre essa Área estão sumarizadas na Tabela 5.

### Área 5

A Área 5 compreende uma antiga feição de cabeceira, cuja recuperação optou por deixar o canal principal a céu aberto. Em associação à obra de madrodrenagem, foi construído um parque que conferiu um uso por parte da população local. As principais implicações dessas técnicas podem ser observadas na Tabela 6.

### Áreas 6 e 7

Essas áreas apresentaram projetos de recuperação muito semelhantes, sendo que a principal característica dos mesmos relaciona-se à manutenção da rodovia associada, e não das feições erosivas propriamente ditas. As questões relacionadas às técnicas empregadas nessas áreas estão descritas na Tabela 7.

## CONCLUSÃO

O estudo conjunto das características geológico-geotécnicas, do processo erosivo, assim com das medidas de controle e recuperação de erosão de cada área estudada, possibilitou a análise da eficiência e adequação das mesmas. De maneira geral, os processos erosivos foram estabilizados, em quase todas as áreas, porém alguns dos problemas relacionados às técnicas de recuperação se repetiam, sendo estes, principalmente: a não construção ou subdimensionamento de obras de microdrenagem; a ausência de drenos subsuperficiais em áreas de cabeceira e a falta de manutenção das estruturas construídas. Nas Áreas 1, 6 e 7, por sua vez, foram verificados casos onde as medidas adotadas levaram à reativação ou agravamento do processo erosivo, indicando claramente a ausência de critérios técnicos para escolha e dimensionamento das estruturas.

Outra questão importante que se verificou com esse trabalho refere-se à alteração da configuração original do relevo.



Tabela 2. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas na Área 1.

Técnica empregada	Considerações
<b>Aterro</b>	O aterro parcial da feição mostrou-se efetivo no controle do avanço da principal feição erosiva do local. Foi utilizado solo do próprio local, com a presença de algumas estruturas de micro e macrodrenagem associadas, buscando a manutenção dessa medida. A presença de drenos ou de estruturas de macrodrenagem é essencial para a eficiência desse tipo de técnica, assim como a análise da viabilidade do material inconsolidado a ser empregado.
<b>Barragem de bloco de rochas</b>	Essa estrutura mostrou-se eficiente no controle do processo erosivo desse local, uma vez que sua função era barrar o escoamento acelerado, impedindo-o de alcançar trechos estáveis da voçoroca. Esse tipo de estrutura deve envolver uma série de questões técnicas relacionadas ao material a ser utilizado, as estruturas de drenagem que devem ser empregadas de forma associada, entre outros.
<b>Revegetação</b>	A revegetação é uma medida bastante usada para o controle e prevenção de erosão. No caso da área 1 essa medida não foi empregada de forma correta, uma vez que as mudas mostraram baixo desenvolvimento. A escolha das espécies a serem empregadas deve envolver análises do solo e também do clima da região, sendo que espécies nativas devem ser priorizadas. Outro problema que essa técnica apresentou foi o surgimento de um canal preferencial para o escoamento nas cavas do plantio.
<b>Microdrenagem</b>	Essa técnica foi observada sob a forma de canaletas ao longo das encostas, que encaminham a água de escoamento para uma tubulação a montante da barragem. Verificou-se que o número de canaletas ao longo da área é baixo, indicando a ausência de cálculos de vazão e relativos à área de captação dessa drenagem. As declividades em que essa técnica foi empregada eram muito elevadas, o que contribui para a formação do escoamento acelerado. E ainda, identificou-se que não há manutenção dessas estruturas, dada a presença de solo e de vegetação em seu interior.
<b>Cordões em Nível</b>	Estes mostraram-se eficientes na prevenção dos processos erosivos nas encostas, de modo que as dimensões do cordão, e o espaçamento entre estes seguiu o recomendado. E ainda, verificou-se que atividades de manutenção dessas estruturas são periodicamente realizadas.
<b>Cobertura vegetal de gramínea</b>	A presença de cobertura vegetal de gramínea nas encostas, associada aos cordões de nível mostrou-se eficiente no processo de prevenção do processo erosivos no local.

Tabela 3. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas na Área 2.

Técnica empregada	Considerações
<b>Retaludamento</b>	O retaludamento foi bem executado, dada a estabilidade da feição, verificada em campo. No último patamar foram identificados escorregamentos, conseqüentes da alteração da geometria original dos taludes, que expôs a superfície materiais geológicos mais suscetíveis à erosão.
<b>Macro drenagem</b>	Esse tipo de técnica envolve altos custos, sendo assim, o projeto prévio deve ser bem executado, evitando-se falhas, e buscando-se alterar o mínimo possível as condições naturais locais. Nessa área foi adotada a canalização subterrânea do canal de drenagem. Essa estrutura foi bem dimensionada, encaminhando o fluxo do canal principal para um trecho a jusante, de forma disciplinada.
<b>Microdrenagem</b>	Essa técnica foi observada sob a forma de canaletas na base dos taludes dos diferentes patamares. Essa estrutura foi bem dimensionada, porém verificou-se a ausência de manutenção da mesma, dada a presença de solo e de vegetação no seu interior, o que pode levar ao acúmulo de água, e até mesmo o surgimento de escoamento entre os patamares em períodos mais chuvosos.
<b>Cobertura vegetal de gramínea</b>	A presença de cobertura vegetal de gramínea nos taludes e bermas mostraram-se bastante eficiente na manutenção dessa estrutura.

Tabela 4. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas na Área 3.

Técnica empregada	Considerações
<b>Retaludamento</b>	O retaludamento realizado nessa área foi bastante efetivo, recuperando totalmente a feição inicial. Sua aplicação buscou alterar o mínimo possível a configuração original do relevo. Porém, em alguns taludes verificou-se o afloramento de água. Dada essas condições, verifica-se a necessidade da adoção de drenos em áreas de cabeceira, ou de estruturas de microdrenagem que evitem as formações de escoamentos acelerados, sobretudo em períodos chuvosos. Observou-se também a presença de sulcos em alguns pontos dessa área, indicando a necessidade de obras de microdrenagem, inexistentes no local, dada a alta suscetibilidade dos materiais geológicos.
<b>Macro drenagem</b>	Nessa área foi adotada a canalização subterrânea do canal de drenagem. Essa estrutura foi bem dimensionada, encaminhando o fluxo do canal principal para um trecho a jusante, de forma disciplinada.
<b>Cobertura vegetal de gramínea</b>	A presença de cobertura vegetal de gramínea nos taludes e bermas mostrou-se bastante eficiente, porém verifica-se a necessidade de manutenção dessa estrutura, uma vez que a área é bastante frequentada, envolvendo o pisoteamento dessa vegetação.

Tabela 5. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas na Área 4.

Técnica empregada	Considerações
<b>Aterro com resíduos sólidos</b>	O aterro de uma área com resíduos sólidos deve envolver uma séria de questões de engenharia, tais como a impermeabilização de base, a construção de drenos para encaminhamento do chorume, entre outras. Dado que a Área 4 consistia em uma antiga voçoroca de cabeceira, e conhecida a ausência de técnicas de preparação para recebimento de resíduos, pode-se afirmar que essa medida foi totalmente inadequada, mesmo com a estabilidade física atual. A escolha de uma área para aterro com lixo deve ser criteriosa, assim como a adoção de medidas de preparação do local. A prática de aterrar feições erosivas com lixo, apesar de comum no Brasil, é inadequada, dado o impacto ambiental e social decorrentes.
<b>Microdrenagem</b>	No que se refere aos processos erosivos, verificou-se que a área não apresenta estruturas de drenagem, de modo que situações de escoamento acelerado podem ser geradas, vindo a reativar os processos erosivos.
<b>Cobertura vegetal de gramínea</b>	A presença de vegetação de gramínea no local contribui para a prevenção da reativação dos processos erosivos no local.

Tabela 6. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas na Área 5.

Técnica empregada	Considerações
<b>Macro drenagem</b>	O canal da Área 5 foi retificado, e não canalizado como em muitos casos. Em associação foram dispostos drenos subsuperficiais na área de entorno do canal, com saídas para o mesmo, o que contribuiu para o sucesso do processo de recuperação dessa área, sobretudo na manutenção das encostas laterais aos canais. Essas estruturas necessitam de dimensionamento prévio da vazão para determinar condições estruturais essenciais. Caso contrário, em períodos mais chuvosos as estruturas podem ser destruídas, e o processo erosivo reativado.
<b>Microdrenagem</b>	Foram também construídas estruturas de encaminhamento das águas pluviais para o canal principal, contribuindo para a manutenção das encostas laterais. O dimensionamento dessas estruturas mostrou-se adequado, garantindo o sucesso do conjunto de técnicas aplicadas.

Tabela 7. Análise da eficiência das técnicas de recuperação de erosão empregadas nas Áreas 6 e 7.

Técnica empregada	Considerações
<b>Macro drenagem</b>	Os canais principais foram parcialmente canalizados, e em certo ponto retornaram ao escoamento a céu aberto. Nos dois casos as estruturas de macrodrenagem foram mal dimensionadas, uma vez que, à jusante do fim da canalização, o processo erosivo foi acelerado, levando ao surgimento de novas voçorocas de grande porte. A concentração do fluxo desses canais exige uma maior preocupação com a continuidade do canal. O dimensionamento das estruturas de drenagem, nesse caso, deve ser criterioso, assim como de técnicas a serem utilizadas em associação.
<b>Microdrenagem</b>	Além da canalização do canal principal, foram utilizadas canaletas para concentração da água de chuva, e encaminhamento da mesma até o canal principal. Essas estruturas têm ainda função de proteger o aterro do trecho em que o canal principal está canalizado. Em termos de eficiência, as canaletas mostram-se insuficientes, uma vez que algumas dessas estruturas foram destruídas. Outra questão associada às canaletas consiste na concentração do fluxo junto ao canal principal, na saída da canalização, contribuindo assim para a evolução das feições de grande porte encontradas a jusante dessa estrutura.
<b>Aterro</b>	O aterro do trecho mais próximo à rodovia, em que o canal principal foi canalizado mostrou-se bastante estável, dada a presença das estruturas de drenagem à ele associadas.
<b>Dissipador de Energia</b>	Na Área 6, foram dispostos blocos de concreto na saída da tubulação para diminuir a velocidade do escoamento do canal principal. Porém, dado o surgimento de uma nova feição a jusante, tem-se que essa estrutura foi ineficiente. Sua aplicação deve considerar a vazão de escoamento, de modo a determinar aspectos estruturais.
<b>Gabião</b>	Na Área 6, estruturas de gabião foram empregadas para reforçar o aterro e a macrodrenagem, sendo esse objetivo alcançado com êxito.
<b>Telas de arame</b>	Na Área 7, telas de arame foram dispostas nas bordas no canal principal, após a abertura da canalização. Essa técnica foi eficiente em garantir a estabilidade das margens do canal nesse ponto. Porém a ausência dessa estrutura ao longo de todo o canal contribuiu para a evolução de uma feição erosiva de grande porte a jusante.

Em muitos casos a modificação do relevo acaba expondo materiais geológicos que não afloravam, alterando assim o comportamento desse local frente aos processos erosivos.

A partir dessas considerações e das análises individuais de cada área, pode-se concluir que os principais problemas relativos à recuperação de áreas degradadas relacionam-se com a não consideração das características ambientais, e das características dos materiais geológicos. Soma-se ainda a falta de estudos

de adequação das medidas a serem empregadas, tanto no que diz aos atributos físicos, quanto ao cenário social em que se inserem. A falta de estudos e de maiores critérios na execução dos projetos de recuperação, em alguns casos, levou a ocorrência de perdas tanto econômicas quanto ambientais, indicando assim a necessidade de mudança de paradigma das ações de recuperação de áreas degradadas por erosão no Brasil.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- AYRES, Q. C. (1936)  
Soil Erosion and its Control.  
*McGraw Hill Book Company, New York and London, 365p.*
- BERTONI, J. E LOMBARDI NETO, F. (1993)  
Conservação do solo.  
*3 ed. São Paulo: Editora Ícone, 355p.*
- BIDONE, F. E TUCCI, C. E. M. (1995)  
Microdrenagem.  
*In: Tucci, C. E. M., Porto, R. L. L., Barros, M. T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cap.3, pp.77-106.*
- DAEE (1989)  
Controle de erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para planejamento urbano e regional; orientação para o controle de boçorocas urbanas.  
*2ª ed. São Paulo: DAEE/IPT.*
- FAO. (1986)  
Manual gully control.  
*Rome, Itália. 20p.*
- FENDRICH, R. (1997a).  
Erosão Urbana.  
*In: Fendrich, R. et al. Drenagem e controle da erosão urbana. Curitiba: Editora Ibrasa/Champagnat, cap. 1, pp.17-49.*
- FENDRICH, R. (1997b).  
Hidrologia aplicada.  
*In: Fendrich, R. et al. Drenagem e controle da erosão urbana. Curitiba: Editora Ibrasa/Champagnat, cap. 3, pp.125-194.*
- KOEPPEN, W. (1948).  
Climatología, com um Estudio de los Climats de la Tierra.  
*Mexico: Fondo de Cultura Economica, 478p.*
- LAL, R. (1990)  
Soil erosion in the tropics - principles and management.  
*McGraw-Hill, New York, 580p.*
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J. N. AND RICKSON, R. J (1994).  
Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: EUROSEM approach.  
*Outlook on Agriculture, v.3, pp.5-9.*
- MORGAN, R.P.C. (1995)  
Soil erosion & Conservation.  
*EUA: Editora Essex, Longman Scientific & Technical, 3th, 298p.*
- OREA, D.G. (2004).  
Recuperación de espacios degradados.  
*Ediciones Mundi\_prensa. Madrid.584pp.*
- RIDENTE JUNIOR, J.L. (1999)  
Caracterização de erosões e diretrizes para o controle corretivo e preventivo em bacias de contribuição do alto do Araguaia, GO/MT.  
*In: 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. ABGE. São Pedro, São Paulo.*
- SALOMÃO, F. X. T. E IWASA, O. Y. (1995)  
Erosão e ocupação rural e urbana.  
*In: Bitar, O. Y. Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. pp. 31-57.*
- SOUZA, M. L. (2001)  
Proposta de um Sistema de Classificação de Feições Erosivas voltados a Estudos de Procedimentos de Análises de Decisões quanto a Medidas Corretivas, Mitigadoras e Preventivas: Aplicação no Município de Umarama (PR).  
*Tese (Doutorado). UNESP. Rio Claro. 284p.*
- TRAGSA, TRGSATEC Y MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (1998)  
Rhidrológico florestal de cuencas y control de la erosion.  
*Editora Mundi-Prensa. Madrid. 946pp.*

ZACHAR, D. (1982)

Soil erosion.

*Elsevier Scientific Publishing Company. Zvolen, Czechoslovakia. 547p.*

ZUQUETTE, L. V., PEJON, O. J., SINELLI, O., GANDOLFI, N. (1994)

Carta de riscos potenciais à erosão - Cidade de Franca (SP), Escala 1:25.000 (Brasil).

*In: RICALDI, V., FLORES, C., ANAYA, L., PRADEL, F. Investigaciones sobre los riesgos geológicos em ciudades de America Latina.*



## Aptitud de dos sedimentitas rojas cretácicas del departamento Confluencia, Neuquén, para ser usadas como barreras aislantes en rellenos sanitarios

### Suitability of two red cretaceous sedimentary rocks from Confluencia department, Neuquén, to be used as isolation barriers in landfills

Musso, T.B. <sup>1-2</sup> ✉ - Pettinari, G. <sup>1</sup> - Francisca, F.M. <sup>2-3</sup>

Recibido: 29 de Marzo de 2012 • Aceptado: 05 de Diciembre de 2012

#### Resumen

*En este trabajo, se presenta la caracterización de dos sedimentitas de grano fino del departamento Confluencia, Neuquén, que forman parte de las formaciones Huincul y Anacleto (Grupo Neuquén - Cretácico Superior) con el objetivo de determinar su aptitud para ser usadas como materiales para impermeabilizar la base de rellenos sanitarios. Las muestras fueron extraídas de dos canteras inactivas de arcillas rojas, explotadas como materia prima para la industria de la cerámica, y representan el material que se comercializaba para este fin. Los resultados fueron comparados con una bentonita sódica natural comercial la cual se utilizó como material de referencia. En función de la distribución del tamaño de partículas, las sedimentitas se clasifican como una fangolita (F. Huincul) y una arcilita (F. Anacleto). La mineralogía de la fracción arcilla de estas sedimentitas está representada principalmente por un interestratificado I/S tipo RO (55-80% Sm). Las sedimentitas rojas ensayadas cumplieron con los requisitos de conductividad hidráulica estipulados por la legislación internacional para su uso como barrera impermeable ( $< 1 \times 10^{-9}$  m/s). Su capacidad de intercambio catiónico, como también la plasticidad y compresibilidad de las mismas, demostraron un comportamiento satisfactorio para su uso en rellenos sanitarios. En mezclas con una arena mal seleccionada, el agregado de un 15% de la arcilita de la Formación Anacleto permitió superar el requisito legal de conductividad hidráulica, mientras que la fangolita de la Formación Huincul no cumplió con dicha condición. No obstante, a diferencia de una bentonita sódica natural, estas sedimentitas podrían ser utilizadas sin ser mezcladas con otros materiales naturales (suelos o arena) por su baja compresibilidad y menor potencial expansivo. El uso de los materiales ensayados en el diseño de sistemas de impermeabilización de rellenos sanitarios constituiría una alternativa efectiva no sólo porque cumplen con los requisitos técnicos estipulados para este fin, sino también por su abundancia y bajo costo de extracción en el área de estudio.*

**Palabras clave:** barreras arcillosas impermeables, rellenos sanitarios, conductividad hidráulica

1. CIMAR. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires, 1400, 8300 Neuquén, Argentina.

2. CONICET. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

3. Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5016 Córdoba, Argentina.

✉ telma.musso@fain.uncoma.edu.ar

## Abstract

In this study, two fine-grained sedimentary rocks from Huincul and Anacleto formations (Neuquén Group - upper Cretaceous) from Confluencia department, Neuquén, were tested to evaluate the potential of these materials for the construction of compacted clay liners in landfills. The samples were extracted from two inactive quarries of red clays, previously used as raw material for ceramic industry, and represent this commercial material. The results were compared with a commercial and natural sodium bentonite from this region, which was used as a reference material. According to the grain size analyses these rocks are classified as a mudstone (F. Huincul) and a claystone (F. Anacleto). The mineralogy of the clay fraction is dominated by a random (R0) IIS mixed-layer mineral (55-80% Sm). Obtained results of hydraulic conductivity, cation exchange capacities, plasticity and compressibility indexes show that powdered claystone and mudstone from Huincul and Anacleto formations meet international specifications for the construction of landfill liners. Mixtures with a well graded sand containing 15% of the powdered claystone from Anacleto Formation showed a hydraulic conductivity one order of magnitude below the legal specifications. On the other hand, the same mixture with Huincul mudstone did not meet the hydraulic conductivity requirement. However, in contrast to a natural sodium bentonite, these rocks could be used without mixing with other components (soils or sand) because of their low compressibility and swelling behaviour. Results show that the tested materials can be effectively utilized as a component of a barrier design in sanitary landfills not only because of the hydraulic behavior and chemical and mineralogical properties, but also due to their abundance and low cost of mining within the studied area.

**Keywords:** compacted clay liners, landfills, hydraulic conductivity.

## INTRODUCCIÓN

Para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), las tendencias mundiales sugieren realizar una gestión integral donde se establezca una jerarquía u orden de preferencia en el tratamiento, que consiste en: a) minimización de residuos, b) reciclaje y reutilización, c) transformación y d) vertido en rellenos sanitarios (Tchobanoglous et al., 1993). A pesar de ello, una de las técnicas más ampliamente utilizadas y aceptadas en los países en desarrollo, es la del vertido de residuos sin ningún tratamiento previo.

La disposición de los residuos en rellenos sanitarios es el principal método de disposición en Argentina. El mismo requiere de un diseño ingenieril de las barreras de aislamiento y cobertura, así como también control del lixiviado y de los gases que allí se generan. El principal objetivo de los sistemas de sellado de los rellenos sanitarios modernos es aislar el contenido del mismo del entorno que lo rodea protegiendo al suelo y al agua subterránea de la contaminación. La principal fuente de contaminación en un repositorio la constituyen los lixiviados que se generan en el mismo los cuales deben su formación al ingreso de agua de diferentes orígenes (precipitación directa, agua subterránea, escorrentía superficial y líquidos generados por la descomposición de la basura) (Bonaparte, 1995; Bouazza y Van Impe, 1998). El diseño de los repositorios varía entre diferentes países y dentro de un mismo país, dependiendo de las prácticas y estrategias de manejo de residuos de cada lugar. La mayoría de los sitios de disposición modernos están contruidos siguiendo el principio que establece la existencia de una barrera constituida por un sistema compuesto (geotextil y/o geomembrana + barrera arcillosa) (Manassero et al., 2000; Czurda, 2006).

En la tecnología de barreras de residuos son usadas diversas variedades de arcillas comerciales como bentonitas sódicas y cálcicas, sepiolitas, paligorskitas y caolinitas (Keith, 2000). Con el objetivo de disminuir los costos de estos materiales los suelos naturales pueden ser mezclados con diversas arcillas con el objeto de reducir su conductividad hidráulica (Daniel, 1993; Benson et al., 1994; Francisca et al., 2009).

La conductividad hidráulica es el principal requerimiento en la evaluación de los materiales que se utilicen como barreras impermeables. Según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, 1993) y las Directivas del Consejo Europeo (Comisión Europea, 1999) referentes a la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) y peligrosos, la conductividad hidráulica de los mismos debe ser del orden de  $1 \times 10^{-9}$  m/s o menor. Otro criterio de aplicación general es que el material debe poseer una alta capacidad de intercambio catiónico (Taba y Kabir, 2003), alta plasticidad y bajo contenido de material granular grueso.

En el país, como mínimo el 44% del total de los RSU que se generan son vertidos en forma inadecuada, ya sea en basurales a cielo abierto o en sitios que no cuentan con los controles mínimos requeridos para una adecuada preservación de la salud humana y del ambiente (OPS, 2002). En la región oeste de la Norpatagonia Argentina, sólo la ciudad de Neuquén posee un relleno sanitario que tiene en cuenta principios mínimos de ingeniería sanitaria para la adecuada disposición final de residuos. El resto de los municipios, de mediana y pequeña envergadura, vierten sus residuos en basurales a cielo abierto, muchos de los cuales están localizados en zonas de alta fragilidad ambiental.

En las inmediaciones de la ciudad de Neuquén, existen numerosos afloramientos de sedimentitas fluvio-continuales del Grupo Neuquén que han sido objeto de estudios geológicos sobre la estratigrafía regional, desde fines del siglo XIX, por varios autores (Doering, 1882; Keidel, 1907; Wichmann, 1927; Frenguelli, 1930; Roll, 1938; Cazau y Uliana, 1973; Ramos, 1981; Uliana y Dellapé, 1981; Legarreta y Gulisano, 1989; Espejo y Nieto, 1999; Hugo y Leanza, 2001a,b). Dada la importancia de su distribución areal y su reserva potencial, estos materiales también fueron caracterizados con el fin de conocer su aptitud de uso sobre todo para ser utilizados en la industria de la cerámica roja para la fabricación de ladrillos estructurales y tejas y como componentes minoritarios en pastas para la producción de pisos y revestimientos (Di Paola y Marchese, 1970; Giusiano y Ludueña, 1989; Danderfer y Vera, 1992; Danieli y Giusiano, 1992; Pettinari, 1995; Pettinari y Giusiano, 2011).

Tales antecedentes han permitido identificar niveles arcillosos de interés que potencialmente podrían ser utilizados como barreras impermeables para aislar el fondo y los laterales de las celdas donde se depositan los residuos en los rellenos sanitarios.

El objetivo de este trabajo es caracterizar dos sedimentitas rojas del Depto. Confluencia, antiguamente explotadas para ser usadas en la industria de la cerámica, desde un punto de vista mineralógico, fisicoquímico, químico, geotécnico e hidráulico para evaluar su aptitud para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra comprendida en la porción suroriental de la Cuenca Neuquina, Patagonia Septentrional Argentina (Figura 1). El relleno de la Cuenca Neuquina es subdividido en tres superciclos sedimentarios: Jurásico (Triásico Tardío-Jurásico Tardío), Ándico (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) y Riográndico (Cretácico Tardío-Paleoceno Temprano) (Groeber, 1953). En particular, el tercer superciclo incluye el Grupo Neuquén y el Grupo Malargüe. Los niveles portadores de pelitas rojas objeto de la presente investigación pertenecen estratigráficamente al Grupo Neuquén: Subgrupo Río Limay (Formación Huincul) y Subgrupo Río Colorado (Formación Anacleto). En el área de estudio, la Formación Huincul está constituida por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, con moderada selección. Hacia la parte media-superior se intercalan limos y arcilitas de color rojo y verde claro, alcanzando toda la secuencia una potencia de 200 m (Cazau y Uliana, 1973, Danderfer y Vera, 1992). El ambiente de deposición para esta formación ha sido descrito como fluvial. Por su parte, la Formación Anacleto, en la zona de las bardas de la ciudad de Neuquén, está conformada por estratos de areniscas grises y pelitas rojas, correspondientes a facies aluvio-fluviales, con una potencia de hasta 150 m (Heredia y Calvo, 2002).

Estudios específicos sobre la litología y mineralogía de los sedimentos pelíticos de estas formaciones en el área de estudio, han demostrado que existe una escasa variabilidad de la misma en dichos niveles (Pettinari, 1995, Pettinari et al., 1999, Pettinari y Giusiano, 2011).

Los afloramientos seleccionados corresponden a canteras inactivas de extracción de arcillas rojas que eran utilizadas en la industria de la cerámica (Figura 1, 2 y 3). En el caso de la F. Huincul se trata de "Mina Elizabeth III", conformada por tres pertenencias de 200 x 300 m (Dirección Provincial de Minería, 1978). En el caso de la F. Anacleto se trata de una explotación no declarada, que en este trabajo se denominará "Kartódromo Centenario", que abarca una superficie aproximada de 100 x 100 m. En cada sitio se tomaron muestras en canaleta del estrato pelítico que se explotaba, en distintos puntos del antiguo frente de explotación. Estas muestras fueron combinadas para obtener una única muestra representativa por formación del material que se comercializaba en cada cantera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Los materiales ensayados consisten en una fangolita roja maciza de la Formación Huincul (denominada ME) y una arcilita pardo rojiza de la Formación Anacleto (denominada KCE), aflorantes en el sector Este de la Cuenca Neuquina, Argentina (Figura 1, 2 y 3). En forma paralela, se utilizó como referencia

una bentonita sódica natural local, de denominación comercial CATAE, perteneciente a la Formación Allen (Musso et al., 2010).

En este trabajo, los materiales seleccionados se evalúan en forma pura y en mezclas con arena. Dichas mezclas se realizaron utilizando un 15% de la fangolita y arcilita en la mezcla. La arena seleccionada para este estudio se clasifica como bien graduada (SW) de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura de la arena es de  $C_u = 8$  y  $C_c = 1,4$ , respectivamente.

### Metodología

#### Muestreo de los niveles de sedimentitas rojas

El nivel de fangolitas rojizas macizas de la F. Huincul posee un espesor promedio de 2,5 m, geometría tabular y continuidad lateral, por lo que se realizó un muestreo en canaleta o roza en cada uno de los tres frentes de explotación. Las canaletas se realizaron desde el techo a la base del estrato recolectándose 8 Kg en cada una de ellas.

En el caso de la arcilita pardo rojiza de la F. Anacleto, el estrato de interés posee 5 m de espesor, geometría tabular y se muestreó sólo el frente de explotación que posee continuidad lateral, en 3 puntos distantes 8 m entre sí, en los que se llevó a cabo el mismo procedimiento de muestreo en canaleta antes descrito, sólo que en este caso se recolectaron aproximadamente 12 Kg por cada una.

Las muestras fueron secadas al aire, trituradas utilizando una chancadora de mandíbulas (tamaño final 1 pulgada) y luego, las submuestras provenientes de las diferentes canaletas, fueron mezcladas para obtener una única muestra por formación. Posteriormente, se procedió al cuarteo obteniéndose 10 kg de cada sedimentita. Para los ensayos tecnológicos, este material fue pulverizado a través de un molino a martillos (tamaño final 80 micrones).

Para obtener un material equivalente sería conveniente seguir primero el criterio de reconocimiento litológico de los niveles de sedimentitas y una vez obtenidas las muestras, de acuerdo a lo descrito anteriormente, se recomienda realizar en principio análisis mineralógicos y granulométricos que permitan caracterizar al material.

#### Mineralogía y Análisis químico

El diagnóstico de la composición mineralógica se realizó por difracción de rayos X (DRX) sobre muestra total y fracción arcilla siguiendo metodología de rutina (Moore y Reynolds, 1997). Se analizó el polvo total orientado al azar utilizando porta muestras de carga vertical. El barrido se efectuó entre los  $2^\circ 2\theta$  hasta los  $65^\circ 2\theta$  a una velocidad angular de  $2^\circ/\text{minuto}$  y un paso de 0,02. El análisis semicuantitativo de la muestra total y fracción  $< 2 \mu\text{m}$  se realizó según los factores de ponderación de Schultz (1964) y Biscaye (1965), respectivamente. El equipo utilizado fue un Rigaku D-Max IIC, con radiación Cu ( $K\alpha = 1,5405 \text{ \AA}$ ).

Los análisis químicos sobre muestra total fueron realizados con un equipo de Fluorescencia de Rayos X por dispersión de longitud de onda (S4 Pioneer de Broker). La cuantificación se realizó por el método de parámetros fundamentales utilizando el software vinculado al equipo (SpectraPlus).

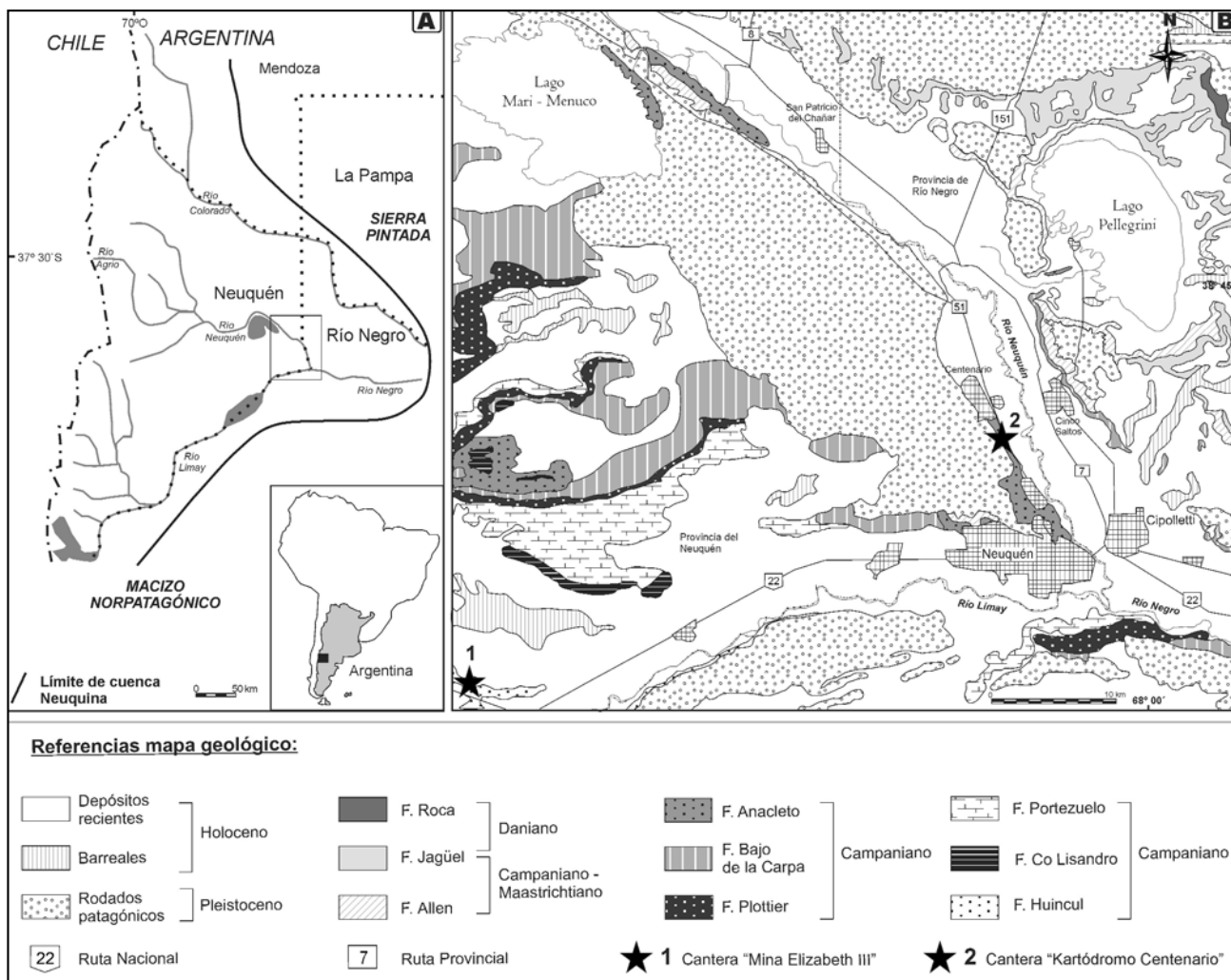


Figura 1. A) Ubicación geográfica del área de estudio; B) Mapa geológico mostrando los afloramientos de las sedimentitas rojas. 1: Localización de Muestra ME, 2: Localización de Muestra KCE.



Figura 2. Vista panorámica de un sector de la cantera Kartódromo Centenario (A) y detalle de los niveles muestreados (B).





Figura 3. Vista panorámica de un sector de la cantera Mina Elizabeth III (A) y detalle del nivel muestreado (B).

#### **Capacidad de Intercambio Catiónico y cationes de intercambio**

Este análisis se realizó sobre muestra total a través del método de Plata-Tiourea (Chhabra, et al., 1975), utilizando una solución de 0,1 M  $\text{AgNO}_3/\text{TU}$  (pH = 7). Este método permitió realizar la medición simultánea de la capacidad de intercambio catiónico y los iones intercambiables a través de espectrometría de absorción atómica (EAA).

#### **Granulometría, morfología y distribución del tamaño de poros**

La distribución del tamaño de partículas se determinó a través del método de pipeteo, para la fracción menor a  $62 \mu\text{m}$ , y tamizado por vía húmeda para la fracción mayor a  $62 \mu\text{m}$ .

La microfábrica de las muestras se estudió mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Las observaciones se realizaron sobre esquirla de muestra natural y permitieron reconocer las morfologías de las partículas así como las relaciones entre ellas. El material fue secado previamente a  $105^\circ \text{C}$  por 24 h con posterior metalización superficial de Au-Pd. Las microfotografías fueron tomadas con magnificaciones de hasta 20000 aumentos en las condiciones operativas de 5Kv y 15 Kv en un microscopio electrónico marca Philips - SEM 515.

La distribución del tamaño de poros se realizó a través de la inyección de mercurio a alta presión utilizando un equipo Micrometrics Autopore III modelo 9420, con una presión máxima de 414 MPa, capaz de medir poros de entre 500 y  $0,01 \mu\text{m}$  de diámetro.

#### **Propiedades Geotécnicas**

Sobre los materiales arcillosos estudiados se llevaron a cabo las siguientes determinaciones: límites de Atterberg (ASTM D4318-10, 2010), índice de hinchamiento (ASTM D5890-11, 2011) y peso específico aparente (volumenómetro de Le Chatelier). Previamente a las mediciones de conductividad hidráulica de las mezclas de arcilita y fangolita con arena, se determinaron la humedad óptima y densidad en seco máxima a través de ensayos de compactación proctor estándar (ASTM D698-07 e1, 2007).

#### **Caracterización hidráulica**

##### *Arcillas Puras*

La conductividad hidráulica de las arcillas puras fue determinada de forma indirecta a través del ensayo de consolidación unidimensional. Para ello, se siguió el procedimiento estándar publicado en la Norma ASTM D2435/D2435M-11 (2011). La arcilita y fangolita en polvo se ensayaron con contenidos de humedad cercanos a la saturación. Las muestras fueron preparadas en celdas de consolidación de pared rígida de 6,33 cm de diámetro y 2,51 cm de altura. El anillo de consolidación se ubicó sobre una piedra porosa de 10 mm de espesor y se colocó papel de filtro a ambos lados de la muestra. Se aplicó la siguiente secuencia de cargas:  $0,55 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1,09 \text{ kg/cm}^2$ ,  $2,74 \text{ kg/cm}^2$ ,  $5,47 \text{ kg/cm}^2$ ,  $10,94 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando un consolidómetro de anillo fijo (Clockhouse Tipo J217522). En el ensayo de consolidación, la conductividad hidráulica se determinó a partir de la medición de la tasa de flujo de salida, representada por el coeficiente de consolidación  $C_v$  (Terzaghi, 1943).

##### *Mezclas arena - arcilita y fangolita.*

En la práctica, el porcentaje de arcilla que se utiliza como enmienda de suelos naturales o arenas que se utilicen como barreras impermeables, se encuentra entre un 3 y 15%, por lo que se optó por este último porcentaje para ensayar las mezclas con la arcilita y fangolita seleccionada. Adicionalmente, se determinó la conductividad hidráulica de la arena para cuantificar la disminución en la misma con el agregado de los materiales arcillosos en polvo.

La medición se llevó a cabo mediante ensayos de carga constante en celdas triaxiales de pared flexible, siguiendo la norma DIN 18130-1 (1998). Las probetas se moldearon a un contenido de humedad 3% superior a la óptima realizando ensayos de compactación proctor estándar (ASTM D698-07E1, 2007). Se aplicó una presión de confinamiento de  $0,6 \text{ kg/cm}^2$  y una presión interna de  $0,3 \text{ kg/cm}^2$ .

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Análisis químico y Mineralogía**

Las muestras evaluadas presentan como constituyentes principales a los minerales arcillosos (85-90%) (Tabla 1).

Dicha fracción está representada por un interstratificado illita/esmectita (I/S) tipo R0 (50% Sm) e illita, en proporciones similares (55-60% y 40-45%, respectivamente). En la fangolita KCE, se reconoció además la presencia de caolinita en proporciones traza. Los minerales acompañantes son cuarzo, feldespatos, calcita y ceolitas (analcima).

En la Tabla 1 se puede observar que la bentonita sódica utilizada como referencia está constituida casi exclusivamente por esmectita, con cuarzo, feldespatos y ceolitas como fases secundarias.

El análisis químico revela que existe un dominio de sílice y aluminio en las muestras analizadas, principales constituyentes de los minerales arcillosos (Tabla 2). Entre los elementos alcalinos y alcalinotérreos, se observa que la muestra KCE presenta un elevado contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  que puede corresponder tanto a los sitios de intercambio del componente esmectítico del I/S, como a la calcita presente en esta muestra. En la muestra ME se destaca la presencia de  $\text{K}^+$ , que puede ser atribuido a la illita y al feldespato potásico identificado en la misma. Por su parte, en la bentonita, el elemento alcalino que predomina es el  $\text{Na}^+$ .

#### Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes de intercambio

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a la capacidad de intercambio catiónico y los cationes de intercambio de las muestras estudiadas. La CIC de la bentonita comercial es la más elevada, seguida por la arcilita KCE y por último la fangolita ME. Estos resultados están de acuerdo a la mineralogía de las muestras, siendo esta última la que posee menor porcentaje de minerales arcillosos.

Aunque no hay un criterio ampliamente aceptado para un valor mínimo de CIC del material que se utilice como barrera impermeable de repositorios de RSU, algunos investigadores recomiendan que dicho valor sea mayor o igual a 10 meq/100 g (Rowe *et al.*, 1995; Taha y Kabir, 2003), por lo que la arcilita KCE y la fangolita ME cumplen con este requisito.

Las sedimentitas rojas poseen como principal catión de intercambio al  $\text{Ca}^{2+}$ , por lo tanto las esmectitas de los interstratificados son clasificadas como cálcicas, mientras que en la bentonita, el 76% de los sitios de intercambio están ocupados por  $\text{Na}^+$ .

**Tabla 1. Mineralogía de las sedimentitas rojas de las formaciones Anacleto y Huincul y de la bentonita sódica utilizada como referencia. I/S: interstratificado illita/esmectita.**

Muestra	Esmectita (%)	I/S (%)	Illita (%)	Caolinita (%)	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Calcita (%)	Ceolitas (%)
KCE	-	50	40	< 1	5 ± 1	< 1	5	-
ME	-	50	35	-	13 ± 1	< 2	0,4*	< 1
Bentonita sódica	90	-	-	-	2 ± 0,5	< 1	0,4*	3 - 4

\* Carbonatos indeterminados

**Tabla 2. Composición química de las sedimentitas rojas y de la bentonita sódica.**

	KCE	ME	Bentonita
SiO <sub>2</sub> (%)	56,01	59,74	56,66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13,12	15,33	18,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,89	5,38	4,9
MgO (%)	2,7	1,96	2,68
CaO (%)	6,29	1,4	1,18
Na <sub>2</sub> O (%)	1,1	2,11	3,11
K <sub>2</sub> O (%)	1,59	3,43	0,36
TiO <sub>2</sub> (%)	0,57	0,67	0,43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,12	0	0,093
MnO (%)	0,06	0,08	0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0	0	0,003
Sr (%)	297	252	278,4
Zr (%)	119	247	282
Y (%)	0	0	29
C (%)	0,40	0,02	0,10
S (%)	0,03	0,02	0,56
L.O.I.	13,49	10,08	11,3

Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes de intercambio.

Muestra	CIC (meq/100g)	Cationes de intercambio (%)			
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
KCE	60,14	45,40	13,30	1,90	39,50
ME	41,83	57,40	15,20	2,30	25,10
Bentonita sódica	104,60	12,40	10,90	0,30	76,40

#### Granulometría, morfología y distribución del tamaño de poros

Los resultados granulométricos permiten clasificar a las muestras como Arcilita (Muestra KCE) y Fangolita (Muestra ME) (Folk, 1968) (Tabla 4). En KCE, la fracción granulométrica que domina es la de tamaño arcilla, mientras que en ME las fracciones limo y arcilla presentan proporciones similares. La fracción arena es muy baja, sólo en ME se observa un mayor contenido, aunque la misma no alcanza el 10% del porcentaje en peso. En términos de tamaño de grano, existe una importante diferencia entre las sedimentitas rojas y la bentonita comercial ya que esta última está constituida casi en su totalidad por partículas menores a 0,98 micrones (Tabla 4).

En la fangolita ME las partículas se hallan dispuestas cara-cara en posición basal y ofreciendo un aspecto de compactación (Figura 4 A y B). En observación con mayor magnificación, también se encontraron aquí placas en contacto borde-cara conformando espacios vacíos de hasta 3 µm de diámetro y de distribución irregular. Las partículas tienen tamaños variables (2-4 µm) con superficies y bordes ligeramente ondulados.

En la arcilita KCE se observaron placas de interestratificados (I/S) dispuestas en su mayoría cara-cara, en posición según sus caras no basales, ofreciendo un aspecto general compacto de láminas apiladas (Figura 4 C y D). Por encima de éstas se encuentran distribuidas irregularmente láminas en contacto borde-cara conformando espacios vacíos de hasta 5 µm y de forma irregular. Los minerales arcillosos tienen un tamaño de 4-5 µm con superficies suavemente escamosas y bordes ligeramente irregulares, morfologías impuestas por la presencia de un alto contenido de capas de esmectita en el interestratificado.

La microfábrica de la bentonita es abierta, típica de montmorillonitas sódicas. Se observa un ordenamiento de las esmectitas en agregados, con forma de rosetas, de alrededor de 4 µm de diámetro. Dichos agregados definen una estructura con importantes espacios vacíos entre ellos del orden de los 6 µm (Figura 4 E y F).

Tanto en las sedimentitas rojas como en la bentonita, el arreglo de las partículas de argilominerales y de minerales no

arcillosos da lugar a micro y macro poros de tamaños entre 500 nm y 5 µm que pueden ser clasificados como poros intra-agregados e inter-agregados (Delage et al., 2006).

En la Figura 5 se presentan las curvas de distribución del tamaño de poros medidos mediante intrusión de mercurio. Todas las muestras exhiben una distribución porométrica caracterizada por la presencia de un tipo principal de poros con un diámetro entre 1 y 0,1 µm (1000-100 nm). En la muestra ME se observa además la presencia de poros entre 1 y 10 µm.

Los resultados obtenidos coinciden en general con lo observado a través de microscopía electrónica. Desde el punto de vista de la movilidad del agua, los poros identificados pueden clasificarse como microporos (poros intra-agregados) (González Fort, 1996) y, en menor medida, como macroporos (poros inter-agregados).

#### Propiedades Geotécnicas

En función de los resultados granulométricos y límites de Atterberg, la arcilita KCE y la fangolita ME pueden clasificarse como un limo con plasticidad moderada a alta (MH) y una arcilla de plasticidad media a baja (CL), respectivamente, mientras que la bentonita corresponde a una arcilla de alta plasticidad (CH) (Tabla 5). Los valores de los límites de consistencia poseen una alta relación con el tipo de catión de intercambio de las esmectitas. En presencia de agua, el espesor de la doble capa difusa es menor en presencia de Ca<sup>2+</sup>, disminuyendo su capacidad de absorber agua en relación con esmectitas donde predominan los cationes monovalentes (Gleason et al., 1997), como es el caso de la bentonita comercial utilizada como referencia. Por esta misma razón, el índice de hinchamiento de las sedimentitas rojas también es considerablemente más bajo que el de la bentonita (Tabla 5).

Los resultados de los ensayos de compactación de las mezclas con arena se muestran en la Tabla 6. Si bien los valores de densidad en seco fueron similares para los tres materiales, la humedad óptima de las mezclas con las sedimentitas rojas es un 2% más baja que la de la bentonita debido a que poseen una menor proporción de partículas finas.

Tabla 4. Granulometría de las muestras estudiadas (en %).

Muestra	< 0,98 µm	< 1,95 µm	< 3,9 µm	entre 62 µm y 4 µm	entre 500 µm y 62 µm
KCE	44,8	60,1	76,4	23,5	0,4
ME	26,0	38,2	49,8	42,1	8,3
Bentonita sódica	83,9	85,9	87,9	11,2	0,9

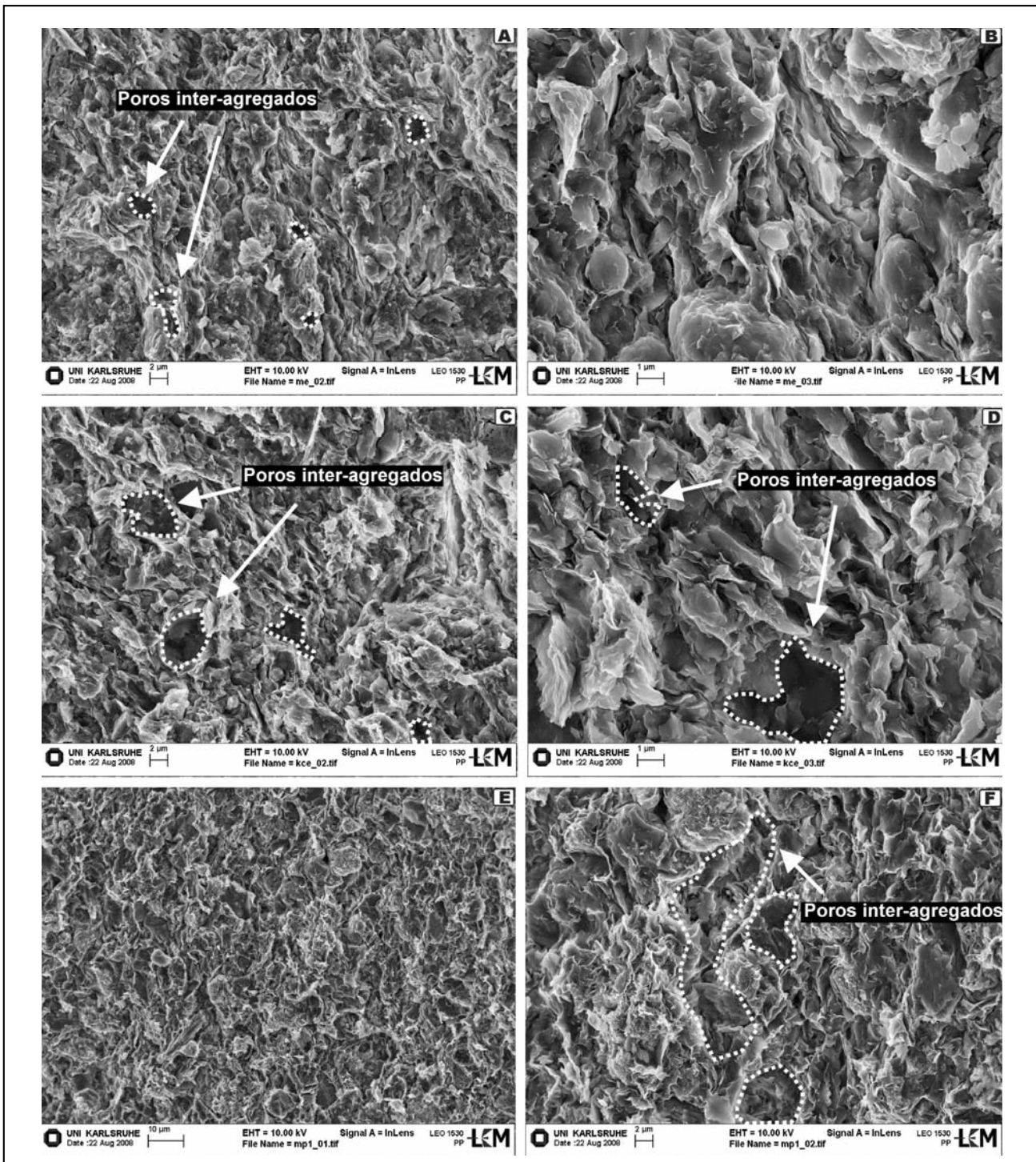


Figura 4. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de las sedimentitas rojas y la bentonita sódica. A y B) Formación Huincul - Muestra ME; C y D) Formación Anacleto - Muestra KCE; E y F) bentonita sódica.

Tabla 5. Propiedades geotécnicas.

Propiedades	KCE	ME	Bentonita sódica
Humedad (%)	8,12	7	11,3
Límite líquido (%)	47	39	340
Índice de plasticidad (%)	11	26	291
Índice de hinchamiento (mL)	9	6	36
Gravedad específica	2,67	2,66	2,7
Unified Soil Classification	MH	CL	CH

## Caracterización hidráulica

### Arcillas puras

La fangolita ME y la arcilita KCE presentaron valores de conductividad hidráulica por debajo de  $1 \times 10^{-9}$  m/s, y sólo un orden de magnitud mayor que el de la bentonita (Figura 6 b). En los tres materiales, se observa una disminución aproximadamente lineal de la conductividad hidráulica y la relación de vacíos con el aumento de la carga aplicada (Figura 6 a y b). La disminución en la conductividad hidráulica es el resultado de la disminución de la relación de vacíos y reorientación de las partículas del suelo hacia un estado más disperso, que tiene lugar durante el proceso de carga (Cetil, 2004).

La bentonita posee una relación de vacíos tres veces más alta que el resto de los materiales y experimentó el mayor cambio en la misma con el incremento de la carga, mientras que en las sedimentitas rojas la relación de vacíos permaneció casi invariante a lo largo de todo el rango de presiones ensayadas. Estos resultados sugieren que a medida que la carga vertical aumentó, hubo un importante decrecimiento en el volumen de la bentonita con alto hinchamiento, mientras que el volumen de la arcilita KCE y la fangolita ME, que poseen un bajo hinchamiento, mostró una compresibilidad inferior.

Los resultados indican que las sedimentitas rojas estudiadas poseen valores de conductividad hidráulica que cumplen con los requisitos legales, aun sin tener una capacidad de hinchamiento elevada. El análisis de microscopía electrónica muestra que estas sedimentitas están constituidas por una elevada proporción de partículas finas ( $< 4 \mu\text{m}$ ) que dan lugar a un dominio de microporos (poros intra-agregados: interlaminares e interparticulares), los cuales a su vez, definen canales de flujo con diámetros también finos.

### Mezclas arena bien graduada - arcilita y fangolita.

La mezcla con la arcilita KCE presentó una conductividad hidráulica un orden de magnitud menor que el límite requerido por la legislación. Por su parte, la mezcla con la fangolita ME de la Formación Huincul fue la de mayor valor de conductividad hidráulica, quedando levemente por encima del valor estipulado por la normativa internacional para materiales que se utilicen como sello de repositorios de residuos sólidos urbanos (Tabla 6).

El agregado de un 15% de la arcilita KCE en polvo a la arena mal seleccionada disminuyó su conductividad hidráulica en seis órdenes de magnitud. Por su parte, la fangolita ME mejoró la conductividad hidráulica de la arena en cinco órdenes de magnitud (Tabla 6).

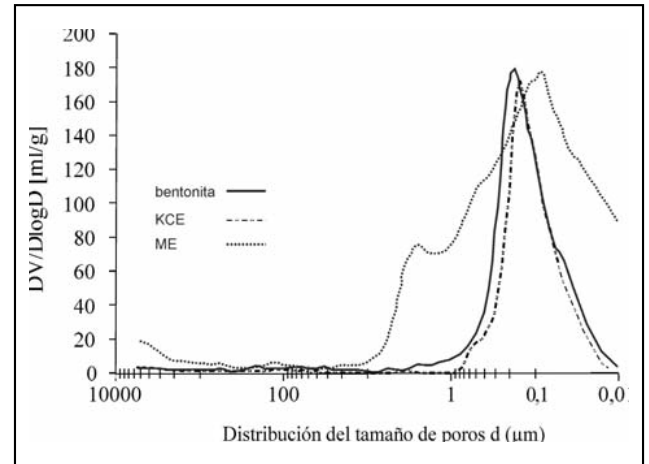


Figura 5. Distribución de tamaño de poros obtenida por intrusión de mercurio. Escala horizontal logarítmica.

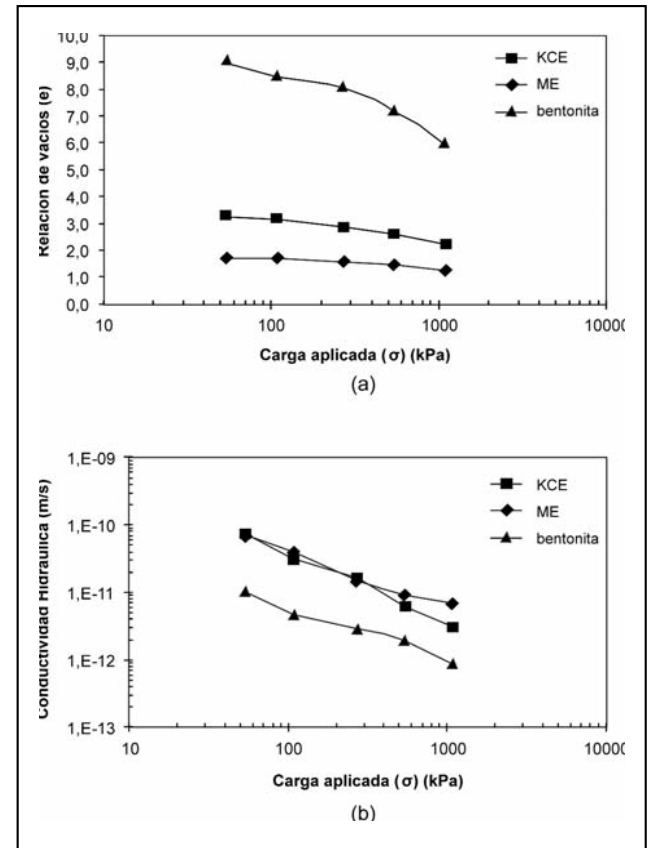


Figura 6. Relación de vacíos (a) y conductividad hidráulica (b) vs carga aplicada. Escala horizontal logarítmica.

Tabla 6. Propiedades de compactación y conductividad hidráulica de las mezclas con arena.

Muestra	Humedad óptima (%)	$r_{ap}$ máxima (kg/m <sup>3</sup> )	K (m/s)
Arena (100%)	11	1650	$5,67 \times 10^{-04}$
KCE (15%) - Arena (75%)	12,5	1830	$1,34 \times 10^{-10}$
ME (15%) - Arena (75%)	12	1810	$4,30 \times 10^{-09}$
Bentonita (15%) - Arena (75%)	13	1890	$5,34 \times 10^{-12}$

En las mezclas con arena, el comportamiento de la bentonita fue muy superior al de las pelitas rojas ya que la conductividad hidráulica de la misma se encontró en el mismo orden de magnitud que la obtenida en forma pura, disminuyendo la conductividad hidráulica de la arena en ocho órdenes de magnitud. Estos resultados evidencian que la conductividad hidráulica de las mezclas de pelita-arena compactada está controlada casi exclusivamente por las propiedades de la fracción fina.

En las mezclas bentonita-arena, la bentonita se encuentra entre los granos de arena, recubriéndolos con una fina capa. Cuando este material es expuesto al agua, los vacíos entre los agregados comienzan a ser llenados por geles de arcilla que emanan desde los agregados expandidos (Pusch *et al.*, 1990). Por lo que en mezclas con materiales granulares, la reducción de la conductividad hidráulica depende principalmente de la capacidad que posee la arcilla de hincharse (Komine y Ogata, 1996; Mishra *et al.*, 2011).

Como se observó anteriormente, la bentonita posee un hinchamiento cuatro veces más alto en relación con las sedimentitas rojas, de ahí que la conductividad hidráulica de estas últimas en mezclas con arena sea entre uno y dos órdenes de magnitud más elevado que la bentonita sódica comercial. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mishra *et al.* (2011) quienes estipulan una disminución de la conductividad hidráulica de mezclas suelo-bentonita desde  $5,5 \times 10^{-10}$  m/s a  $5,3 \times 10^{-11}$  con un incremento del hinchamiento de 6 a 20 mL/2g.

#### Comparación entre las propiedades de las sedimentitas rojas y la bentonita sódica

Existen notables diferencias entre las características texturales y mineralógicas de las sedimentitas rojas y la bentonita utilizada como referencia, que se reflejan en su comportamiento geotécnico y fisicoquímico.

En comparación, las sedimentitas rojas poseen porcentajes más bajos de: minerales arcillosos esmectíticos, partículas con tamaño  $< 2 \mu\text{m}$  y CIC. Otra diferencia destacada con la bentonita es la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  como principal catión de intercambio, mientras que esta última se trata de una bentonita sódica. Todas estas propiedades afectaron directamente al índice de plasticidad, hinchamiento y compresibilidad de las sedimentitas rojas dando lugar a valores más bajos de estos parámetros, los que a su vez explican la mayor conductividad hidráulica de estos materiales en relación con la bentonita sódica natural utilizada como referencia.

Aún así, los valores de conductividad hidráulica y de CIC de las sedimentitas rojas las hacen adecuadas para su uso como barreras impermeables. Adicionalmente, estos materiales resultan muy atractivos, desde un punto de vista geotécnico para ser utilizados como sellos de rellenos sanitarios, ya que poseen bajo hinchamiento, por lo que no propiciarían la aparición de fracturas por desecamiento. Por esta razón, podría considerarse su uso sin mezclarse con otros componentes, a diferencia de la bentonita que por su alta compresibilidad y plasticidad sólo puede utilizarse en combinación con otros materiales más estables mecánicamente (Musso *et al.*, 2010).

Su baja actividad y el dominio de  $\text{Ca}^{2+}$  en los sitios de intercambio también las hacen favorables para este fin ya que algunos investigadores han sugerido que las esmectitas cálcicas podrían ser más estables químicamente que las sódicas cuando son expuestas a los constituyentes químicos de los lixiviados (Gleason *et al.*, 1997).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las principales características físicas, químicas, mineralógicas y geotécnicas de dos sedimentitas rojas de grano fino aflorantes en el Departamento Confluencia, provincia de Neuquén. Este material ha sido antiguamente utilizado como materia prima en la industria de la cerámica. Las principales conclusiones se resumen de la siguiente manera:

- Las sedimentitas rojas compactadas presentan conductividades hidráulicas bajas y muy bajas. Mezclas compactadas de arena bien graduada con un 15% de la fangolita ME de la Formación Huincul poseen conductividades hidráulicas superiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Sin embargo, el agregado de un 15% de la arcilita KCE de la Formación Anacleto a esta arena produjo una importante disminución en la conductividad hidráulica de la misma obteniéndose valores por debajo de los mínimos requeridos por la mayoría de las regulaciones internacionales para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios.
- Un adecuado comportamiento hidráulico se alcanza cuando las mezclas se encuentran compactadas con una densidad igual al 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo proctor Normal y compactando en la rama húmeda entre 2 y 3% por encima de la humedad óptima de compactación. De esta manera se logran condiciones de estabilidad, un material suficientemente denso y un comportamiento hidráulico óptimo al obtenerse estructuras dispersas en el material compactado en la rama húmeda.
- Las sedimentitas ensayadas poseen una baja compresibilidad y menor potencial expansivo que una bentonita sódica natural de la provincia de Río Negro. Por lo tanto, las mismas podrían ser utilizadas como material de construcción en forma directa sin necesidad de ser mezcladas o estabilizadas con otros materiales naturales (suelos o arena) debido a su baja plasticidad y mayor estabilidad química.
- La capacidad de intercambio catiónico de estas rocas, también las hacen apropiadas para contener líquidos lixiviados. Por su bajo hinchamiento, las sedimentitas rojas estudiadas poseen un bajo potencial de aparición de fisuras al secarse o debido a procesos de intercambio que justifiquen cambios de volumen en la barrera. Estos materiales también serían más estables químicamente en relación con una bentonita sódica debido a su baja actividad y la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  en los sitios de intercambio.
- La utilización de materiales regionales en la construcción de sistemas de impermeabilización de rellenos sanitarios, constituiría una alternativa de bajo costo como así también ampliaría las posibilidades de comercialización de materias primas que se han utilizado sólo como materiales para la industria de la cerámica, a otros usos tendientes a la protección del medio ambiente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue, Argentina, (proyecto 04/I107) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2002-07-12633).

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASTM STANDARD D698-07E1, 2007.  
Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)).  
*ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D0698-07E01, www.astm.org.*
- ASTM STANDARD D2435/D2435M-11, 2011.  
Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Load-ing.  
*ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D2435\_D2435M-11, www.astm.org.*
- ASTM STANDARD D5890-11, 2011.  
Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners.  
*ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D5890-11, www.astm.org.*
- ASTM Standard D4318-10, 2010.  
Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.  
*ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D4318-10, www.astm.org.*
- BENSON, C., H. ZHAI, AND X. WANG. 1994.  
Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners.  
*Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120: 366-387.*
- BISCAYE, P. E., 1965.  
Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans:  
*Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 76: 803-831.*
- BONAPARTE, R., 1995.  
Long-term performance of landfills.  
*En Y.B. Acar and D.E. Daniel (eds.), Proceedings, Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication 46, American Society of Civil Engineers, 415-553, Reston, VA.*
- BOUAZZA, A. Y VAN IMPE, W.F., 1998.  
Liner design for waste disposal sites.  
*Environmental Geology, Vol. 35(1): 41-54.*
- CAZAU, L. Y ULIANA, M., 1973.  
El Cretácico Superior continental de la Cuenca Neuquina.  
*V Congreso de Geología Argentina, Villa Carlos Paz, Córdoba. Actas, Vol. 3: 131-163.*
- CETIL, H., 2004.  
Soil-particle and pore orientations during consolidation of cohesive soils.  
*Engineering Geology, Vol. 73: 1-11.*
- CHHABRA, R., PLEYSIER, J., CREMERS, A., 1975.  
The measurement of the cation exchange capacity and exchangeable cations in soils: A new method.  
*Proc. Int. Clay Conf., Wilmette, 439 - 449.*
- COMISIÓN EUROPEA, 1999.  
Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste.  
*Official Journal of the European Union L 182, 16/07/1999, 0001- 0019; Brussels.*
- CZURDA, K., 2006.  
Clay Liners and Waste Disposal.  
*En: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science, Vol. 11.3: 693-702.*
- DANDERFER, J.C. Y VERA, P., 1992.  
Geología y Recursos Minerales del Departamento Confluencia. Provincia del Neuquén, República Argentina.  
*Dirección Provincial de Minería, Ministerio de la Producción, Boletín, 1, 212 pp. Neuquén.*
- DANIEL, D.E., 1993.  
Geotechnical Practice for Waste Disposal.  
*Chapman and Hall, 675 pp. London.*
- DANIELI, J.C. Y GIUSIANO, A., 1992.  
Geología y Recursos Minerales del Departamento Confluencia, Provincia del Neuquén, República Argentina.  
*Dirección Provincial de Minería, Ministerio de la Producción, Boletín, 1, 212 pp. Neuquén.*
- DELAGE, P., MARCIAL, D., CUI, Y.J., RUIZ, X., 2006.  
Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach.  
*Géotechnique, Vol. 56(5): 291-304.*
- DI PAOLA, A. Y MARCHESI, H., 1970.  
Relaciones litoestratigráficas entre la Formaciones Rayoso, Candeleros y Huincul, Prov. del Neuquén.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 25(1): 111-120.*

- DIN 18130-1, 1998.  
Soil, Investigation and Testing - Determination of the Coefficient of Water Permeability - Part 1: Laboratory Tests.  
*Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 20 pp., Berlin (Beuth).*
- DIRECCIÓN PROVINCIAL DE MINERÍA, 1978.  
Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén.  
*Disponible en: <http://www.energianeuquen.gov.ar/catastrominero.aspx>. Último acceso: Octubre de 2012.*
- DOERING, A., 1882.  
Informe oficial de la Comisión Científica agregada al estado mayor general de la expedición al Río Negro (Patagonia).  
*Geología, Vol. 3: 300-530.*
- ESPEJO, P.M. Y NIETO, D.G., 1999.  
Geología y Recursos Minerales del sector Rionegrino de las Hojas 3769-IV, Catriel; 3969-II, Neuquén; 3966-I, Gobernador Duval; 3966-II, Puelches y 3963-I, Río Colorado.  
*Dirección de Minería de Río Negro-SEGEMAR. 49 pp. Viedma.*
- FOLK, R.L., 1968.  
Petrology of Sedimentary Rocks:  
*Hemphills Book Store, 170 pp. Texas.*
- FRANCISCA F.M., GLATSTEIN D.A., NIEVA P.M., 2009.  
Aptitud de los limos compactados y estabilizados con bentonita sódica como material de construcción de barreras en rellenos sanitarios.  
*Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. 106: 29-34.*
- FRENGUELLI, J., 1930.  
Nomenclatura estratigráfica Patagónica.  
*Anales de la Sociedad Científica de Santa Fe, Vol. 3: 1-117.*
- GIUSIANO, A. Y LUDUEÑA, D., 1989.  
Plan Arcillas-Limos arcillosos del Grupo Neuquén.  
*Dirección Provincial de Minería del Neuquén. Informe Final. Inédito.*
- GLEASON, M.H., DANIEL, D., EYKHOLT, G.R., 1997.  
Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications.  
*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123(5): 438-445.*
- GONZÁLEZ FORT, R., 1996.  
Análisis del sistema poroso de las rocas.  
*En: Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Editorial Complutense, 493 pp. Madrid, España.*
- GROEBER, P., 1953.  
Mesozoico. En: Geografía de la República Argentina.  
*Soc. Arg. de Est. Geográficos GAEA, Buenos Aires, Vol. 2(1): 1-141.*
- HEREDIA, S. Y CALVO, J., 2002.  
Estratigrafía de las bardas de la ciudad de Neuquén.  
*XV Congreso Geológico Argentino, El Calafate, Tomo I: 699-705.*
- HUGO, C.A. Y LEANZA, H. A., 2001a.  
Hoja Geológica 3969-IV, General Roca. Provincias de Río Negro y Neuquén.  
*Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Boletín 308, 64 pp. Buenos Aires.*
- HUGO, C.A. Y LEANZA, H.A., 2001b.  
Hoja Geológica 3966-III, Villa Regina, provincia de Río Negro.  
*Instituto de Geología y Recursos Naturales, SEGEMAR, Boletín 309, 53 pp. Bs. As.*
- KEIDEL, J., 1907.  
Material para el mapa geológico de la República Argentina. Confluencia de los ríos Neuquén y Currileuvú.  
*Dir. Nac. Min. y Geol. Mapa impreso escala 1:25000, Bs. As.*
- KEITH, K.S., 2000.  
Characterization and permeability of sepiolite, palygorskite, and other commercial clays and their applicability for use as impermeable barriers in waste disposal.  
*PhD Thesis. Indiana University, Department of Geological Sciences, 271 pp.*
- KOMINE, H. Y OGATA, N., 1996.  
Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite.  
*Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33(1): 11-22.*
- LEGARRETA, L. Y GULISANO, C.A., 1989.  
Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior).  
*10° Congreso Geológico Argentino, Univ. Nac. de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica N° 6, Cuencas Sedimentarias Argentinas. Tucumán, 221-243.*



- MANASSERO, M. BENSON, C., BOUAZZA, A., 2000.  
Solid waste containment systems.  
*Proceedings Int. Conf. on Geological and Geotechnical Eng., Geoeng., Vol. 1: 520-642, Melbourne.*
- MISHRA, A. K., OHTSUBO, M., LI, L., HIGASHI, T., 2011.  
Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures.  
*Applied Clay Science, Vol. 52: 78-84.*
- MOORE, D.M. Y REYNOLDS, R.C., 1997.  
X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.  
*2 Ed. Oxford Univ. Press., 378 pp. NY.*
- MUSSO, T.B., ROEHL, K., PETTINARI, G., VALLES, J., 2010.  
Assesment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills.  
*Applied Clay Science, Vol. 48(3): 438-445.*
- OPS, 2002.  
Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos.  
*En: Manejo de residuos sólidos urbanos en Argentina. Disposición final (online). Disp. en web en: [http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsul/informacion\\_generallen\\_arg\\_disposicion\\_final.html](http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsul/informacion_generallen_arg_disposicion_final.html)*
- PETTINARI, G., 1995.  
Evolución mineralógica de los sedimentos pelíticos del Grupo Neuquén, entre cerro Challacó y Paso Córdoba, provincias del Neuquén y Río Negro, Argentina.  
*Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Inédito. 156 pp.*
- PETTINARI, G., GIUSIANO, A., LUDUEÑA, D., 1999.  
Arcillas Rojas del Grupo Neuquén, Neuquén.  
*En: Recursos Minerales de la República argentina. Editor: Z. O. Zappettini. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1103-1112, Buenos Aires.*
- PETTINARI, G. Y GIUSIANO, A., 2011.  
Arcillas Rojas del Grupo Neuquén.  
*Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. ISBN 978-987-224003-3-2. Editores: H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, Juan Danieli, Jorge Vallés. Capítulo: Recursos Minerales: 767-770.*
- PUSCH R., KARLNAND O., HOKMARK H., 1990.  
GMM-a general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays.  
*SKB Technical Report: 90-43, Stockholm, Sweden.*
- RAMOS, V., 1981.  
Descripción geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte.  
*Boletín del Servicio Geológico Nacional, Vol. 182: 1-103. Bs. As.*
- ROLL, A., 1938.  
Observaciones en el Neuquén central (Resumen).  
*Bol. Inf. Petrol., año 15, Vol. 171: 40-41. Bs. As.*
- ROWE, R.K., QUIGLEY, R.M., BOOKER, J.R., 1995.  
Clayey Barrier Systems for Water Disposal Facilities.  
*Chapman and Hall, 390 pp. London.*
- SCHULTZ, L.G., 1964.  
Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale.  
*US Geological Survey Professional Paper, Vol. 391: 1-31.*
- TAHA, M.R. Y KABIR, M.H., 2003.  
Sedimentary residual soils as a hydraulic barrier in waste containment systems.  
*Second International Conference on Advances in Soft Soil Engineering Technology, Putrajaya, Malaysia, 895-904.*
- TERZAGHI, K., 1943.  
Theoretical Soil Mechanics,  
*John Wiley and Sons, 510 pp. New York.*
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S., 1993.  
Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues.  
*Mc Graw-Hill, 978 pp. Madrid, España.*
- ULIANA, M. Y DELLAPÉ, D., 1981.  
Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión Maastrichtiano- Eoterciaria del engolfamiento neuquino (Patagonia Septentrional).  
*Actas 8º Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Vol. 3: 673-711.*

U.S. EPA, 1993.

Solid Waste Disposal Facility Criteria Technical Manual. Environmental Protection Emergency Response.  
*EPA530-R-93-017. Agency (5305). [www.epa.gov/osw](http://www.epa.gov/osw).*

WICHMANN, R., 1927.

Los estratos con Dinosaurios y su techo en el Este del Territorio del Neuquén.  
*Dirección General de Minería, Geología e Hidrología, Buenos Aires, Vol. 32: 3-25.*



## Evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento en Monte Hermoso, Argentina

### Groundwater well pumping fields in Monte Hermoso, Argentina. Preliminary evaluation

Di Martino, Claudina <sup>1-2</sup>✉ - Cifuentes, Olga <sup>1</sup> - Albouy, René <sup>1-2</sup> - Marcos, Angel <sup>2</sup> - Caló, Jorge <sup>2</sup>

Recibido: 24 de Julio de 2012 • Aceptado: 28 de Diciembre de 2012

#### Resumen

*La localidad de Monte Hermoso utiliza únicamente el recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento de agua potable. Presenta una marcada estacionalidad turística, y una mayor demanda de agua durante el verano que en la actualidad equivale a la capacidad máxima de bombeo.*

*La evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento de agua potable se realiza estudiando los parámetros hidráulicos del acuífero a fin de determinar los radios de influencia de los pozos para analizar probables efectos de interferencia entre conos de bombeo que provocan una merma en el rendimiento específico y tornan ineficiente el sistema de abastecimiento. El método de trabajo consistió fundamentalmente en el análisis de información antecedente, la interpretación de ensayos de bombeo y la aplicación de fórmulas teóricas de la hidráulica de las captaciones de agua subterránea. Los resultados indican, para un espesor saturado de 18 m, una transmisividad media de unos 100 m<sup>2</sup>/d y radios de influencia en el orden de 50 m. Se concluye que si bien la mayoría de los pozos tienen una separación acorde a la distancia óptima calculada, se determina la superposición de conos de bombeo entre 18 de ellos. Se señala que es imprescindible cuantificar el recurso hídrico subterráneo para efectuar un aprovechamiento racional-sustentable del mismo. Además se advierte sobre la necesidad de estudio de los principales focos de contaminación directa al acuífero como lo son la disposición final de residuos sólidos urbanos, las lagunas de estabilización de líquidos cloacales así como de los eventuales procesos de intrusión marina inducidos por explotación.*

**Palabras clave:** agua subterránea - campos de bombeo - evaluación - Monte Hermoso

1. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, Argentina.

2. Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, (8000) Bahía Blanca, Argentina.

✉ claudinadimartino@hotmail.com

## Abstract

Monte Hermoso city drinking water supply comes from groundwater resources only. It has a marked seasonal increase in water demand due to summer tourism, which equals the maximum pumping capacity of the exploiting wells. In order to assess the specific yield performance and the efficiency of the supply system, the interference effects between pumping cones are analyzed. This analysis is carried on by studying the aquifer hydraulic parameters to determine the radius of influence of wells. The working method consisted essentially in the analysis of background information, the interpretation of pumping tests and the application of theoretical equations of well hydraulics. For a saturated thickness of 18 m, the results indicate an average transmissivity of about 100 m<sup>2</sup>/d and an influence radii of about 50 m. It is concluded that while most of the wells are spaced according to the calculated optimal distance, 18 of them have overlapping pumping cones. Thus, it is essential to quantify the groundwater resource in order to make its rational and sustainable use. It also warns of the need to study the main sources of direct contamination to the aquifer such as the disposal of municipal solid waste, sewage stabilization ponds and potential saltwater intrusion processes induced by exploitation of the aquifer.

**Keywords:** groundwater - pumping fields - evaluation - Monte Hermoso

## INTRODUCCIÓN

Monte Hermoso se encuentra ubicada sobre la costa Atlántica, en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Cuenta con 6.494 habitantes (INDEC, 2010), y los registros de los tres últimos censos muestran una tendencia creciente en la población estable. En temporada estival, se estima que pernoctan en Monte Hermoso unas 70.000 personas (Caruso et al., 2010).

Por su condición turística presenta una marcada estacionalidad y por lo tanto un aumento considerable en la demanda de agua durante los meses de Enero y Febrero. Esto hace que los caudales utilizados en la actualidad en temporada estival equivalgan a la capacidad máxima de bombeo instalada. Según el método de Tasa Geométrica Decreciente propuesto por el Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA) en base a los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), la población estable alcanzaría en el año 2050 los 14.882 habitantes (Di Martino, 2012) y la proyección de la demanda de agua muestra para ese año un valor cercano al máximo de capacidad de extracción de los pozos actuales.

Dado que el servicio de agua potable utiliza únicamente el recurso subterráneo para el abastecimiento, surge la necesidad por parte del Municipio (actual prestador del servicio) de organizar el funcionamiento de los pozos existentes para lograr un uso más eficiente, incorporar nuevos si fuera necesario e incentivar a la población al uso racional del agua.

Considerando que se trata de una zona costera se debe tener en cuenta que la sobreexplotación de los pozos en momentos de mayor demanda podría traer aparejado problemas de salinización del agua extraída para consumo.

El objetivo del estudio es la evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento de agua potable con la finalidad de conocer las características hidráulicas del acuífero y calcular los radios efectivos de cada pozo. La interferencia de los conos de depresión de bombeo implica una merma en el rendimiento, por lo que su conocimiento permitirá coordinar la operación para maximizar su eficiencia e incluso disminuir los requisitos energéticos, lo que contribuirá a una gestión sustentable del recurso.

## UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Monte Hermoso es una localidad turística al sur de la Provincia de Buenos Aires, ubicada geográficamente a los

38° 59' 33" de latitud Sur y a 61° 15' 55" longitud Oeste. Limita al Sur con el Océano Atlántico, al Norte y al Este con el Partido de Coronel Dorrego y al Oeste con el Partido de Coronel de Marina Leonardo Rosales, siendo ciudad cabecera del Partido de Monte Hermoso (Figura 1).

Se observan dos ambientes geomorfológicos diferenciables, al Norte del Río Sauce Grande se desarrolla una amplia llanura, con suave declive hacia el Sur que se encuentra surcada por cursos de agua permanentes, comúnmente asociados a zonas anegadizas. Al Sur del Río Sauce Grande, y hasta el mar, se desarrolla un importante cordón costero litoral, constituido por dunas de arena pertenecientes a tres ciclos sedimentarios definidos con un ancho promedio de 5 km y alturas que no superan los 25 m. Sobre el cordón costero litoral se halla emplazada la localidad de Monte Hermoso.

El promedio anual de lluvias es de 656.8 mm, siendo Marzo y Abril los meses más lluviosos y Junio, Julio y Agosto con menores precipitaciones (Caruso et al. 2010). La humedad relativa promedio es de 73%. La recarga del acuífero en el área de estudio, ocurre en forma natural, a partir principalmente de la infiltración de agua de lluvia en el suelo.

## GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

En el subsuelo del área de estudio han sido identificados los denominados genéricamente "sedimentos pampeanos" de edad correspondiente al Plioceno medio a superior (Fidalgo et al., 1975) (Figura 2).

Se trata de sedimentos de naturaleza loésica, castaños con tonalidades amarillentas a rojizas, que tienen amplia distribución regional y un considerable espesor, que puede llegar en el ambiente de la llanura pampeana hasta 200 m. Están compuestos principalmente por limos arenosos con cemento de carbonato de calcio, el cual se presenta como concreciones calcáreas o formas mantiformes (tosca). Hacia el Norte del área de estudio esta unidad geológica aflora o está cubierta por sedimentos eólicos "pospampeanos" sobre los que han evolucionado los suelos actuales. En dirección al mar y dentro del área de estudio, están cubiertos por un depósito marino innominado, compuesto por arenas de playa, con restos de conchillas y cemento calcáreo. Un nivel sedimentario similar fue reconocido por Aliotta et al. (1987) en el área costera de Bahía Blanca y adjudicado al Holoceno. La secuencia sedimentaria culmina con las dunas y médanos correspondientes a la Formación Punta Médanos del Holoceno Tardío (CFI, 1990 en Santa Cruz y Silva Busso, 1999).



Figura 1. Ubicación del partido de Monte Hermoso en la Provincia de Buenos Aires, República Argentina. (Google Earth)

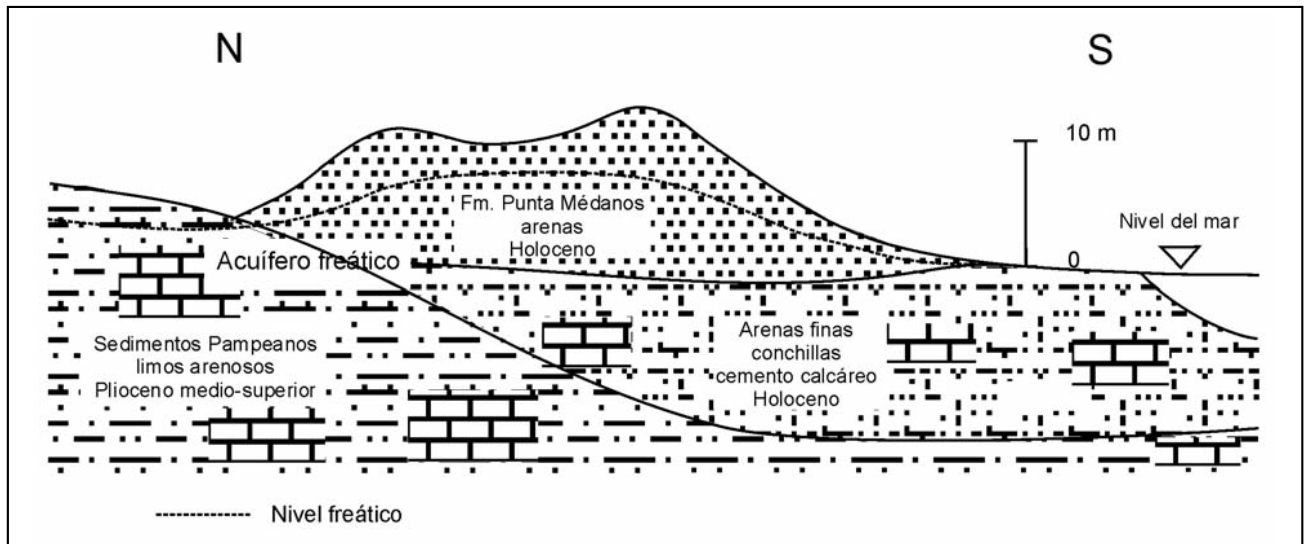


Figura 2. Bosquejo litoestratigráfico e hidrogeológico del área de estudio.

La misma está integrada por arenas cuarzosas amarillentas, de granulometría media a fina, y conforman el cordón arenoso costanero o faja medanosa de la provincia de Buenos Aires que alcanza una extensión de alrededor de 600 km de costa atlántica y tiene un ancho variable que promedia los 3 km. Estas dunas, representan el relicto arenoso generado por

la acción del mar sobre los sedimentos pampeanos y sometidos posteriormente a la acción del viento (Auge, 2004). Desde un punto de vista hidrogeológico el sector de estudio forma parte de la denominada Subregión Médanos Costeros (Santa Cruz y Silva Busso, 1999) o Región Costera (Auge, 2004; González, 2005) ( Ver Cuadro estratigráfico e hidroestratigráfico).

**Cuadro estratigráfico e hidroestratigráfico de la Subregión Hidrogeológica Médanos Costeros**  
(Extraído de Santa Cruz y Silva Busso, 1999)

Estratigrafía	Hidroestratigrafía	Acuíferos principales
Formación Punta Médanos	Epiparaneano	Acuífero libre costero
Sedimentos Pampeanos	Epiparaneano	Acuífero Pampeano
Sedimentos Pampeanos (Araucano)	Epiparaneano	Acuitardo
Formación Paraná	Paraneano	Acuífero Paraná?
Formación Olivos?	Hipoparaneano	Acuitardo
Basamento Cristalino	Basamento Hidrogeológico	Acuífugo

Estos autores diferencian y describen distintas Regiones Hidrogeológicas haciendo referencia a ambientes que presentan características o comportamientos distintivos en relación a sus aguas subterráneas. La Región Costera se extiende como una delgada faja, de unos 2600 km<sup>2</sup>, coincidentes con los alineamientos de dunas costeras que se desarrollan desde la Punta Norte del Cabo San Antonio hasta Santa Clara del Mar y desde Chapamal hasta casi Punta Alta.

En Monte Hermoso el acuífero libre está alojado, en los sedimentos arenosos de la Formación Punta Médanos y en la porción superior de los sedimentos pampeanos subyacentes. El acuífero forma parte de la denominada Sección Hidroestratigráfica Epiparaneana (*DYMAS, 1974e*).

Las dunas y unidades arenosas, poseen altas permeabilidad y porosidad efectiva, debido a la arena suelta y bien seleccionada que las componen (*Auge, 2004*). Son frecuentes en este tipo de materiales conductividades hidráulicas promedio entre 1 m/d (arena fina) hasta 10 m/d (mezcla de arena fina-gruesa) y porosidad eficaz media en el orden del 20 % (*Custodio y Llamas, 1983*). Sus características hidráulicas otorgan gran capacidad de absorción frente a la lluvia, aún en aquellos sitios donde han sido fijadas por vegetación artificial (San Bernardo, Pinar, Villa Gesell, Monte Hermoso). En efecto, la presencia de estos médanos costeros favorecen la rápida infiltración del agua de lluvia y su incorporación a la zona saturada (recarga) por lo que constituyen excelentes almacenes de agua.

Desde un punto de vista hidrodinámico, el mapa isofreático regional de la porción sur de la provincia de Buenos Aires (*Sala, 1975*) muestra la configuración de la superficie piezométrica del acuífero libre y pone de manifiesto una tendencia general de circulación en dirección NNO-SSE hacia el mar, que constituye el nivel de base o de descarga final de todo el escurrimiento superficial y subterráneo regional. En los médanos y dunas puede originarse un sistema de flujo local superpuesto al regional, producto de la recarga por agua de lluvia y su circulación a los sectores de descarga. Dentro de este esquema hidrodinámico pueden originarse "domos" con flujos subterráneos divergentes (hacia el continente y hacia el mar).

En el caso particular de los acuíferos libres costeros, el flujo del agua subterránea origina un estado de equilibrio entre el agua subterránea dulce procedente del continente y el agua subterránea salada del mar. Como el agua de mar es más densa que el agua dulce, forma en el acuífero una cuña de agua salada debajo del agua dulce. Si se bombea cerca de la costa, se induce un gradiente negativo hacia el interior que provocará la entrada del agua de mar al acuífero, hasta que en cierto momento los pozos extraen una mezcla que incluye agua de mar. Una excesiva explotación del recurso puede llegar a inutilizarlo a causa de la salinización.

## SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.

Actualmente la gestión del servicio de agua corriente de la localidad de Monte Hermoso está a cargo del Municipio y la cobertura del sistema de abastecimiento de agua coincide con la del servicio cloacal, que cubre aproximadamente el 66 % de las partidas.

La extracción de agua subterránea se realiza mediante 51 perforaciones de las cuales 25 corresponden a la planta de agua localizada al norte de la ciudad, 10 están ubicadas en la zona del Pinar al NE de la localidad y las 16 restantes están distribuidas en el sector urbano (Figura 1). Los pozos alcanzan una profundidad que varía entre los 20 y 30 m con una producción promedio de cada uno de 20 m<sup>3</sup>/h.

En temporada alta se utilizan la totalidad de los pozos en estado operativo tanto de la planta de agua como de planta urbana. Los mismos son operados en forma manual y se ponen en funcionamiento a requerimiento de la demanda, y su régimen es continuo durante las 24 h. De los pozos del Pinar siete se ponen en marcha mientras los tres restantes se activan solo ante alguna emergencia. En temporada baja solamente se abastece a la población estable, mediante la utilización de 20 pozos de la zona urbana y de la planta de agua.

La energía eléctrica para el funcionamiento de los pozos de bombeo es suministrada por una cooperativa, que cuenta con una única línea eléctrica que se ha explotado durante más de 30 años, sobre la cual se está trabajando para evitar los recurrentes problemas en los meses de verano.

El sistema de abastecimiento de la ciudad de Monte Hermoso, no cuenta con caudalímetro ni medidores domiciliarios, por lo que los valores de los caudales utilizados surgen del valor promedio estimado del rendimiento de las bombas (20 m<sup>3</sup>/h). Se asume que las dotaciones aparentes, varían de acuerdo a la temporada del año entre dotaciones de temporada baja (población estable) y dotaciones de meses pico (población estable + población turística que pernocta). Se estima que en temporada estival pernoctan en Monte Hermoso unas 70.000 personas (*Caruso et al., 2010*) y la dotación diaria de agua ronda los 340 litros por habitante (1) en el orden a la demanda urbana promedio para agua potable.

$$D_{\text{pico}} = 24.480 \text{ m}^3/\text{d} / 70.000 \text{ hab.} = 0,34 \text{ m}^3/\text{hab.día} \quad (1)$$

A partir de las proyecciones de la población estival se estimó la demanda de agua durante el verano hasta el año 2050 (Tabla 1). De los datos obtenidos se desprende que en el año 2020 la misma superará el máximo caudal extraíble de los 51 pozos funcionando las 24 horas (24.480 m<sup>3</sup>/día). Respecto a la demanda de agua de la población estable puede indicarse que incluso hasta el año 2050 no habrá problemas de abastecimiento en temporada baja (*Di Martino, 2012*).

Tabla 1. Proyección de la demanda de agua en temporada estival o alta.

Año	Población estival Hab.	Destival m <sup>3</sup> /hab.día	Demanda de población estival m <sup>3</sup> /día	Capacidad máx.bombeo actual m <sup>3</sup> /día
2020	86.132	0,349	30.060	24.480
2030	105.978	0,349	36.986	24.480
2040	130.394	0,349	45.507	24.480
2050	160.427	0,349	55.989	24.480

### Metodología utilizada

Se realizó el relevamiento de la información preexistente, y se realizaron entrevistas a funcionarios calificados del Departamento de Obras Sanitarias y personal técnico del Municipio de Monte Hermoso, con el fin de obtener información sobre el servicio de agua potable. Se geoposicionaron los pozos de captación y puntos singulares (tanque de abastecimiento, basural, planta depuradora, otros) mediante la utilización de un GPS (Global Positioning System). Los datos fueron descargados en el programa Google Earth, mediante el cual se realizó el mapa correspondiente a la Figura 1.

Para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero se utilizaron los datos obtenidos mediante dos ensayos de bombeo realizados por la Administración General de Obras Sanitarias de la Provincia de Buenos Aires (AGOSBA) en 1990. Los mismos se procesaron con el método de *Neuman (1975)* basado en los supuestos clásicos de *Boulton (en Custodio y Llamas, 1983)* mediante el programa *Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic, Inc., 1996)*. Se estimaron los radios de influencia de los pozos con el apoyo de la documentación técnica existente y mediante la utilización de fundamentos teóricos de hidráulica de captaciones de agua subterránea (*Custodio y Llamas, 1983; Driscoll, 1986*). A partir de la proyección demográfica para la población estable y estival de Monte Hermoso hasta el año 2050 (*Di Martino, 2012*), se realizó en función de las dotaciones correspondientes, la proyección de la demanda de agua para ambas poblaciones. La cartografía realizada, que incluye el geoposicionamiento de todos los pozos de bombeo, permitirá avanzar posteriormente con otras cartas temáticas referidas a datos de vulnerabilidad del acuífero, geología del área, hidrogeología, presencia de eventuales focos de contaminación como el basural a cielo abierto, lagunas de estabilización para el tratamiento de efluentes cloacales, pozos sépticos y otras actividades que se consideren de interés.

### Parámetros hidráulicos del acuífero y radio de influencia de los pozos de bombeo

Se analizaron las pruebas de bombeo a caudal constante llevadas a cabo en el acuífero por *AGOSBA (1990)* con fines de la implementación del servicio de agua corriente a la localidad. Razones de operatividad de los pozos imposibilitaron efectuar mediciones directas en el campo por lo que la información antecedente es la única disponible para evaluar el funcionamiento

de la batería. De acuerdo a esta documentación, en el ambiente del cordón costero litoral, lugar donde se emplaza el campo de bombeo estudiado, el perfil estratigráfico típico está representado por una secuencia litológica que desde la superficie y hasta una profundidad de entre 8 y 10 m está integrada por arenas eólicas sueltas, cuarzosas y claras. Por debajo y hasta los 20 m aproximadamente, aparecen depósitos de playa constituidos por arenas cuarzosas oscuras con abundantes mafitos y restos de conchillas siendo comunes también niveles con cementación calcárea. Subyaciendo a las anteriores se encuentran los “sedimentos pampeanos” constituidos por arenas finas y arcillas. La información litológica y otra aportada por prospección geoelectrónica (*AGOSBA, 1990*) permitieron definir que las mejores condiciones hidrogeológicas se desarrollan hasta una profundidad del orden a los 25 m a partir de la cual se verificaría un aumento de la salinidad del agua y/o cambios sedimentológicos hacia granulometrías más finas. Los 8 pozos analizados alcanzan los 21 m de profundidad explotando niveles francamente arenosos y en algunos casos la porción superior de los “sedimentos pampeanos”.

Las mediciones efectuadas y documentadas indican que los caudales característicos (relación entre el caudal erogado por un pozo por cada metro de depresión) arrojan valores que oscilan entre 2,60 y 4,70 m<sup>3</sup>/h/m, con valores medios de 3,40 m<sup>3</sup>/h/m. De acuerdo a las formulaciones teóricas de la hidráulica de pozos existe una relación entre la transmisividad del acuífero (T) y el caudal específico (q), que para pozos de pequeño diámetro se expresa como (*Galofré, 1966 en Custodio y Llamas, 1983*):

$$T = 1,4 q \quad (2)$$

Donde: T = Transmisividad  
q = caudal específico

Esta fórmula permite calcular un valor de transmisividad promedio de unos 110 m<sup>2</sup>/d compatible con las magnitudes obtenidas mediante la interpretación de pruebas de bombeo llevadas a cabo en el acuífero. Tales ensayos se ejecutaron en dos pozos que componen la batería de extracción a un caudal constante de 22 m<sup>3</sup>/h y 23 m<sup>3</sup>/h respectivamente. Los descensos se midieron en sendos pozos de observación ubicados a 12,6 m y 16,5 m de los respectivos pozos de bombeo (Tabla 2).

Tabla 2. Características de los pozos ensayados y descensos observados.

	Diámetro del pozo (pulgadas)	Fondo del pozo (mbbp)	Caudal constante (m <sup>3</sup> /h)	Distancia pozo de bombeo al pozo de observación (m)	Duración del ensayo (minutos)	Nivel estático (mbbp)	Descenso acumulado al final del ensayo en el pozo de observación (m)
Pozo de bombeo 8SPA	6	20	22	12,6	1270	3,32	0,565
Pozo de bombeo 13PA	6	20	23	16,5	1560	1,60	1,05

Las Figuras 3 y 4 muestran las curvas (log s - log t) para aplicar el método de coincidencia con las curvas tipo para bombeo en acuífero con drenaje diferido también designado como efecto de goteo vertical (Villanueva e Iglesias, 1984). Este concepto, característico de acuíferos libres, se debe, en esencia, a un retardo en el drenaje gravitacional del agua tomada del almacenamiento. En general, el drenaje por gravedad será tanto más lento, cuanto más estratificado esté el acuífero y más fina sea la granulometría del mismo (Custodio y LLamas, 1983). Ensayos hidráulicos en acuífero libre con drenaje diferido pero en materiales predominantemente limosos han sido reportados por Albouy et al. (2005) y Albouy y Castro (2008). En el caso aquí analizado podría vincularse el retardo en la liberación del agua gravífica a la presencia frecuente de niveles con cemento carbonático en los sedimentos.

Las curvas experimentales de descensos-tiempo muestran un primer tramo en el que teóricamente es posible calcular la transmisividad (T) aplicando el método de coincidencia de curvas de Theis. Sin embargo puede comprobarse que es imposible lograr un ajuste con el segundo tramo, que se visualiza en los gráficos log s - log t por la evolución casi horizontal, en el que el aporte diferido de agua por drenaje gravitacional empieza a manifestarse.

Los valores de transmisividad obtenidos son de 160 m<sup>2</sup>/d (pozo 8PA) y 43 m<sup>2</sup>/d (pozo 13PA) lo que permite calcular conductividades hidráulicas de 9,5 m/d y 2,3 m/d respectivamente, valores típicos de mezcla de arena o arena fina; ambos ensayos permiten cuantificar el coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva en torno a 0,2 valor medio más frecuente en arenas finas (Driscoll, 1986, en Custodio y LLamas, 1983).

El cálculo de los respectivos índices de retraso (1/α) y la utilización de la gráfica de determinación del mismo en función

del material que es drenado, (Custodio y LLamas, 1983) permitió comprobar que dichos índices toman valores propios de la arena fina a muy fina. Asimismo esta afirmación se corrobora con los valores indicados para los mismos materiales por Villanueva e Iglesias (1984).

El drenaje diferido impide analizar los datos de recuperación de los pozos (Custodio y LLamas, 1983) pues los pozos vaciados deben llenarse nuevamente y puede haber un retraso si el aire no se expulsa inmediatamente.

Una estimación del radio efectivo o de influencia (R) de un pozo de bombeo puede hacerse aplicando la fórmula general de Thiem para condiciones de equilibrio en régimen permanente. (Custodio y LLamas, 1983):

$$T = 0,366 Q/s * \log R/r \quad (3)$$

Donde:

T = transmisividad (m<sup>2</sup>/d)

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/d)

s = descenso del nivel a la distancia r (m)

R = radio de influencia (m)

r = distancia pozo de bombeo - pozo de observación (m)

Al analizar los descensos verificados en los pozos de observación durante los ensayos a caudal constante, puede aproximarse la magnitud del radio de influencia admitiendo:

S<sub>8PA</sub> = 0,56 m ; r<sub>8PA</sub> = 12,6 m ; Q = 528 m<sup>3</sup>/d ; T = 160 m<sup>2</sup>/d ; R<sub>8PA</sub> = 36,6 m  
 S<sub>13PA</sub> = 1,05 m ; r<sub>13PA</sub> = 16,5 m ; Q = 552 m<sup>3</sup>/d ; T = 43 m<sup>2</sup>/d ; R<sub>13PA</sub> = 27,6 m

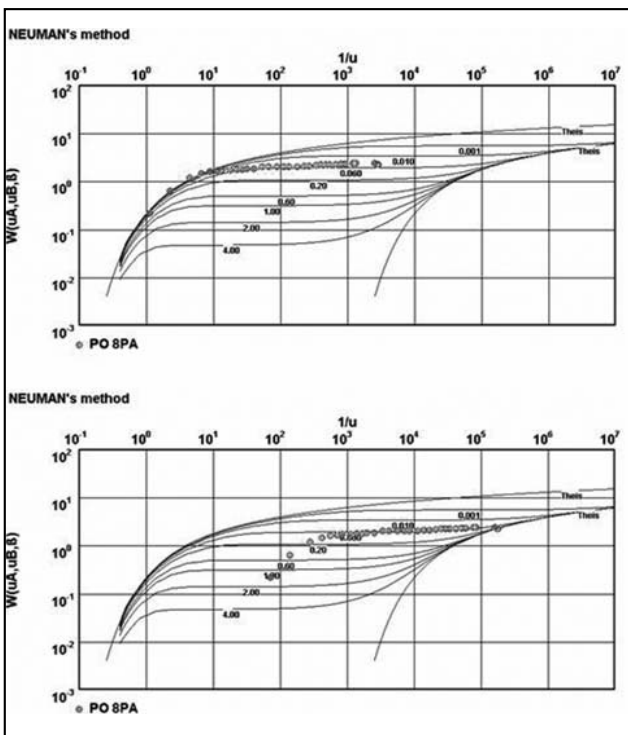


Figura 3. Pozo 8PA. Método de coincidencia de curvas en acuífero libre con drenaje diferido.

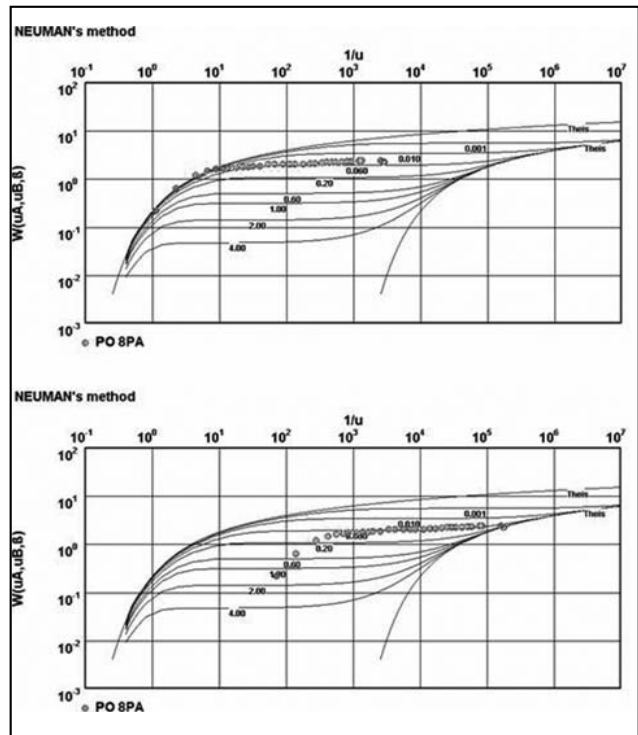


Figura 4. Pozo 13PA. Método de coincidencia de curvas en acuífero libre con drenaje diferido.



Se obtienen así valores teóricos de R entre 36 y 27,6 m. De acuerdo a este razonamiento, considerando el radio del pozo de bombeo 8PA (0,0762 m), el descenso teórico en el mismo sería de 3,2 m y el R resultante de 34 m. De acuerdo a la información de campo el descenso teórico en el pozo de bombeo 13PA sería de 12 m donde resultaría un  $R = 27$  m.

El R no depende del caudal de bombeo sino de los parámetros hidráulicos del acuífero tales como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (en un acuífero libre igual a la porosidad eficaz  $m_e$ ). El cálculo de R para cada pozo, al final del ensayo de bombeo, mediante la fórmula que expresa la variación del radio de influencia con el tiempo  $t$  da valores similares a los obtenidos con la formulación de Thiem, resultando 39,7 m (8PA) y 22,8 m (13PA).

$$R = 1,5 (Tt/S)^{1/2} \quad (4)$$

Dónde:

R = radio de influencia (m)

T = transmisividad ( $m^2/d$ )

S = coeficiente de almacenamiento

t = tiempo de bombeo (días)

De acuerdo a las valoraciones hechas de los parámetros hidráulicos y siguiendo la fórmula anterior, si se admite ahora como valor medio una transmisividad en el orden a los 100  $m^2/d$  y una porosidad efectiva de 0,2 luego de 72 horas de bombeo, a un caudal constante Q, el radio efectivo alcanzaría los 58 m (se acepta en la práctica que luego de 72 horas de bombeo se alcanza un régimen estacionario).

Las magnitudes calculadas de los radios de influencia están en el rango de valores admitidos para los acuíferos libres, en los que suele variar entre 10 y 500 m (Custodio y Llamas, 1983). La superposición e interferencia de los conos de abatimiento

de pozos de bombeo, provoca un aumento de los descensos y una disminución del caudal específico, en tanto y en cuanto los mismos no estén separados una distancia teórica  $d = 2 R$ .

Por lo expuesto el radio efectivo de cada pozo, puede asumirse, con criterio racional, en el orden a los 50 m. Así la distancia óptima entre pozos, y a efectos de anular o minimizar la interferencia entre ellos, puede establecerse en 100 m. Admitiendo una distancia óptima  $d = 2 R = 100$  m y extrapolando un círculo de igual radio (50 m) con centro en cada pozo de la batería, quedan definidos los pozos cuyos radios se superponen. En los pozos del sector A y del sector B de la Figura 1, se observa superposición de radios del pozo 22PA con los del 23PA y 25PA, y del 24PA con el 23PA (Figura 5). También del pozo 2PA con el 1PA y 3PA (Figura 6). Además se observaron las siguientes superposiciones: 18PA y 19PA; 11PA con 21PA y 10PA; 5PA con 7PA y 6PA; 2P con 3P y 4P.

Así y con miras a implementar un uso más eficiente del sistema de extracción, pueden identificarse los pozos que, funcionando alternativamente, evitarían efectos indeseables de merma en su caudal específico.

La mayoría de los pozos del campo de bombeo han sido emplazados a una distancia entre sí acorde a la separación óptima admitida en este trabajo. Sin embargo, un funcionamiento simultáneo y continuo en el tiempo de todos los pozos (como en épocas pico de extracción de agua) podría puntualmente reducir el espesor saturado y por lo tanto la transmisividad induciendo mayores descensos de los niveles de agua o una merma en el caudal de extracción de algunos pozos. Otra circunstancia que debe tenerse en cuenta son los eventuales cambios litológicos locales o heterogeneidades de los sedimentos del acuífero, que modifican sus propiedades hidráulicas y por lo tanto también su productividad.

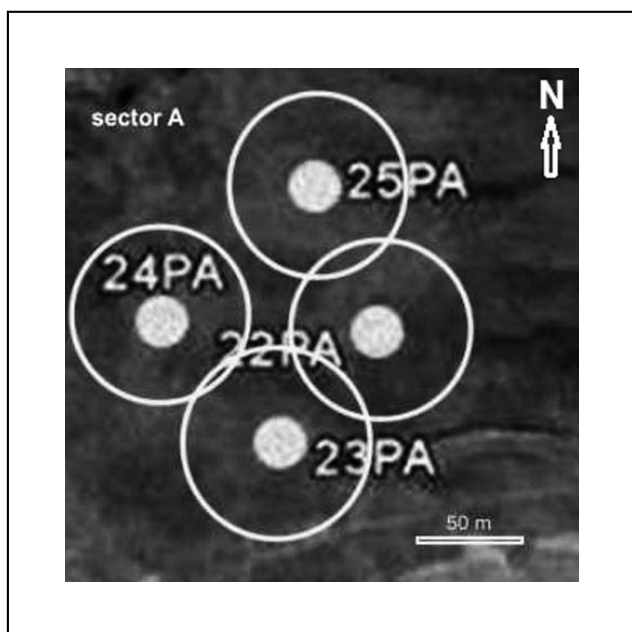


Figura 5. Efectos de bombeo sector A.

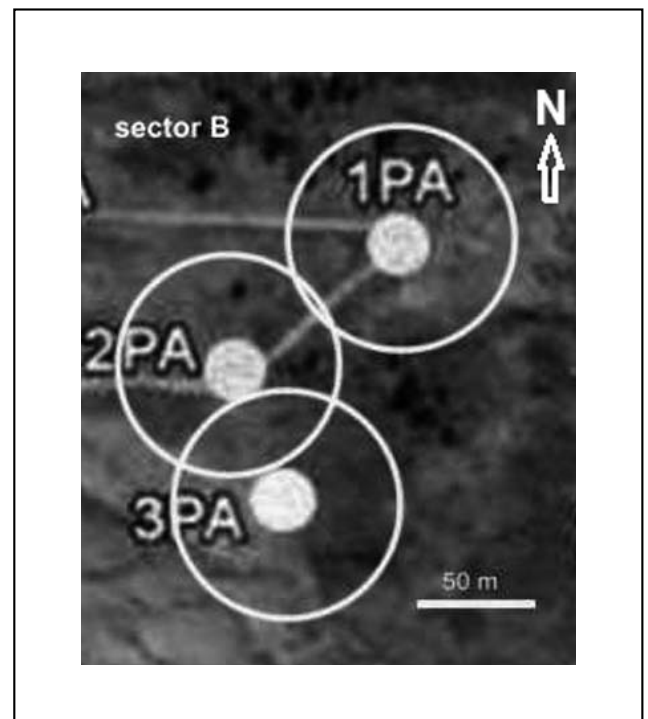


Figura 6. Efectos de bombeo sector B.

## CONCLUSIONES

Si bien el Municipio de Monte Hermoso está llevando a cabo obras e inversiones necesarias y fundamentales para un desarrollo sustentable del recurso, es necesario un estudio exhaustivo para determinar y guiar las acciones a seguir para una óptima y correcta gestión del recurso hídrico, fundamental para su progreso y desarrollo.

Las comprobaciones efectuadas, mediante el análisis de los datos de bombeo, indican un funcionamiento del acuífero como libre con drenaje diferido. Puede postularse que tal comportamiento hidráulico se debería a la presencia de materiales más finos intercalados en la parte superior de la secuencia, así como a la presencia de niveles con cemento carbonático descritos en la bibliografía. La interpretación mediante esta metodología arroja resultados aceptables y ha provisto de una solución técnica y coherente en la valoración de los parámetros hidráulicos del acuífero.

De acuerdo a las comprobaciones efectuadas en base los conceptos teóricos de la hidráulica de pozos, aquellos pozos que se vayan a construir en el acuífero deberían estar distanciados entre sí unos 100 m para evitar efectos de superposición e interferencia. La separación de los pozos ya emplazados en el acuífero guarda, en general, una disposición espacial acorde a la distancia óptima entre ellos, aunque en algunos se verifican efectos de superposición. Por lo tanto, cuando las razones de demanda y operatividad del servicio lo permitan, debiera evitarse la extracción simultánea de agua en los pozos más próximos entre sí e implementar una puesta en funcionamiento que contemple alternar la extracción de agua activando las perforaciones más distanciadas.

Será necesario además, para acompañar el aumento de la demanda futura de agua, construir nuevos pozos en otras

áreas con similares condiciones hidrogeológicas que las ya habilitadas para la explotación, teniendo en cuenta las distancias óptimas calculadas en este trabajo para la ubicación de los pozos. En este marco es imprescindible cuantificar el recurso disponible para llevar a cabo un aprovechamiento racional y sustentable del mismo ya que conocer qué es lo que se tiene en cantidad y calidad, es la única forma de poder gestionar de manera sustentable la fuente de abastecimiento.

Además deberá considerarse para la realización de nuevas perforaciones la ubicación del basural y las lagunas de estabilización al norte de la ciudad, teniendo en cuenta que la dirección del flujo regional del agua subterránea es NNO-SSE, y los contaminantes que por lixiviación alcanzaran la capa freática podrían ser transportados por el agua subterránea atravesando la ciudad poniendo en riesgo las perforaciones de extracción de agua para consumo u otros usos que se encuentren aguas abajo. Al encontrarse los pozos cercanos al mar, la sobreexplotación de los mismos por el aumento de la demanda de agua ocasionada por la población turística durante los meses de verano, podría traer aparejado problemas de salinización de las aguas extraídas para consumo.

## AGRADECIMIENTOS

El Proyecto de Investigación "Sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo de Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires, República Argentina," se realiza mediante el apoyo financiero de la Beca Bicentenario de Investigación y Posgrado Convocatoria 2011 para formación de Magister (Resolución CS Nº 8/2). Un especial agradecimiento al Municipio de Monte Hermoso por su apoyo financiero y su colaboración en la búsqueda de la información requerida y el apoyo en las tareas de campo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AGOSBA, 1990.  
Evaluación de la batería de pozos de agua de la localidad de Monte Hermoso con fines de implementación del servicio de agua corriente.  
*Administración General de Obras Sanitarias. Provincia de Buenos Aires. Informe interno. 16 Pág. y anexos (inédito).*
- ALBOUY, R., J. CARRICA Y G. BONORINO, 2005.  
Identificación y análisis del fenómeno del drenaje diferido en sedimentos pampeanos. Cuenca del Arroyo Napostá Chico, provincia de Buenos Aires.  
*IV Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas I:259-268. ISBN 950-665- 346-1.*
- ALBOUY, R. Y E. CASTRO, 2008.  
Drenaje diferido en sedimentos pampeanos. Análisis de ensayos de bombeo.  
*IX Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Quito, Ecuador. Trabajo Completo en CD.*
- ALIOTTA, S., E. FARINATTI Y S. GINSBERG, 1987.  
Un nivel conchilífero en el subsuelo de Ingeniero White, provincia de Buenos Aires, Argentina.  
*X Congreso Geológico Argentino. Actas I: 123-127. San Miguel de Tucumán.*
- AUGE, M., 2004.  
Regiones Hidrogeológicas.  
*República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fé. La Plata.*
- CARUSO, M., O. CIFUENTES Y M. VAQUERO, 2010.  
Impacto del Turismo sobre los Servicios de Agua Corriente y Desagües Domiciliarios.  
Estudio de caso: Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires.  
*En IV Congreso Latinoamericano de Investigación Turística. Eje Temático: Espacio Turístico y Medio Ambiente. Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.*

- CUSTODIO, E. y R. LLAMAS, 1983.  
Hidrología subterránea.  
*Segunda Edición Corregida. Tomo I. Ediciones Omega, S. A. Barcelona. 1166 pp.*
- DI MARTINO, C. 2012.  
Sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo de la ciudad de Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires, República Argentina.  
*Memoria Técnica N°1. Municipio Monte Hermoso. 28pp.*
- DYMAS, 1974e.  
Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires.  
*Escala 1:500.000. DYMAS (CFI-PBA), La Plata, Inédito.*
- DRISCOLL, F. G., 1986.  
Groundwater and wells. Second Edition.  
*Published by Johnson Division, St. Paul, Minnesota. 1089 pág.*
- ENTE NACIONAL DE OBRAS HÍDRICAS DE SANEAMIENTO, 2003.  
Capítulo 2: Estudios preliminares para el diseño de las obras.
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F. Y PASCUAL, R., 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 103-138. Bahía Blanca, Argentina.*
- GONZALEZ, N., 2005.  
Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires.  
*En "Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires". Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, AGA, XXII : 359-374. La Plata.*
- NEUMAN, S. P., 1975.  
Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response.  
*Water Resources Research, vol 11(2):329-342.*
- SALA, J. M., 1975.  
Recursos hídricos (Especial mención de las aguas subterráneas).  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires: 169-193. Buenos Aires, Argentina.*
- SANTA CRUZ, J. y A. SILVA BUSSO, 1999.  
Escenario Hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional, Argentina. 461-471  
*en: II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea. San Miguel de Tucumán, Tucumán.*
- VILLANUEVA, M. y A. IGLESIAS, 1984.  
Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.  
*IGME, Madrid, 426 pp.*
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC, INC., 1996.  
Aquifer Test. version 2.57 .The intuitive Aquifer Analysis Package.  
*Waterloo Hydrogeologic, Inc., Ontario, Canada.*





## Importância da carta de unidades aquíferas para a elaboração de zoneamento (geo)ambiental - estudo de caso na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos)

## Importance of aquifer unit chart to the preparation of (geo)environmental zoning - case study of the Monjolinho river watershed (São Carlos, SP, Brazil)

Contri Campanelli, Leandro <sup>1</sup> ✉ - Lorandi, Reinaldo

Recibido: 06 de Julio de 2012 • Aceptado: 28 de Diciembre de 2012

### Resumen

*La zonificación ambiental está siendo utilizada como instrumento para el planeamiento ambiental de cuencas hidrográficas, principalmente en lo que se refiere a la expansión urbana. Para la elaboración de la zonificación (geo)ambiental, uno de los atributos del medio físico que debe ser considerado son las unidades aquíferas - cuerpos rocosos con características favorables a la circulación y almacenamiento de agua subterránea. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo la elaboración de una carta de unidades aquíferas para la cuenca hidrográfica del río do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), en escala 1:50.000. Esta cuenca se extiende por, aproximadamente, 275 km<sup>2</sup>, con la mayor parte de su área dentro del municipio de São Carlos y una pequeña área en el municipio vecino de Ibaté. Para la elaboración de este documento cartográfico fueron necesarios los siguientes procedimientos: delimitación de la cuenca a partir de la articulación de cartas topográficas en el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.3; vectorización del perímetro urbano de São Carlos y de parte de Ibaté a partir de imagen de satélite Landsat 5; elaboración de la carta de formaciones geológicas de superficie de la cuenca a partir de cuatro mapeos geológicos-geotécnicos. La carta de formaciones geológicas de superficie así creada, fue reclasificada, atribuyendo a cada una de las formaciones geológicas su unidad aquífera específica. Como resultado se obtuvo una carta de unidades aquíferas de la cuenca hidrográfica del río do Monjolinho en escala 1:50.000, la cual reúne dos tipos de aquíferos: sedimentarios (acuíferos Bauru, Guaraní y Aluvionar) y fracturados (acuíferos Serra Geral y Fraturado).*

**Palabras clave:** Zonificación (Geo)ambiental; Cuenca Hidrográfica; Unidades Aquíferas.

1. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

✉ leandrocontricampanelli@yahoo.com.br

## Abstract

*(Geo)environmental zoning has been increasingly employed to plan and manage watersheds vis-à-vis urban expansion. In order to conduct (geo)environmental zoning it is necessary to take into account some physical attributes of the area in question, especially aquifer units, i.e., rock bodies whose characteristics favor underground water flow and storage. In this context, the purpose of this study was to draw an aquifer unit chart for Monjolinho river basin (São Carlos, SP, Brazil) at 1:50.000 scale. This water basin encompasses an area of 275km<sup>2</sup>, most of which located in the municipality of São Carlos (a smaller part of which located in the neighboring municipality of Ibaté). In order to prepare this cartographic document the following procedures were conducted: delineation of watershed in question from topographic maps with the help of the Geographic Information System (GIS) software ArcGIS 9.3; vectorization of São Carlos perimeter - and part of Ibaté perimeter - based on Landsat 5 satellite images; drawing of a geological formation map of the basin surface based on four geological-geotechnical maps. The surface geological formation chart drawn was reclassified by having specific aquifer units assigned to each of its geological formations. The resulting 1:50.000-scale aquifer unit chart of Monjolinho river basin brings together two groups of aquifers: sedimentary (Bauru, Guarani, and Aluvionar aquifers) and fractured (Serra Geral and Fraturado aquifers).*

**Keywords:** *(Geo)environmental Zoning; Water Basin; Aquifer Units.*

## Resumo

*Um instrumento que tem sido utilizado no planejamento ambiental de bacias hidrográficas é o zoneamento (geo)ambiental, principalmente no que diz respeito à expansão urbana. Para a elaboração do zoneamento (geo)ambiental, um dos atributos do meio físico que deve ser considerado são as unidades aquíferas - corpos rochosos com características favoráveis à circulação e ao armazenamento de água subterrânea. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo a elaboração da carta de unidades aquíferas para a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), na escala de 1:50.000. Esta bacia estende-se por aproximadamente 275 km<sup>2</sup>, tendo a maior parte de sua área contida no município de São Carlos e uma pequena parcela no município vizinho de Ibaté. Para a elaboração deste documento cartográfico foram necessários os seguintes procedimentos: delimitação da bacia a partir da articulação de cartas topográficas no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis 9.3; vetorização do perímetro urbano de São Carlos e de parte de Ibaté a partir de imagem do satélite Landsat 5; elaboração da carta de formações geológicas de superfície da bacia a partir de quatro mapeamentos geológico-geotécnicos. A carta de formações geológicas de superfície gerada foi reclassificada, atribuindo-se a cada uma das formações geológicas sua unidade aquífera específica. Como resultado obteve-se a carta de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho na escala de 1:50.000, a qual reúne dois grupos de aquíferos: sedimentares (aquíferos Bauru, Guarani e Aluvionar) e fraturados (aquíferos Serra Geral e Fraturado).*

**Palavras chave:** *Zoneamento (Geo)ambiental; Bacia Hidrográfica; Unidades Aquíferas.*

## INTRODUÇÃO

Atualmente verifica-se uma tendência dos planejadores adotarem a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão.

“A bacia hidrográfica é uma unidade física e biogeofisiográfica com fronteiras delimitadas e que pode estender-se por várias escalas espaciais - desde pequenas bacias hidrográficas de 10, 20, 200 km<sup>2</sup>, até grandes bacias hidrográficas, como, por exemplo, a bacia do rio da Prata (3.000.000 km<sup>2</sup>)” (IIE-GA, 2009).

As bacias hidrográficas encontram-se submetidas a um grande número impactos ambientais diversificados, como, por exemplo, incidência de processos erosivos (sulcos, ravinas e voçorocas), assoreamento de canais de drenagem, disposição inadequada de resíduos sólidos diversificados, poluição e contaminação de corpos d'água continentais (rios, lagos, represas e reservatórios), exposição do solo e remobilização de materiais inconsolidados, remoção de matas ciliares e de áreas de várzea, os quais, muitas vezes, são decorrentes do crescimento desordenado das cidades.

Um instrumento que, nos últimos anos, tem sido utilizado para subsidiar o planejamento ambiental de bacias e microbacias hidrográficas, sobretudo no que diz respeito à expansão urbana, é o zoneamento (geo)ambiental.

Este último corresponde à compartimentação do território em zonas, com base na avaliação dos atributos do meio físico mais relevantes e de suas dinâmicas.

Quando se pretende elaborar um documento cartográfico de zoneamento (geo)ambiental, com o intuito de auxiliar a atuação de gestores e planejadores nos processos de produção do espaço, um dos atributos do meio físico que deve ser considerado são as unidades aquíferas, cujas características estão relacionadas principalmente com as formações geológicas existentes ao longo do território.

As unidades aquíferas se colocam em uma posição estratégica no contexto da elaboração de um zoneamento (geo)ambiental, pelo fato de que, muitas delas, constituem grandes mananciais subterrâneos de água doce utilizados para fins diversificados.

“No Brasil, em função dos quadros hidrogeológicos dominantes ao longo de toda a extensão do território do país, os corpos rochosos que possuem características favoráveis à circulação e ao armazenamento de água subterrânea – os aquíferos – apresentam as seguintes características: a) podem ter extensões que variam entre alguns quilômetros quadrados até milhões de quilômetros quadrados; b) podem ter espessuras de alguns metros até centenas de metros; c) podem ocorrer na superfície ou se encontrarem em profundidades de até milhares de metros; d) podem estar encerrados entre camadas pouco permeáveis; e) podem ter porosidade/permeabilidade intergranular ou de fraturas; f) podem fornecer água de excelente qualidade para fins diversificados; g) podem apresentar águas relativamente salinizadas” (Rebouças, 2006).

Ainda em relação ao Brasil, a grande quantidade de água subterrânea existente ao longo de toda a extensão do território do país é distribuída, de maneira simplificada, em dois grandes grupos de aquíferos: aquíferos de rochas e materiais sedimentares e aquíferos de rochas fraturadas.

“Os aquíferos de rochas e materiais sedimentares são associados aos terrenos sedimentares, os quais ocupam cerca de 4,13 milhões de km<sup>2</sup>, ou seja, 48,5% do país. Bacias sedimentares relacionadas a esses terrenos são as bacias do Proterozóico/Paleozóico, Proterozóico/Mesozóico e Paleozóico e as bacias menores do Mesozóico e Cenozóico. Nesses terrenos encontram-se 27 sistemas aquíferos de porosidade granular e, subordinadamente, cársticos e fraturados, com área de afloramento ou recarga de 2,76 milhões de km<sup>2</sup> (aproximadamente 32% do país)” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

“Os aquíferos de rochas fraturadas são associados aos terrenos cristalinos pré-cambrianos, os quais ocupam área de cerca de 4,38 milhões de km<sup>2</sup> (aproximadamente 51,5% do território brasileiro) e se comportam como aquíferos fraturados típicos. Esses terrenos coincidem, em grande parte, com o Cráton do Amazonas e os cinturões de dobramento do Neoproterozóico, englobando parte do Cráton do São Francisco” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

“No Estado de São Paulo, os aquíferos de rochas e materiais sedimentares que se destacam pela capacidade de produção de água subterrânea são os Aquíferos Guarani, Bauru, Taubaté, São Paulo e Tubarão. Já com relação aos aquíferos de rochas fraturadas (ígneas e metamórficas), os que se destacam no Estado são o Aquífero Serra Geral e o Aquífero Cristalino” (Iritani & Ezaki, 2008).

É importante ressaltar que as águas subterrâneas reservadas em aquíferos são fundamentais para o desenvolvimento humano e a composição química dessas águas é influenciada pelas rochas e sedimentos que conformam os aquíferos e pelas características climáticas ocorrentes nas áreas de recarga - locais onde os aquíferos são recarregados pelas águas da precipitação.

No Brasil, as águas subterrâneas desempenham papel estratégico no abastecimento público e privado, suprimindo as mais variadas necessidades de água em cidades e comunidades, assim como em sistemas autônomos residenciais, indústrias, serviços, irrigação de cultivos agrícolas e lazer.

“Avaliações preliminares dão indicação de que as águas subterrâneas armazenadas em aquíferos servem para o abastecimento de 30 a 40% da população do Brasil, sobretudo em cidades de pequeno e médio porte” (Hirata, Zoby & Oliveira, 2010).

Nesse contexto, é fundamental que as obras de captação de águas subterrâneas – poço escavado (cacimbão) ou tubular

profundo, galeria ou túnel – sejam construídas conforme as características técnicas mínimas necessárias de uso e proteção, minimizando a incidência de processos de contaminação. “A definição sistemática do perfil hidrogeológico – características e espessuras dos tipos litológicos atravessados pela perfuração – constitui uma das tarefas básicas mais importantes a ser executada durante a exploração dos mananciais subterrâneos” (Rebouças, 2006).

Por último, o papel ecológico das águas subterrâneas também deve ser destacado, principalmente no que diz respeito à manutenção da fauna e da flora e à perenização da maior parte dos rios, lagos e pântanos. Esta última atribuição das águas subterrâneas encontra-se diretamente relacionada com a descarga de aquíferos, através dos fluxos de base.

## OBJETIVO

O trabalho teve como objetivo a elaboração da carta de unidades aquíferas para a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (Brasil, São Paulo, São Carlos), na escala de 1:50.000, a qual poderá auxiliar trabalhos futuros da área de planejamento ambiental e do meio físico, relacionados à elaboração da carta de zoneamento (geo)ambiental da bacia em questão (Campanelli, 2012).

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

“A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho estende-se por área de aproximadamente 275 km<sup>2</sup>, tendo a maior parte de sua área contida no município de São Carlos e uma pequena parcela correspondendo ao município vizinho de Ibaté, no Estado de São Paulo” (Espíndola, 2000).

Essa bacia hidrográfica (Figura 1) tem como característica principal o desenvolvimento urbano de São Carlos e todos os impactos decorrentes deste processo, muitos dos quais com reflexos diretos sobre o meio físico (ex.: feições erosivas, desestabilização de taludes, etc.) e sobre a qualidade da água dos ecossistemas aquáticos pertencentes à bacia (ex.: degradação da qualidade da água, em função da lixiviação de poluentes e contaminantes).

A sub-bacia hidrográfica do rio do Monjolinho é parte integrante da bacia hidrográfica do rio Jacaré-Guaçu, sendo este um dos afluentes da margem direita do rio Tietê, o qual recebe este afluente no reservatório de Ibitinga – um dos sistemas que pertence ao complexo de reservatórios construídos em cascata no rio Tietê.

Levando-se em consideração a divisão do Estado de São Paulo em Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), com base nas principais bacias hidrográficas do Estado, a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho encontra-se inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI 13), a qual corresponde à bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré.

Em relação ao uso e ocupação do solo da bacia, as principais atividades que, ao longo dos anos, foram responsáveis pela modificação da paisagem natural, gerando, em algumas situações, grandes impactos ambientais, foram: cultura do café (ciclo cafeeiro – apogeu entre 1876 e 1888); indústrias (as primeiras atividades industriais se instalaram na região em função do ciclo cafeeiro e em consonância com a imigração); agroindústria açucareira (fator relevante na modificação da paisagem natural desde a década de 1950); pecuária.

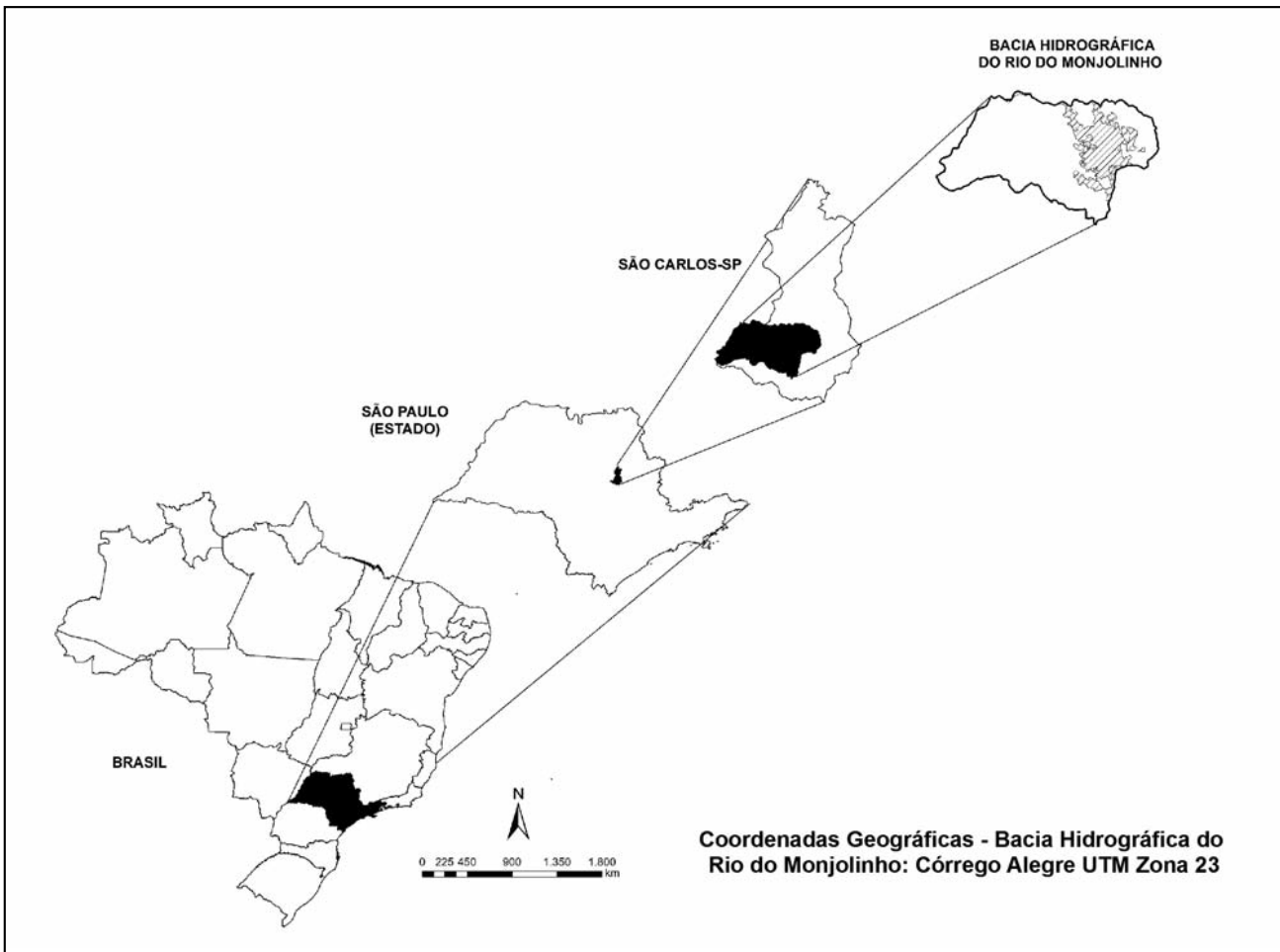


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. Fonte: Leandro Contri Campanelli (2012).

“O rio do Monjolinho, principal córrego da bacia em questão, possui extensão de aproximadamente 43,25 km e nasce no Planalto de São Carlos, a leste do município, na cota de 900 metros, percorrendo o sentido leste-oeste, dando origem a uma grande planície de inundação” (Espíndola, 2000). Ao longo do perímetro urbano de São Carlos, o rio do Monjolinho apresenta alguns trechos canalizados e recebe contribuições de vários tributários, como os córregos Santa Maria Madalena, Tijuco Preto, do Mineirinho e do Gregório e também de águas residuárias – esgotos domésticos e efluentes provenientes de atividades industriais diversificadas (papel, alimentos, tintas, etc.). Fora do perímetro urbano, o rio do Monjolinho recebe contribuições de outros tributários, como os córregos Água Quente, Água Fria, do Cancã, da Serra e do Palmital.

“Com relação às características climáticas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, o clima regional classifica-se, segundo sistemática de Köppen, como Cwb, com duas estações climáticas bem definidas: uma seca (de abril a setembro) e outra chuvosa (de dezembro a fevereiro). As médias anuais de precipitação variam entre 1200 e 1500 mm e os ventos frequentes são os de noroeste (30% do ano) e sudoeste (20% do ano), com velocidade média entre 3,5 e 4 m/s” (Espíndola, 2000).

“Com relação ao relevo, a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho caracteriza-se por uma variedade de formas. As formas de relevo características da bacia em questão são: Relevo

Colinoso e Relevo Escarpado. Formas de relevo menos expressivas e que também são verificadas na bacia são: Planícies Aluviais e Testemunhos” (Sé, 1992 *apud* Maciel, 2000).

Com relação à geologia, pode-se afirmar que as formações geológicas de superfície predominantes ao longo de toda a extensão da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Formação Serra Geral e Formação Botucatu, pertencentes ao Grupo São Bento, Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru, e Formação Pirambóia. Na bacia hidrográfica em questão também há ocorrência de Suítes Básicas e Depósitos Recentes do Quaternário.

A Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento, caracteriza-se por rochas eruptivas básicas extrusivas, como, por exemplo, o basalto, com a presença de alguns corpos intrusivos subsuperficiais na forma de diques e sills, intercalados localmente por arenito eólico.

A origem das rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral encontra-se associada a atividades vulcânicas do tipo fissural que ocorreram a partir do período Jurássico Superior, ao longo da região que corresponde à Bacia Sedimentar do Paraná.

A Formação Botucatu, pertencente ao Grupo São Bento, caracteriza-se por arenitos de coloração esbranquiçada, adquirindo coloração avermelhada à medida que os arenitos se aproximam dos magmatitos da Formação Serra Geral.



“Em função das características dos sedimentos que compõem a Formação Botucatu, sobretudo a predominância do arenito de granulometria fina, elevado grau de arredondamento dos grãos e presença de estruturas sedimentares com estratificação cruzada, acredita-se que a formação geológica em questão ocorreu devido à deposição de origem eólica e contribuição secundária proveniente de sedimentação fluvial e/ou lacustre” (Maciel, 2000).

Do ponto de vista litoestratigráfico, a Formação Botucatu é característica do período Jurássico (Era Mesozoica).

“A Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru, caracteriza-se por bancos de arenitos de granulação fina, coloração que varia de róseo a castanho, estratificação cruzada e espessuras variando entre 2 e 20 metros, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos de coloração que varia de castanho-avermelhado a cinza-castanho, maciços ou com acabamento plano-paralelo grosseiro” (IPT, 1981 apud Maciel, 2000).

Do ponto de vista litoestratigráfico, o Grupo Bauru é característico do período Cretáceo Superior (Era Mesozoica).

“A Formação Pirambóia, por sua vez, caracteriza-se por arenitos de granulometria que varia de fina a média, de coloração amarelada e com predominância de finos” (Zuquette, 1981).

Do ponto de vista litoestratigráfico, a Formação Pirambóia é característica do Triássico-Jurássico (Era Mesozoica).

As Suítes Básicas, que também podem ser verificadas na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, especificamente nas proximidades da foz do rio do Monjolinho, caracterizam-se por rochas intrusivas magmáticas básicas, que afloram em decorrência de processos erosivos das rochas sobrejacentes.

Com relação aos Depósitos Recentes do Quaternário, estes caracterizam-se por materiais sedimentares (sedimentos de granulação fina e argilas) e matéria orgânica depositados recentemente pela ação dos rios, ao longo de áreas de fundos de vale (planícies aluvionares).

“Com relação à pedologia, os tipos de solo presentes ao longo da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Latossolos, com destaque para o Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo; Areias Quartzosas Profundas; Solos Litólicos; Solos Hidromórficos; Terra Roxa Estruturada” (Souza, Santos & Palhares, 2000).

“As formações vegetacionais de ocorrência na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Floresta Estacional Semidecidual Submontana (mata); Floresta Estacional Semidecidual Aluvial (mata ciliar); Savana Florestada (Cerradão); Savana Arborizada (Cerrado); Capoeiras (áreas em processo de sucessão ecológica, que caracterizam-se por vegetação secundária composta por gramíneas e arbustos esparsos)” (Silva, Abdon & Paranaguá, 2000).

Ao longo da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho também pode-se verificar fragmentos reflorestados com espécies exóticas de Pinus e Eucalyptus e grandes áreas de pastagem e de cultivo de cana de açúcar que reduziram significativamente, ao longo dos anos, as áreas de vegetação nativa.

## MATERIAIS E MÉTODOS - ELABORAÇÃO DA CARTA DE UNIDADES AQUÍFERAS

Para a elaboração da carta de unidades aquíferas foi necessário, inicialmente, a elaboração da carta de formações geológicas de superfície da bacia, na escala de 1:50.000.

Esta última serviu como base para a produção da carta de unidades aquíferas, uma vez que as unidades aquíferas são correspondentes às formações geológicas existentes na área de estudo.

Para a geração da carta de formações geológicas de superfície, realizou-se a articulação de quatro cartas topográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na escala de 1:50.000 – folhas de São Carlos (SF-23-Y-A-I-1), Ibaté (SF-23-V-C-IV-3), Araraquara (SF-22-X-D-VI-4) e Ribeirão Bonito (SF-22-Z-B-III-2) – no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis 9.3 e utilizando-se a referência espacial “Córrego Alegre UTM Zona 23”.

Esta articulação das quatro cartas topográficas do IBGE possibilitou a delimitação da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, partindo da foz do rio do Monjolinho, seguindo perpendicularmente as curvas de nível e passando pelos pontos cotados.

Para a delimitação e vetorização do perímetro urbano de São Carlos e de parte do perímetro urbano de Ibaté, utilizou-se imagem de satélite atualizada proveniente do satélite Landsat 5 e baixada gratuitamente do site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Para completar este documento cartográfico, foram utilizados quatro mapeamentos geológico-geotécnicos, os quais compartimentaram a bacia hidrográfica nas seguintes formações geológicas de superfície: Formação Adamantina, relativa ao Grupo Bauru; Formação Serra Geral e Formação Botucatu, relativas ao Grupo São Bento; Formação Pirambóia; Depósitos Recentes do Quaternário; Suítes Básicas.

Os mapeamentos geológico-geotécnicos utilizados foram: a) Mapa de Substrato Rochoso desenvolvido por Muro (2000) para o município de São Carlos; b) Mapa Geológico da Região de São Carlos, realizado por Zuquette (1981); c) Mapeamento geológico-geotécnico da folha de Ribeirão Bonito; d) Mapa Fotogeológico da Região de São Carlos, desenvolvido por Fiori, Gama Jr. & Caetano (1976).

Por fim, para a geração do documento cartográfico representativo das unidades aquíferas da bacia, efetuou-se a reclassificação da carta de formações geológicas de superfície anteriormente gerada, atribuindo-se a cada uma das formações geológicas de superfície de ocorrência na bacia sua unidade aquífera específica.

Para o cálculo das porcentagens referentes a cada uma das unidades aquíferas em relação à área total da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, utilizou-se o módulo “Calculate Geometry” do software ArcGis 9.3.

## RESULTADOS

Como resultado do trabalho, obteve-se a carta de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, na escala de 1:50.000 (Figura 2). Esta carta reúne dois grupos de aquíferos: aquíferos sedimentares (apresentam porosidade intergranular) e aquíferos fraturados (apresentam porosidade de fraturas).

Os aquíferos sedimentares são representados pelo Aquífero Bauru, Aquífero Guarani e Aquífero Aluvionar.

Os aquíferos fraturados da bacia são representados pelo Aquífero Serra Geral e Aquífero Fraturado.

“O Aquífero Bauru é formado por rochas sedimentares arenosas, areno-argilosas e siltosas pertencentes ao Grupo Bauru e depositadas em ambiente desértico e fluvial, sob clima árido e semi-árido, há mais de 65 milhões de anos” (Iritani & Ezaki, 2008). Trata-se de um aquífero freático, cuja recarga ocorre diretamente pela precipitação pluvial ao longo de toda sua extensão, sendo que sua base de drenagem é constituída pelos rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná. Sua espessura é irregular, atingindo valores superiores a 300 metros na região do Planalto de Marília.

Com relação à litologia do Aquífero Bauru, em sua porção superior, os arenitos são intercalados por camadas de sedimentos de granulometria fina, como, por exemplo, lamitos e siltitos, ou possuem uma cimentação carbonática entre os grãos de areia, que reduz a capacidade deste aquífero de armazenar e transmitir água. Na porção basal ou inferior predominam arenitos com baixo teor de material fino, conferindo maior produtividade aos poços perfurados. Trata-se de um aquífero poroso e livre.

O Aquífero Guarani é relativo às formações geológicas Botucatu e Pirambóia e se caracteriza por ser sedimentar, poroso, livre e confinado. “A porção aflorante deste aquífero, isto é, aquela que pode ser observada na superfície do terreno e que tem comportamento de aquífero livre, é pequena quando comparada com sua área total. No Estado de São Paulo, a porção

aflorante estende-se por cerca de 16.000 km<sup>2</sup>, de Rifaina, ao norte, a Fartura, ao sul, passando pela região de Ribeirão Preto e Botucatu. Nesta porção aflorante, a espessura média atinge 100 metros. Sua maior área de ocorrência no Estado, aproximadamente 174.000 km<sup>2</sup>, em sentido oeste, é confinada pelos basaltos do Aquífero Serra Geral e pelas rochas do Aquífero Bauru” (Iritani & Ezaki, 2008).

“Com relação à litologia, o Aquífero Guarani é constituído principalmente por arenitos de granulação média a fina, depositados pela ação eólica em ambiente desértico há cerca de 130 milhões de anos. Pelo fato de estes arenitos apresentarem certa homogeneidade, os mesmos possuem grandes quantidades de poros interconectados que possibilita o armazenamento de grandes quantidades de água subterrânea” (Iritani & Ezaki, 2008).

O Aquífero Guarani é o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo, fornecendo água de excelente qualidade para usos humanos diversificados, como, por exemplo: abastecimento da população, desenvolvimento de atividades econômicas e lazer. “Está localizado na região centro-leste da América de Sul, estendendo-se pelo Brasil (71%), Paraguai (6,1%), Uruguai (3,8%) e Argentina (19,1%) e ocupando área de 1,2 milhões de km<sup>2</sup>” (OEA, 2009 apud Albuquerque Filho, 2011).

O Aquífero Aluvionar é relativo aos Depósitos Recentes do Quaternário e se caracteriza por ser sedimentar, poroso e livre. Este tipo de aquífero ocorre em fundos de vale, nos quais há depósitos de materiais sedimentares e de matéria orgânica pelas cheias dos rios.

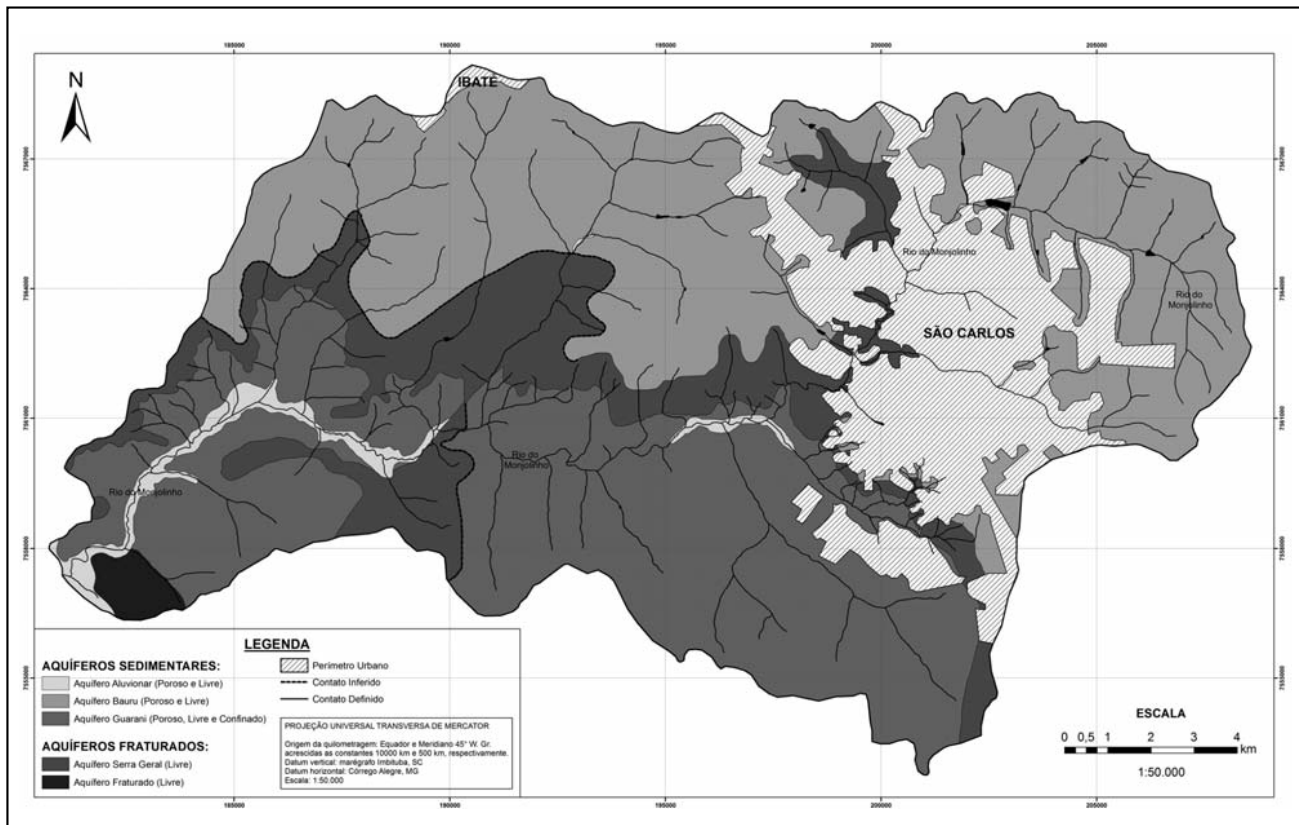


Figura 2. Mapa de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (São Carlos, SP). Fonte: Leandro Contri Campanelli & Reinaldo Lorandi (2012).

“O Aquífero Serra Geral, por sua vez, foi formado entre 138 e 127 milhões de anos atrás e é constituído por rochas, sobretudo basaltos, originadas dos derrames basálticos (derrames de lava vulcânica) da Formação Serra Geral e intrusões diabásicas. Nos basaltos (rochas compactas, duras e de coloração escura), as aberturas favoráveis ao armazenamento e ao fluxo de água subterrânea são fraturas originadas durante o resfriamento dos derrames de lava vulcânica e também posteriormente à consolidação das rochas como resultado dos esforços tectônicos decorrentes da movimentação da crosta terrestre. Entre os derrames de lava vulcânica também podem aparecer outras feições geológicas favoráveis à circulação de água, as quais são representadas por camadas arenosas restritas e níveis de amígdalas e vesículas (bolhas aprisionadas durante o resfriamento da lava vulcânica, gerando estruturas em forma de pequenas cavidades ocas ou preenchidas por minerais)” (Iritani & Ezaki, 2008).

“Em sua área de afloramento, onde se concentra grande parte dos poços perfurados, a espessura do Aquífero Serra Geral alcança, em média, 300 metros” (Iritani & Ezaki, 2008).

Este aquífero também se caracteriza por apresentar água de excelente qualidade para usos diversificados, incluindo abastecimento público e consumo humano.

O tipo de aquífero associado às Suítes Básicas é o fraturado, que se caracteriza por ser livre.

As porcentagens referentes a cada uma das unidades aquíferas em relação à área total da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho são: Aquífero Bauru (34%), Aquífero Guarani (31%), Aquífero Aluvionar (2%), Aquífero Serra Geral (14%) e Aquífero Fraturado (1%). O perímetro urbano de São Carlos e parte do perímetro urbano de Ibaté correspondem a 18% em relação à área total da bacia.

## DISCUSSÃO

A definição das unidades aquíferas no contexto da elaboração de um zoneamento (geo)ambiental para uma bacia hidrográfica, visando balizar a expansão urbana, é fundamental para se restringir a ocupação de porções da bacia que abrigam áreas de recarga (áreas frágeis, nas quais ocorre o recarregamento do aquífero pelas águas provenientes da precipitação).

Nesse contexto, é importante ressaltar que a bacia hidrográfica do rio do Monjolinho abriga porções que correspondem a áreas de recarga dos aquíferos que fazem parte da bacia, com destaque para as áreas de recarga do Aquífero Guarani, as quais demonstram um histórico de ocupação irregular, principalmente em áreas periféricas da cidade de São Carlos (SP).

Diversos estudos mostram que os aquíferos vêm sofrendo um processo difuso de contaminação em suas áreas de afloramento, que culmina em alterações significativas na qualidade da água reservada.

Como exemplo pode-se citar o trabalho de *Barbosa et al. (2011)*, o qual demonstra que “o Aquífero Guarani vem sofrendo um processo difuso de contaminação em sua área de afloramento no Estado de São Paulo, em função, principalmente, do avanço do uso da terra para as atividades agrícolas que utilizam agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fungicidas, nematicidas, acaricidas e formicidas - compostos que apresentam grande mobilidade na água subterrânea), como, por exemplo, cana de açúcar, café, cítricos e milho” (*Barbosa et al., 2011*).

*Barbosa et al. (2011)* também enfatizaram “a necessidade de ampliação do conhecimento hidrogeológico relacionado ao Aquífero Guarani, dos aspectos de uso e ocupação do solo nos terrenos correspondentes às áreas de afloramento e também o monitoramento contínuo da qualidade da água, pois os resultados do estudo demonstraram que a vulnerabilidade à contaminação do aquífero varia de média a alta” (*Barbosa et al., 2011*).

“Alguns compostos, provenientes de atividades urbanas e rurais, que são capazes de gerar cenários de contaminação nos aquíferos brasileiros são: nitrato (reflexo da falta de sistemas de esgotamento sanitário em diversos municípios e da aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas); combustíveis líquidos derivados do petróleo (vazamentos em tanques de armazenamento dá origem à pluma de contaminação); metais pesados e solventes clorados (muito comuns em diferentes atividades industriais); chorume (líquido resultante da decomposição da matéria orgânica presente em resíduos sólidos domésticos, que apresenta alto potencial poluidor); vírus e bactérias” (*Hirata, Zoby & Oliveira, 2010*).

Diante disso, algumas medidas capazes de assegurar a não progressão dos processos difusos de contaminação e a consequente inviabilização da utilização das águas subterrâneas provenientes das diferentes unidades aquíferas para fins humanos diversificados são: caracterização detalhada do perigo de contaminação (identificação de locais que podem sofrer contaminação das águas com mais facilidade); iniciativas de planejamento e ordenamento do território, voltadas para o disciplinamento do uso e ocupação do solo, principalmente nas áreas de recarga; implantação e manutenção de vegetação no entorno e ao longo de áreas de recarga, a qual além de facilitar a recarga do aquífero pelas águas da precipitação atua como um filtro natural na retenção de poluentes e contaminantes.

## TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

ALBUQUERQUE FILHO, J. L., 2011.

Subsídios ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do sistema aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M. DE; IKEMATSU, P.; FILHO, J. L. A. & CAVANI, A. C. M., 2011.

Avaliação do perigo de contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento do Estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas.

Águas Subterrâneas, v. 25, n.1, p.1-14.

CAMPANELLI, L. C., 2012.

Zoneamento (geo)ambiental analítico da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho (São Carlos - SP).

Trabalho de Qualificação (Mestrado Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos.

- ESPÍNDOLA, E. L. G., 2000.  
O rio do Monjolinho: um estudo de caso.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Editora Rima.*
- FIORI, A. P.; GAMA JR., E. & CAETANO, M. R., 1976.  
Mapa fotogeológico da região de São Carlos.  
*Escala 1:100.000.*
- HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G. & OLIVEIRA, F. R. DE, 2010.  
Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial.  
*In: Bicudo, C. E. De M.; Tundisi, J. G. & Scheuenstuhl, M. C. B. Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica.*
- INSTITUTO INTERNACIONAL DE ECOLOGIA E GERENCIAMENTO AMBIENTAL - IIEGA, 2009.  
Manual de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas.  
*São Carlos: Editora Cubo.*
- IRITANI, M. A. & EZAKI, S., 2008.  
As águas subterrâneas do Estado de São Paulo.  
*São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente - SMA.*
- MACIEL, G. DE C., 2000.  
Geologia e geomorfologia.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- MURO, M. D., 2000.  
Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos -SP.  
*Dissertação (Mestrado Geotecnica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.*
- REBOUÇAS, A. DA C., 2006.  
Águas subterrâneas.  
*In: Rebouças, A. da C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Ed. Escrituras.*
- SILVA, J. DOS S. V. DA; ABDON, M. DE M.; PARANAGUÁ, P. A., 2000.  
Remanescentes de vegetação.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- SOUZA, P. A. P.; SANTOS, M. B. DOS; PALHARES, J. C., 2000.  
Pedologia.  
*In: Espíndola, E. L. G.; Silva, J. S. V.; Marinelli, C. E.; Abdon, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: Ed. Rima.*
- ZUQUETTE, L. V., 1981.  
Mapeamento geotécnico preliminar da região de São Carlos.  
*Dissertação (Mestrado Geotecnica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.*



## **Amenazas de depósitos de laderas en ambientes áridos. La revegetación como acción preventiva (Bromeliaceae - Deuterocohnia longipetala (Baker) Mez.)**

### **Hazards of deposits of slopes in arid environments. The revegetation as preventive action (Bromeliaceae - Deuterocohnia longipetala (Baker) Mez.)**

Suñeres, G.M. ✉ - Flores, D. G. - Gamboa, L.A. - Pittaluga, M. A.

Recibido: 28 de Junio de 2012 • Aceptado: 28 de Diciembre de 2012

#### **Resumen**

*Se efectuó un estudio de los subsistemas físico y biótico, en la región central de la vertiente occidental de la Precordillera Oriental, para reconocer amenazas potenciales de aluviones o debris flow, mediante el análisis de lóbulos o depósitos de abanicos aluviales y poder brindar medidas preventivas de control mediante la dispersión de vegetación nativa. El análisis geomorfológico muestra numerosos depósitos con distintos tipos de dinámicas y en diferentes posiciones topográficas, correspondientes a distintos ciclos sedimentarios acontecidos durante el Cenozoico tardío. La vegetación relevada contiene especies y coberturas vegetales diferentes en los depósitos fanglomerádicos, destacándose el predominio de Deuterocohnia longipetala (Baker- Mez.). Los depósitos de canales actuales y activos tienen un predominio de Bulnesia retama y Larrea divaricata mientras que los inactivos tienen un dominio de chaguares (Deuterocohnia longipetala). Se recomienda la dispersión y revegetación en los lóbulos semiactivos con la planta citada en último término por su alta resistencia a las condiciones xéricas y buena capacidad de fijación y formación de suelos.*

**Palabras clave:** *abanicos aluviales, ambientes del Cuaternario, procesos dinámicos; vegetación nativa.*

#### **Abstract**

*A study of the physical and biotic subsystems, in the central region of the western slope of the Eastern Precordillera, was made to recognize potential threats of lobes or deposits of alluvial fans and its likely attenuation through the propagation of existing native vegetation. The geomorphological analysis presents numerous deposits with different types of dynamics and in different topographic positions, corresponding to sedimentary cycles that occurred during the late Cenozoic. The surveyed vegetation shows species and different types of vegetation in*

1. Gabinete de Geología Ambiental. FCFN-UNSJ.CONICET.  
Avda. Ignacio de la Roza esq. Meglioli. Rivadavia.  
J 5400 San Juan. Argentina.

✉ graciela\_suñeres@yahoo.com.ar

*alluvial fans deposits, highlighting the predominance of Deuterocohnia longipetala (Baker) Mez.). The current and active deposits have a predominance of Bulnesia retama and Larrea divaricata while inactive have a domain of "chaguares" (Deuterocohnia longipetala). It is recommended the spread and revegetation with this plant into semi-active lobes deposits, due to its high resistance to xeric conditions and good ability of fixation and soil formation.*

**Keywords:** *alluvial fan deposits, Quaternary environments, dynamic processes; native vegetation.*

## INTRODUCCIÓN

La región árida del oeste argentino se caracteriza por la presencia combinada de dos amenazas naturales: la climática y la sísmica. Los efectos de sus interacciones se expresan en los sistemas físicos y bióticos de estas regiones de alta montaña, tanto en las áreas cumbres como en las laderas pedemontanas. En el área de estudio, la dinámica de lóbulos de abanicos y conos aluviales existentes en laderas, amenazan obras de diferentes tipos, como viales, canalizaciones hidráulicas, núcleos en desarrollo poblacionales y diferimientos agrícolas (olivícolas y vitícolas) (Flores, 2008 y 2009; Flores y Suvires, 2012). En el área, la ruta Provincial N° 265, camino no pavimentado que une los valles intra-precordilleranos, recibe las descargas de bajadas de aguas de escorrentía estivales provenientes de las estribaciones serranas de la Precordillera. El área de piedemonte analizado, en la ladera occidental de la sierra Chica de Zonda, muestra un mosaico de unidades geomorfológicas, de distinta dinámica y con distinta vegetación (Suvires, 2009). Los lóbulos de abanicos activos se desplazan entre los lóbulos inactivos colonizados de vegetación. La amenaza o peligro es el factor externo a una comunidad expuesta (o a un sistema expuesto), representado por la potencial ocurrencia de un fenómeno (o accidente) desencadenante, el cual puede producir un desastre al manifestarse; mientras que el riesgo es definido como el producto de la peligrosidad natural, la vulnerabilidad y la exposición, (Ayala Carcedo, 2002).

El manejo ecológico en la zona distal del piedemonte, donde se ubican los cultivos y la ruta, podría ser llevado a cabo mediante la expansión y utilización de especies nativas xerofíticas. Esta hipótesis dio lugar a la realización de este trabajo con el objetivo de identificar los distintos ambientes geomorfológicos y sus diferentes depósitos, clasificar la dinámica de los procesos sedimentarios que han intervenido en la zona desde el Pleistoceno tardío al Actual para finalmente establecer relaciones con la vegetación xerofítica nativa existente. La finalidad del trabajo es plantear medidas de mitigación de amenazas mediante revegetación. Sería necesario entonces, en regiones áridas de laderas expuestas y de alta dinámica, evaluar la factibilidad de mitigación de numerosas áreas impactadas del piedemonte por erosión de los suelos, formación de aluviones y arrastre de grandes volúmenes de sedimentos durante la época de lluvias estivales. Por otro lado, al tratarse de una zona árida, la restauración natural es un proceso lento y complejo (Flores Palma, 2004, Dalmaso, 2010). Se deben realizar estudios previos con fines de ampliar el conocimiento sobre las especies adecuadas para la revegetación, disminuyendo tiempos, labores y costos y buscando los mejores resultados posibles en el terreno. Las características fisiológicas y ecológicas de *Deuterocohnia longipetala* (Baker - Mez) han sido poco estudiadas, representando un gran aporte el de Funes Pinter (2008), quien sostiene que esta especie, conocida como "chaguar", se localiza principalmente en los ambientes secos de las exposiciones más

cálidas, N y NO. Este autor señala que se ubican en las grietas donde la roca aún no ha sido meteorizada. Es decir, que se trata de una especie pionera saxícola (Morrello, 1958, Mateu et al, 1988), la cual puede ser utilizada en la formación de suelo, creando condiciones adecuadas para el establecimiento de otras especies. No obstante en la presente área de estudio se ha encontrado a esta planta distribuida en depósitos aluviales fan-glomerádicos cuaternarios abundante de clastos de calizas, clasto y matriz sostén. Las características de rusticidad de la especie representan un gran ahorro energético en las tareas de restauración y de protección de laderas. El estudio propone mitigar los efectos de estos riesgos sobre áreas de desarrollo mediante la revegetación con una especie perenne que domina sobre estos depósitos.

*Deuterocohnia longipetala*, pertenece a la División Magnoliophyta, Clase Liliópsida (Monocotiledoneae), familia Bromeliaceae, dentro de la cual se ubica en la subfamilia Pitcairnioideae (Kiesling, 1994, Cabrera, 1994, Braun Blanquet, 1929). Es una Bromeliácea, especie nativa que crece en barrancas escarpadas, laderas de las montañas, como así también en los piedemontes y sierras. Se distribuye en alturas existentes entre los 400 a 2.100 msnm. Estas bromeliáceas muestran muchas adaptaciones al hábito xerófito. Las hojas elongadas, más o menos cóncavas, son típicamente agrupadas en la base de la planta, y las bases envainadoras de las hojas típicamente retienen agua. Se reproduce mediante la división de rizomas, tubérculos o bulbos y por semilla. Los individuos de esta especie pueden extenderse entre los 60-90 cm de diámetro, formando poblaciones que pueden llegar a los 90-120 cm de diámetro y entre 120 y 180 cm. Crecen en individuos maduros en forma anular con un centro desprovisto de especies y donde parte del transporte arenoso eólico queda retenido. Esta última es utilizada por las raíces del chaguar facilitando el entrapamiento de arena y el desarrollo de un suelo minero-orgánico.

El efecto de retención de suelo se observa a partir de los 0,40 m de diámetro de la colonia. Las colonias correspondientes al intervalo 0,4 -1 m presentaron una retención media de  $50,413 \pm 22,433$  kg, las mayores al metro  $51,400 \pm 17,878$  kg de suelo (Funes Pinter, op cit). Considerando que los plantines demuestran una considerable tolerancia a la falta de agua, constituye una gran ventaja en lo que a tareas de mantenimiento se refiere, minimizando cuidados, frecuencia de riego, aunque debe considerarse un factor limitante observado por dicho autor, en los ensayos de Speedling y se trata del lento crecimiento que manifiesta la planta en los primeros 5 meses desde que emerge. Teniendo en cuenta los datos de campo de retención de suelo, los cuales indican que se requiere que forme colonias con un tamaño mayor a los 0,4 m, se puede inferir que, para que la especie alcance el desarrollo y crecimiento necesario, se requieren periodos de tiempo extensos, tratándose quizás de décadas. Es, por tanto, necesario que la especie adquiera cierto tamaño y grado de madurez para que sea realmente útil en la

fijación y protección de laderas. El volumen de suelo fijado es considerable, con lo que demuestra ser una especie que puede funcionar muy bien en tareas de protección y restauración de áreas degradadas.

### ÁREA DE ESTUDIO

El área de análisis se ubica en la intersección de los  $31^{\circ} 34' 58''$  S y  $68^{\circ} 42' 47''$  O, corresponde al sector centro del piedemonte occidental de la sierra Chica de Zonda, Precordillera Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981), provincia de San Juan. Argentina. Es una región pedemontana ubicada entre el valle

de Zonda al norte y otros valles precordilleranos al sur. En el piedemonte se desarrollan los depósitos de abanicos de diferentes edades que se extienden desde los 960 m hasta sobrepasar los 750 msnm. La zona corresponde a un ámbito de aridez extrema con precipitaciones pluviales estivales inferiores a 80 mm/año. Estas lluvias de verano forman correntadas y avenidas aluvionales peligrosas de corta duración, que favorecen la movilidad rápida de los depósitos de cauce aguas abajo. Los depósitos de abanicos aluviales tienen sus cuencas de recepción insertas en el ámbito montañoso de la sierra Chica de Zonda, en alturas promedio a 1900 msnm (Figura 1).

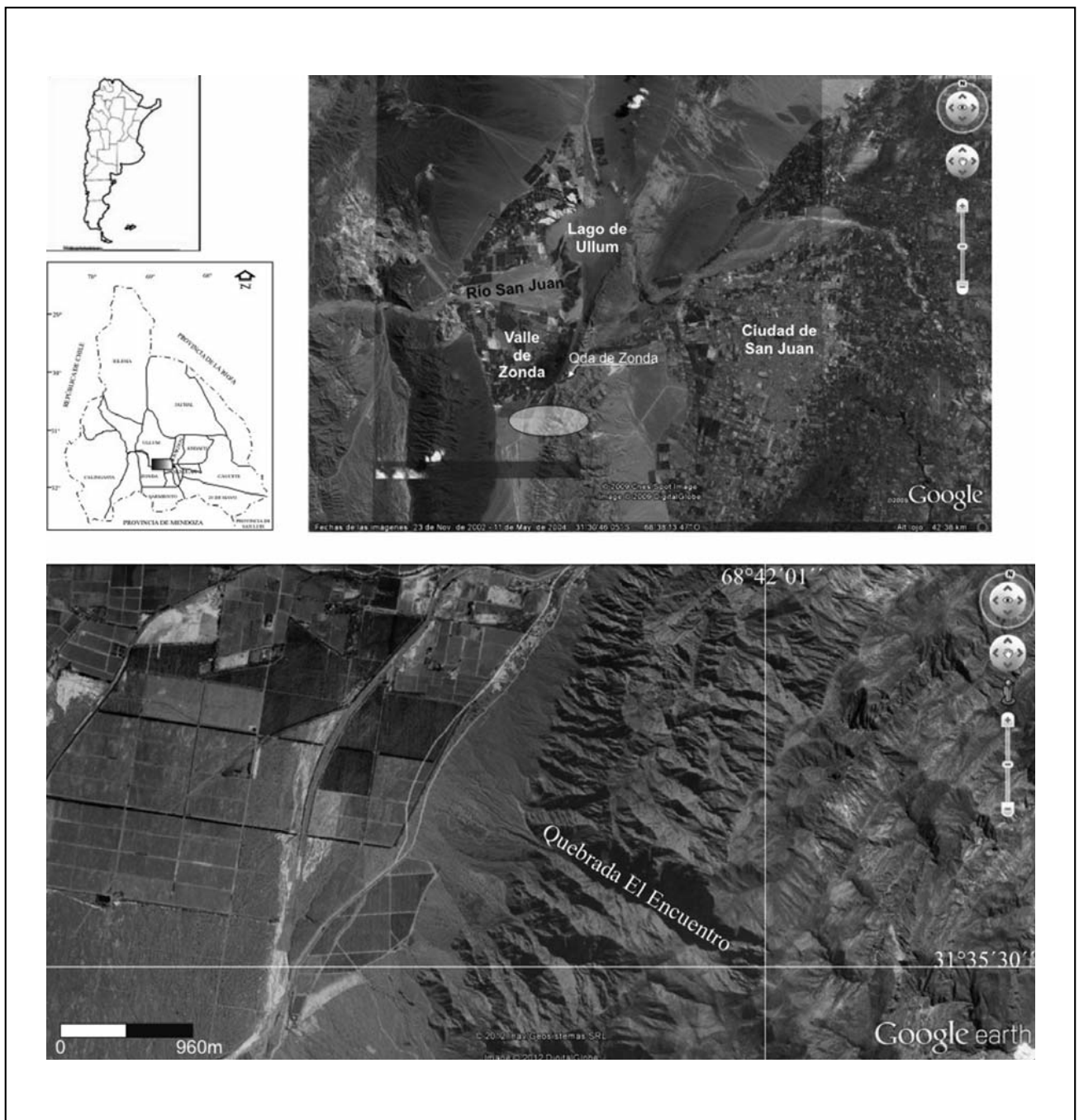


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

**METODOLOGÍA**

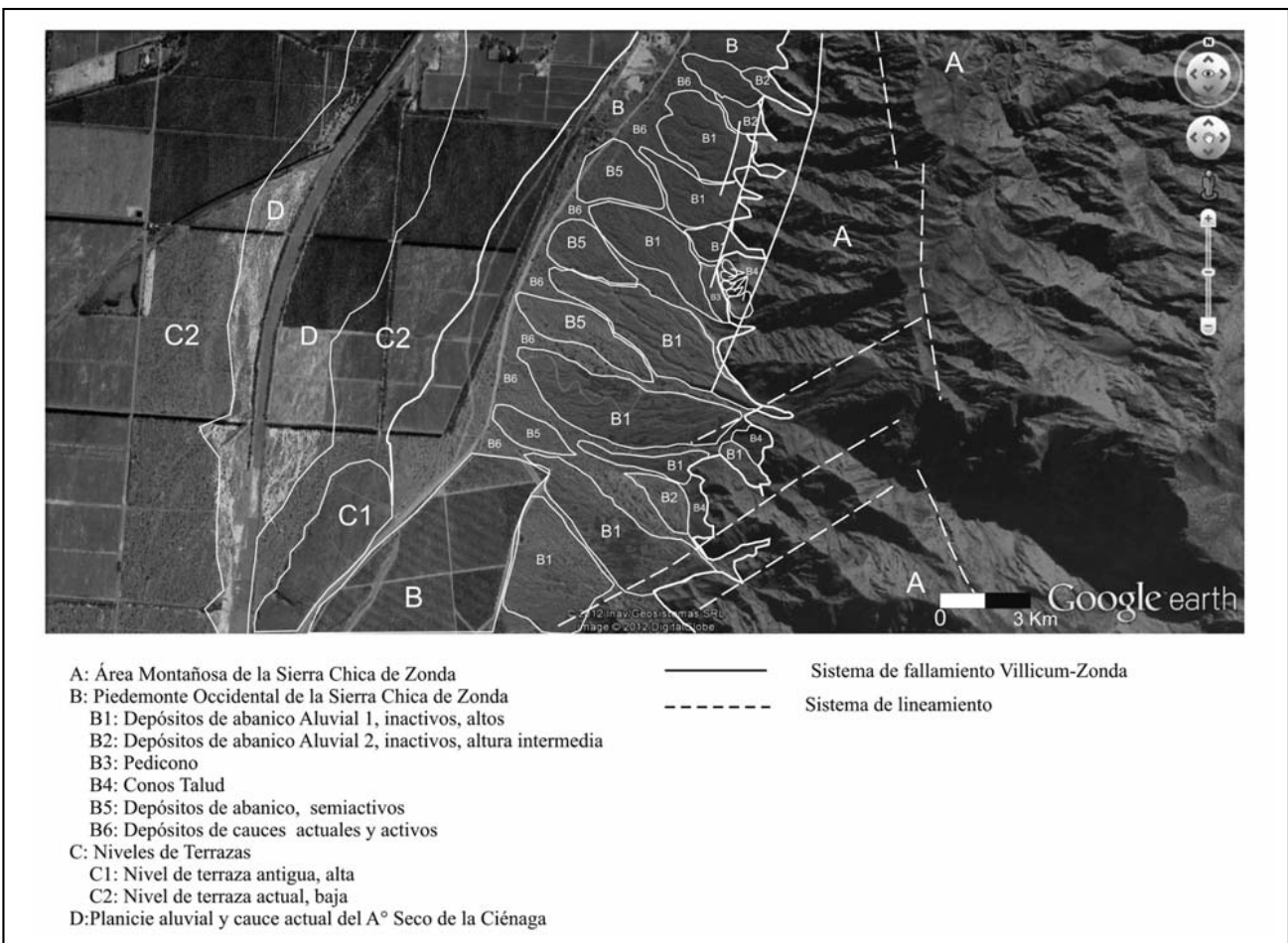
El estudio efectuado comprende un análisis geomorfológico con imágenes satelitales de Google Earth y con fotos aéreas a escala 1: 20.000, lo cual permitió la elaboración de la Figura 2, con apoyos de campo para control e identificación de geoformas y depósitos. Las unidades de relieves y sus depósitos fueron posteriormente diferenciados según su morfodinámica, morfo cronología en depósitos activos, semiactivos e inactivos. Los depósitos inactivos conforman las superficies más antiguas en relación a los depósitos activos y actuales. El análisis morfodinámico, Figura 3, fue complementado con la ejecución de 4 (cuatro) perfiles longitudinales y 1 (uno) transversal a los depósitos de abanicos aluviales. Los perfiles han sido elaborados desde el quiebre de pendiente existente entre la cuenca de alimentación o drenaje y el comienzo del área o cuenca depositacional, sitio este último donde está el trazado norte-sur de la ruta Provincial N° 265. Los perfiles elaborados, Figura 4, evidencian quiebres de pendientes en su trayectoria, productos del contacto entre depósitos de distintas dinámicas fluviales y distintos niveles topográficos así como distintas estructuras sedimentarias (clasto sostén y/o matriz sostén). Los perfiles fueron comprobados con apoyo de campo y simultáneamente se efectuó el relevamiento de la vegetación nativa xerofítica existente. Se calcularon diferentes índices de riqueza y diversidad de las comunidades de vegetación relevadas en las transectas longitudinales efectuadas en los abanicos aluviales. Los resultados estadísticos de la vegetación y su complementación con las unidades geomorfológicas-morfo dinámicas, evidencian una coexistencia entre depósitos de flujos antiguos e inactivos con flujos actuales y activos y

semiactivos. Asimismo, se determinó claramente la estrecha vinculación existente entre algunos índices de colonización y especies vegetales con la dinámica de los depósitos.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**A. Unidades morfo genéticas y morfodinámicas del piedemonte occidental de la sierra chica de zonda.**

La Figura 2, muestra la disposición, ubicación, morfografía y morfogénesis de las unidades del relieve presentes en la zona de interés. Cuatro unidades principales, A, B, C y D han sido delimitadas, según, la procedencia y el origen de los materiales y del escurrimiento, luego diferentes unidades de menor superficie fueron separadas dentro de la unidad de piedemonte, según su génesis y edad. La unidad A, Figura 2, corresponde al relieve montañoso serrano. Son afloramientos de calizas, dolomías, con brechas de fallas interestratales, del Paleozoico Inferior (*Bordonaro, 1980*) intensamente plegados y fallados. Estas cuencas de alimentación de la vertiente occidental de la sierra Chica de Zonda, son angostas y empinadas y se extienden entre los 990 y los 1900 msnm. No obstante en sus cabeceras, las divisorias de aguas retroceden hacia la vertiente oriental mediante procesos de capturas (*Suñires, 2012*). El sistema de fallamiento Villicum-Zonda (*Smalley, 1988*) (Figura 2) corta a estas cuencas de aporte en el punto de intersección que da origen al nacimiento de los piedemontes y sus conos y abanicos aluviales, situación que permite registrar la actividad sísmica en este frente de fracturación regional de sierra Chica de Zonda en algunas evidencias superficiales de deformación cuaternaria.



**Figura 2. Unidades Morfo genéticas**



La unidad B corresponde al sector del Piedemonte occidental de la sierra Chica de Zonda, ubicado al sur de la quebrada de Zonda; integrada por depósitos de acumulación sedimentaria del Cuaternario. Estos depósitos están constituidos por rodados, clastos y fragmentos de calizas y dolomías cámbricas que forman distintos niveles de superficie de distintos ciclos de agradación pedemontana. Los sucesivos estadios de acumulación a lo largo del Cuaternario, favorecieron la formación de distintos niveles de abanicos **B1**, **B2** y **B5**. Un abanico o cono aluvial es un depósito de sedimentos, gravas, arena, limo y arcilla, que se acumula en la base, más llana, de un frente montañoso donde el relieve se amplía y disminuye la pendiente de un canal. Su superficie forma un segmento de un cono que radia pendiente abajo desde el punto donde la corriente abandona el área-fuente (Wasson, 1974, 1978). Sus aspectos morfológicos más característicos son: forma semi-cónica, perfil radial, generalmente cóncavo de longitud limitada y perfil transversal convexo (Bull, 1972, 1977). Algunos autores hacen diferencias entre abanico y cono aluvial por el grado de pendiente, siendo la pendiente más alta para los conos y más suave para los abanicos, mientras que Bull, *op cit*, se refiere a estas unidades de relieves como abanicos aluviales.

Los procesos erosivos subsiguientes a B1 y B2, han destruido partes de esos antiguos depósitos y sus superficies se presentan erosionadas, a la manera de lóbulos relictos tal como se observa en las Figuras 2 y 3. Los depósitos de conos B5, presentan diferencias significativas con B1 y B2, en cuanto a dinámica y edad se refiere. Los B5 son clasificados como semiactivos, ocupan una posición inferior a B1 y el sector medio a distal del piedemonte. Son depósitos de abanicos muy erosionados y afectados por los canales de B6. Tienen mayor dinámica que B1 y B2 y su edad es subreciente (entre antiguos y recientes). Los niveles de abanicos en sus porciones proximales o apicales, B1 y B2, tienen una pendiente entre 18 a 21°, mientras que en sus porciones distales entre 7 a 10°.

En algunos sectores ubicados a las salidas de las quebradas y donde la erosión no ha borrado todas las evidencias, se observa un nivel relictico de acumulación, planizado en su parte superior, el cual fue clasificado como una unidad geomorfológica mixta es decir un pedi-cono (Suvires, 2012). Esta unidad es cartografiada en la Figura 2 como unidad **B3**.

La unidad **B4**, son conos talud, gravitacionales, ubicados en el contacto con el afloramiento serrano carbonático, con pendientes superiores a 35°, caracterizados por aglomerados mono-mícticos (calizas grises), mal clasificados, altamente permeables e inestables. Son depósitos brechosos sin matriz y sin cementación.

La unidad **B6**, corresponde a los depósitos de cauces actuales y activos que descienden aguas abajo hasta conectarse con las unidades **C** y **D**. Esta unidad se extiende desde la porción apical a la distal, en su primer tramo esta atrincherada, mientras que en su porción media, desborda y deposita la carga en sitios de los abanicos denominados *puntos de intersección* sobre los depósitos fanglomerádicos **B1** y/o **B5**.

En general, estos depósitos B corresponden a acumulaciones producidas en diferentes ciclos de sedimentación pedemontana cuaternaria y a distintos tipos de flujos. Los sucesivos abanicos se disponen en sentido longitudinal de la pendiente del piedemonte a la manera de abanicos telescópicos. No obstante ello, la dinámica geomorfológica actual presenta particularidades donde la carga detrítica de los canales activos desborda y deposita sobre otros depósitos de abanicos antiguos (B6 sobre partes de B1).

**C**, corresponde a niveles de terrazas de diferentes génesis y edades, provenientes de diferentes cuencas de alimentación. Por un lado **C1** son relictos elongados norte-sur de un nivel de terraza recortado y marginado por cauces del río Seco de la Ciénaga, cuya naciente se ubica en las estribaciones de Precordillera Central, al oeste del área de estudio. La terraza **C1** se encuentra en un nivel topográfico de unos 5 m por encima de **C2**, a los 790 msnm, con los rodados de su superficie cubiertos por una continua pátina de barniz del desierto y clastos fragmentados por termoclastismo. Está compuesta por depósitos fanglomerádicos de rocas ígneas y sedimentarias, asignados a la Formación Mogna de edad incierta (¿Plio-Pleistoceno?).

**C2**, en cambio es una terraza subreciente del río Seco de la Ciénaga, río temporario que aporta ocasionalmente agua en verano, desde el sur hacia el norte hasta el sector aldeaño a la Qda de Zonda en el valle homónimo. Sus depósitos provienen del arrastre y transporte desde afloramientos de rocas sedimentarias y volcánicas paleozoicas medias y terciario, al sur de la sierra Alta de Zonda. Se extiende entre los 770 y 785 msnm (Pittaluga y Suvires, 2009).

Finalmente, **D**, es el relieve de menor cota en la región, correspondiente al nivel de base de erosión, ubicado a los 750 m.s.n.m, de la planicie aluvial y cauce actual del Arroyo Seco de la Ciénaga. Este cauce temporario es canalizado en el sector de estudio y conducido hacia el norte, para ser utilizado en regadío de plantaciones. No obstante suele producir inundaciones y erosión en fincas aldeañas.

Los depósitos pedemontanos del faldeo oriental de la sierra Chica de Zonda (**B**) conforman diferentes superficies de agradación y dinámicas que se sintetizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Dinámica de los depósitos de abanicos

Unidades Morfogénicas	Unidades Morfodinámicas	Unidades Morfocronológicas
B1	Inactivos- Estable (aluvial)	Antiguo
B2	Inactivos Estable (aluvial)	Antiguo
B3	Inactivos Estable (Aluvial-erosional)	Mas Antiguo
B4	Activos (gravitacional)	Reciente
B5	Semi-Activo (aluvial)	Subreciente
B6	Activos (fluvial)	Reciente

**B. Perfiles longitudinales y transversales a los depósitos de abanicos**

Para la construcción de los perfiles se utilizó como base imágenes provenientes de Google Earth. Se elaboraron perfiles longitudinales, oblicuos y transversales a dos abanicos en la ladera occidental de la Sierra Chica de Zonda.

En el abanico de forma lobulada con dimensiones similares en longitud y ancho se trazaron tres perfiles. El perfil **B1 - B6** tiene una longitud de 923m y un desnivel de 184m, se trazó básicamente en la zona activa del abanico ubicado mas al norte de la Figura 3, reconociéndose en su trayecto áreas inactivas, semiactivas e inactivas, con una inclinación máxima de 32,9%, promedio de 19,9%, siendo la menor pendiente de 4,7% hacia el oeste cerca de la traza de la ruta N° 265.

El perfil **B1-A5**, tiene una longitud de 584 m, elevación 149 m, inclinación máxima 34,6%, inclinación promedio 21,7%, ubicado sobre el lóbulo sur del abanico El Encuentro, al norte de la Figura 3, totalmente sobre el área inactiva; en su trayecto se reconocen sectores con abundancia de vegetación tanto cerca del ápice y en laderas oeste y noroeste preferentemente, donde existe aporte de material fino franco limoso de origen eólico. El perfil transversal se ubica en la sección más ancha de

la geoforma, tiene una longitud de 522 m, muestra una convexidad característica de los depósitos de abanico, con inclinaciones que van entre +7,4 % a - 11,4%, atraviesa áreas inactivas y activas, observándose vegetación de *Deuterocohnia longipetala* en el borde sur lindante con un área activa.

En el abanico ubicado inmediatamente al sur de la quebrada Encuentro, cuya dimensiones longitudinales son superiores a las transversales, se trazó el perfil longitudinal **C1-C9**, de 945m, con una elevación de 104 m y una inclinación promedio de 16,8%. Comienza en el ápice en un área activa y a mitad de recorrido cruza un área semi-activa, las pendientes en general son elevadas, del orden superior a 20%, llegando a 33%, mientras que en el contacto de este perfil con la traza de la ruta, la inclinación es de aproximadamente 10%.

En cuanto al perfil **C1-D5**, cuya longitud es de 524 m, desnivel de 154 m, se extiende sobre un área inactiva del abanico sur de la Figura 3, donde las pendientes son en promedio 21,8%, con máximas de 36%. El perfil transversal elaborado tiene la correspondiente convexidad de un abanico, y los perfiles longitudinales muestran quiebres de pendientes coincidentes con los tres distintos sectores de un abanico: proximal, medio y distal.

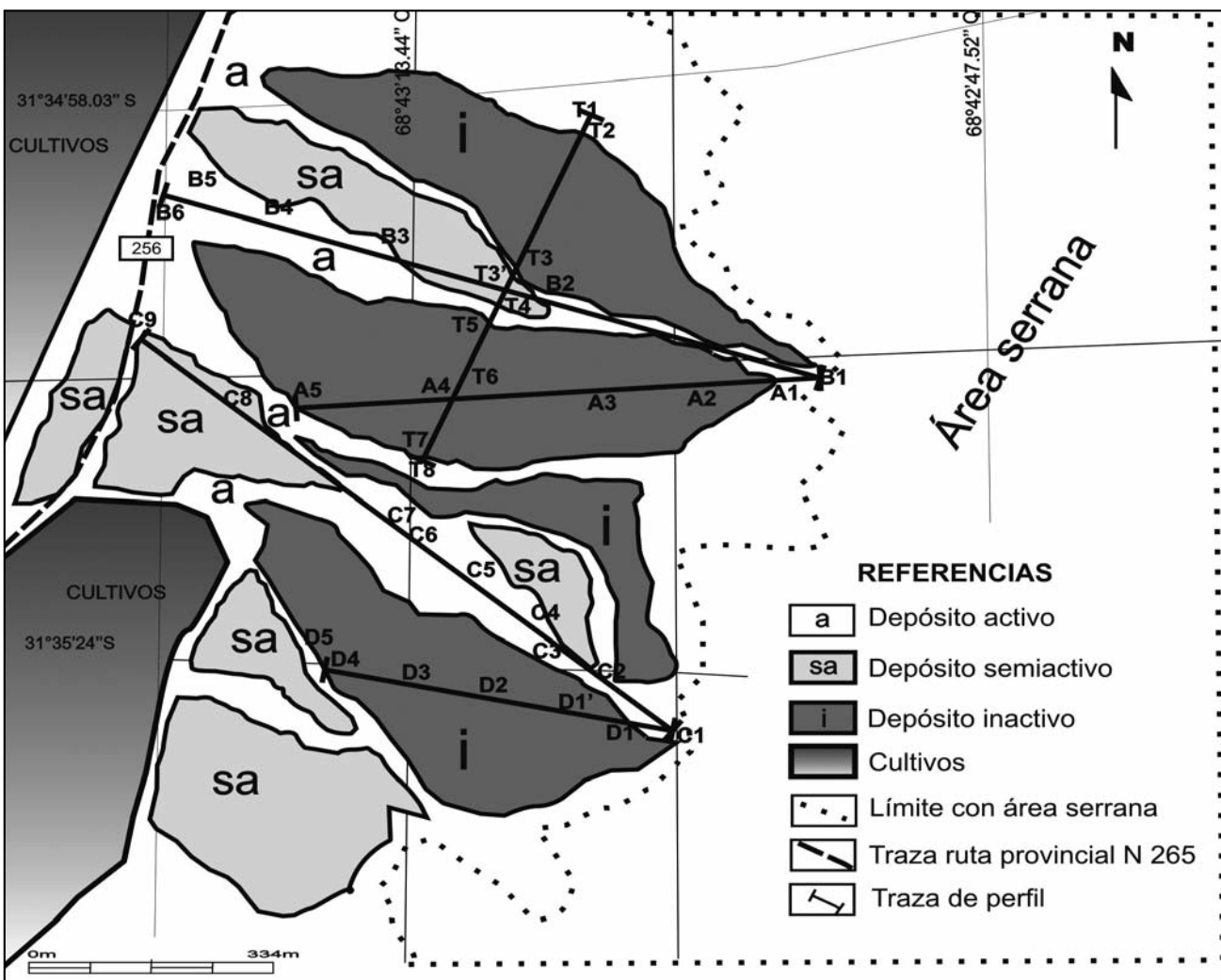


Figura 3. Ubicación de perfiles longitudinales y transversales a los depósitos de conos aluviales.

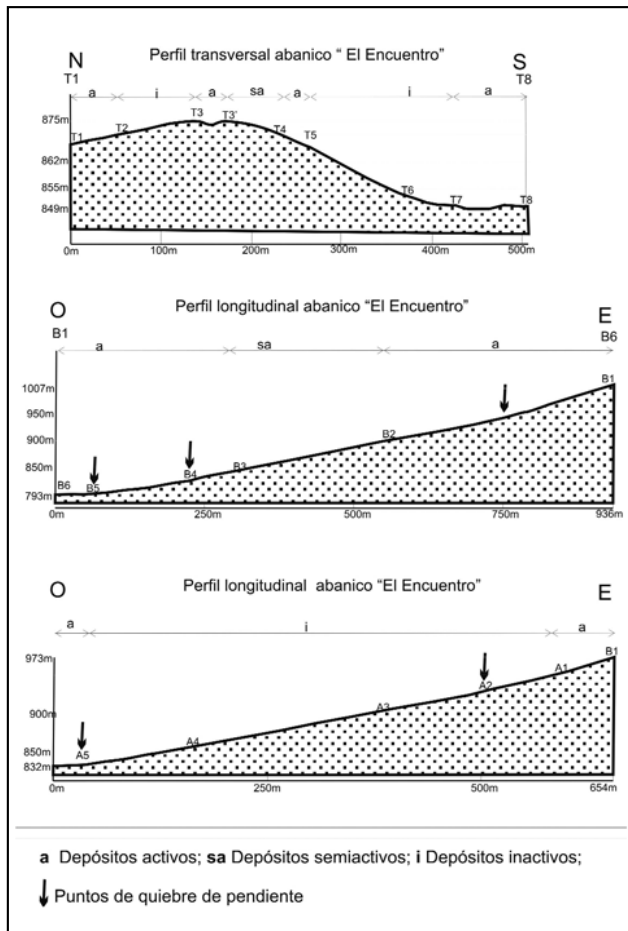


Figura 4. Perfiles longitudinales y transversales en Abanico "El Encuentro".

### C. Relevamiento de la colonización vegetal

La vegetación relevada en el campo en los depósitos fan-glomerádicos activos como inactivos, fue clasificada y procesada, dando como resultado la Tabla 2.

La riqueza específica ( $S$ ) es un índice que mide la biodiversidad, ya que se basa únicamente en el número de especies presentes, sin tomar en cuenta el valor de importancia de las mismas. La forma ideal de medir la riqueza específica es contar con un inventario completo que permita conocer el número total de especies ( $S$ ) obtenido por un censo de la comunidad vegetal.

Sintetizando, las comunidades para los activos varían entre *Bulnesia retama* (retamo) y *Larrea cuneifolia* (jarilla), las comunidades de los inactivos corresponden a *Deuterocohnia longipetala* (chaguar). En el área de estudio, no se observó ninguna otra especie aparte del chaguar que ejerciera tal efecto protector y de retención sobre el terreno, sobre todo en las condiciones

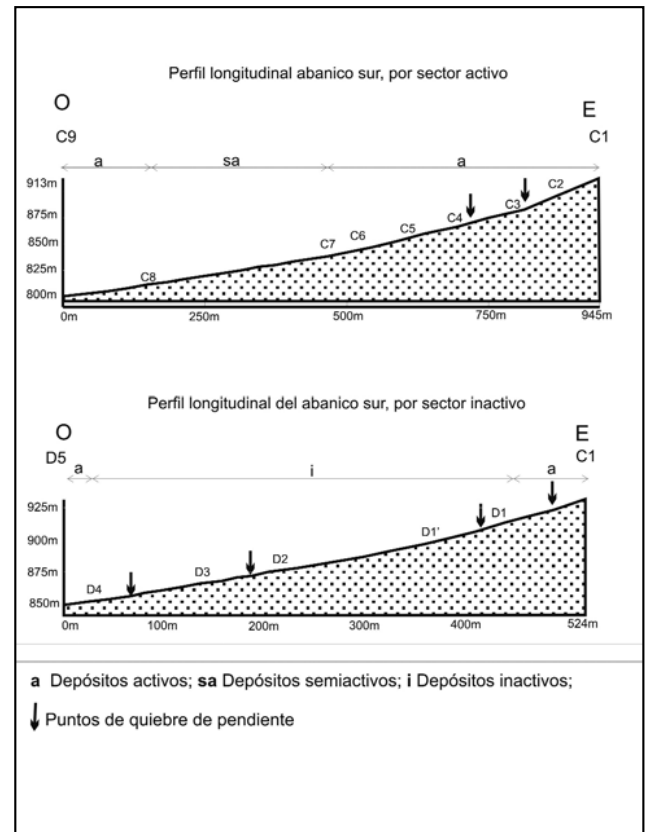


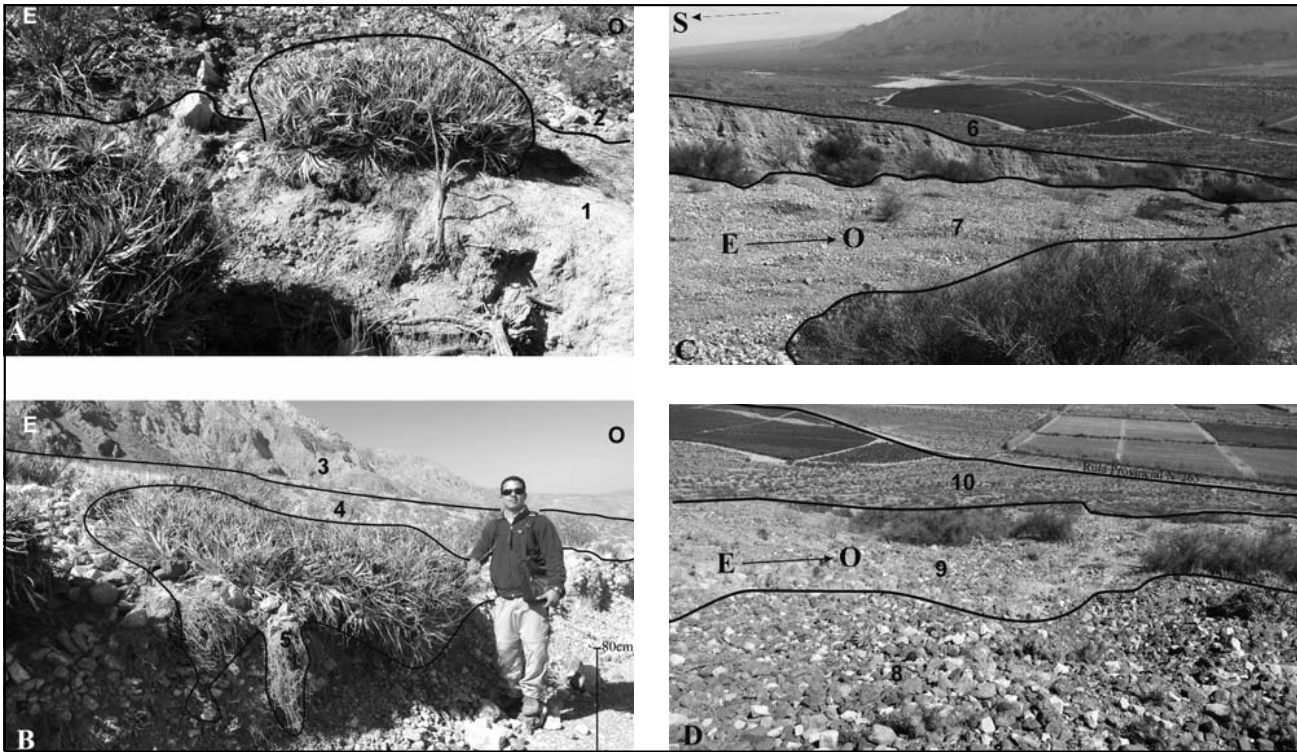
Figura 5. Perfiles longitudinales del abanico ubicado al sur de El Encuentro

de laderas rocosas con pendientes que superan los  $60^\circ$ , por lo que se considera que la especie es la óptima para estas tareas. A pesar del tiempo necesario, el valor de esta especie para la fijación de suelos regolíticos es destacado. Según los presentes autores, *Deuterocohnia longipetala*, abunda en los depósitos de mayor estabilidad, entre los 850-877 metros, en sitios de los depósitos fan-glomerádicos donde existe un aporte eólico areno-limoso, desarrollando suelos con horizontes superficiales fibrosos a hísticos y en pendientes superiores a 20,9 %.

La vegetación relevada y procesada en las zonas de canales y lóbulos activos indica mayor número de especies y mayor porcentaje de cobertura, pese a la alta dinámica fluvial. Las zonas inactivas y estables no están sujetas a la dinámica fluvial actual, situación que favorece el desarrollo del crecimiento superficial en forma "rastrera" del "chaguar" cubriendo suelos y depósitos, tomando una preponderancia en relación a otras plantas. Asimismo se observó en el campo que el chaguar contribuye

Tabla 2. Especies y comunidades relevadas en los depósitos de distintas dinámicas.

Sitio	% Cobert	Nº especies (S)	Comunidad dominante
Depósito Activo 1	32,78	21	<i>Bulnesia retama</i>
Depósitos Activo 2	28,2	17	<i>Larrea cuneifolia</i>
Depósito Inactivo 1	24,07	15	<i>Deuterocohnia longipetala</i>
Depósito Inactivo 2	14,95	15	<i>Deuterocohnia longipetala</i>



**Figura 6.** A. Vista en detalle de la DL en suelos 1) Gravillosos con matriz arenosa y 2) Pedregosos  
 B. Vista de la Sierra Chica de Zonda 3) Área Montañosa 4) Abanicos aluviales, 5) Sistema radicular profundo en ejemplares medianos de LD  
 C. Vista del A° Seco de la Ciénaga 6) Superficie de depósito de abanico inactivo, 7) Depósitos actuales activos  
 D. 8) Depósitos de talud, 9) porción media del abanico, 10) Abanico actual

a fijar los depósitos mediante el crecimiento de colonias sobre sedimentos arenosos eólicos a la manera de nebkhas o dunas de arbusto, debido que por su sistema radicular fibroso y abundante favorece el desarrollo de procesos edafogénicos de incorporación de materia orgánica.

En el área del abanico El Encuentro y zonas aledañas no se observó otra especie que ejerza más efecto protector y de retención sobre el terreno que esta Bromeliácea.

Los suelos donde las colonias se desarrollan corresponden a depósitos fanglomerádicos, estables y abandonados, de fragmentos y rodados subredondeados de calizas grises insertas en una matriz franco arenoso, arenoso y franca. Los suelos están estabilizados por el mismo sistema radicular de estas colonias que crecen en forma anular. Asimismo, la estabilidad y abandono dinámico de estas superficies convexas de abanicos (Figuras 2 y 6 A) se evidencia además en la presencia de barniz del desierto que cubre a los rodados.

La porción preferencial de crecimiento de la especie en la región relevada es el sector medio de los abanicos y en los barrancos de exposición N y NO.

En cuanto a las zonas activas, las comunidades presentes de retamos y jarillas son acompañadas por hierbas anuales o perennes que aprovechan las líneas de talweg de escurrimiento temporario. El mayor tamaño de estas especies explica que las zonas activas tengan una cobertura más alta que las inactivas. Las comunidades citadas se ubican en los contrafuertes o base del borde de talud de las terrazas de los depósitos inactivos.

## CONCLUSIONES

Los depósitos lobulados activos tienen un predominio de *Bulnesia retama* y *Larrea divaricata*, comunidades que se disponen en forma lineal siguiendo el talweg, mientras que los inactivos tienen un dominio de chaguars (*Deuterocohnia longipetala*). Esta última no se presenta en toda la extensión de los depósitos superficiales de abanicos abandonados sino que muestra sectores de preferencia de crecimiento dentro de los mismos, tales como los semi-lóbulos sur y en los bordes de lóbulos con exposición NO.

En la región analizada, por un lado, las buenas condiciones de adaptación del “chaguar” a la aridez edáfica y climática y por otro lado la capacidad fisiológica natural de esta Bromeliácea a la fijación de suelos, es lo que permite reconocerla como especie local y nativa de gran utilidad para su uso en el manejo ecológico de estas cuencas.

La amortización de eventos de rápido desencadenamiento como avenidas estivales, corrientes de piedras y de lodo, bien puede realizarse con la revegetación y propagación de la misma en estos depósitos. Si bien la especie manifiesta un lento crecimiento en sus primeros meses de vida, su gran rusticidad a las condiciones xéricas, conduce a que la planta requiera mínimos cuidados y mantenimiento.

Finalmente, y a los fines de minimizar el impacto visual que producen los muros de contención de taludes en los paisajes y de un manejo ecológico sustentable de cuencas, se sugiere para aquellos casos de regiones con características ecológicas similares a la de estudio, la revegetación con *Deuterocohnia longipetala* en forma combinada a las obras de arte.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AYALA CARCEDO, F. J. Y OLCINA CANTOS, J. 2002.  
Riesgos naturales.  
*Cap.1:41-73. Edit. Ariel. España.*
- BORDONARO, O., 1980.  
El Cámbrico en la quebrada de Zonda, provincia de San Juan:  
*Revista Asociación Geológica Argentina, XXXV (1): 26-40.*
- BRAUN-BLANQUET, J. 1929.  
L'origine et développement des flores dans le Massif Central de France.  
*Armáis Soc. Linn., Lyon 76: 1-129.*
- BULL, W.B., 1964.  
Geomorphology of segmented alluvial fans in Western Fresno Country, California:  
*U. S. Geological Survey Professional Paper, 352(E), 89-125.*
- BULL, W.B., 1977.  
The alluvial fan environment:  
*Progress in Physical Geography, 1, 222-270.*
- CABRERA, A.L. 1994.  
Regiones Fitogeográficas Argentinas.  
Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo II. Editorial ACME S.A.C.I.  
*Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: W.F. Kugler (Ed.). 57p*
- DALMASSO, A. D. 2010.  
Revegetación de áreas degradadas con especies nativas.  
*Bol. Soc. Argent. Bot. Vol.45, N.1-2.*
- FLORES, D. 2008.  
Caracterización biológica del valle de Zonda.  
*Capítulo en Libro: El valle de Zonda. Instituto y Museo Manzi. Zonda. Registro del Archivo de la provincia de San Juan. Pag 37-48.*
- FLORES, D. 2009.  
Distribución del recurso flora, su condición e implicancias para el manejo sustentable del valle de Zonda, San Juan.  
*Encuentro Internacional de Ciencias de la Tierra. EICES 5. Malargüe, Mendoza.*
- FLORES, D. & SUVIRE, G. 2012.  
Distribución y diversidad de hábitats en el humedal de la reserva natural Presidente Sarmiento, San Juan, Argentina.  
*Revista Mexicana de Biodiversidad 83: 194-200. México, DF.*
- FLORES PALMA, P.A., 2004.  
Efecto del estrés hídrico y salino en la germinación de tres especies del género *Atriplex* -  
*Tesis de Licenciatura en Biología, Fac. de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad de San Juan.*
- FUNES PINTER, I. 2008.  
Evaluación de la potencialidad de uso de *Deuterocohnia longipetala* (Baker - Mez) "Chaguar", para la revegetación de laderas degradadas por la actividad minera no metalífera.  
*Trab. Final (inédito). Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Fac. Ciencias Agrarias. UNC.Mendoza.*
- KIESLING, R. 1994.  
Flora de San Juan, República Argentina: Pteridofitas, gimnospermas, dicotiledoneas dialipétalas (Salicaceas a Leguminosas).  
*Volumen 1. Vazquez Mazzini Editores. 348 pp*
- MATEU, J. F., BURGUET, I., FABREGAT, C., NEBOT, J., PARDO, J. & VIÑALS, M. J. 1988.  
Geomorfología y colonización vegetal en ramblas de zonas calcáreas: El Saltador de la Rambla de la Viuda.  
*Cuadernos de Geografía, 44: 145-162. Valencia.*
- MORELLO, J. 1958.  
La provincia fitogeográfica del monte.  
*Opera Lilloana. N° 2. Tucumán Argentina. Fundación M. Lillo. 1958. Pp: 155.*
- ORTIZ, A. Y ZAMBRANO, J. J. 1981.  
La provincia geológica Precordillera Oriental.  
*VIII Congreso Geológico Argentino. Actas III, San Luis, Argentina.*
- PITTALUGA M. A. Y SUVIRE, G. M. 2009.  
Geomorfología dinámica en depósitos cuaternarios del valle de Zonda para el ordenamiento territorial.  
*Provincia de San Juan" E-ICES 5, Actas, pp: 231-235, Malargüe, Mendoza.*

SMALLEY, R. F. 1988.

Two earthquakes studies: 1) seismicity of the Argentine foreland and 2) A renormalization group approach to earthquake mechanics.

*Cornell University, Ph. D. Dissertation, inedited, pp 174, Ithaca.*

SUVIRES, G.M., 2009.

Unidades geomorfológicas del río San Juan en la depresión tectónica de Ullum-Zonda. Provincia de San Juan, Argentina.

*Simposio Brasileiro do Estudos do Quaternario y IV Congreso Argentino de Geomorfología y Cuaternario. La Plata. UFRJ, Brasil, pp: 1-15.*

SUVIRES, G. M., 2012.

La geodinámica en áreas de montañas y sus efectos en los piedemontes.

*Conferencia sobre problemas geológicos-geotécnicos y aspectos ambientales relacionados con el Proyecto y construcción de caminos de montaña. Mayo. SM de Tucumán. CD: 1-19.*

WASSON, R.J., 1974.

Intersection point depositación on alluvial fans: an Australian example:

*Geografiska Annaler, 56, 83-92.*

WASSON, R.J., 1978.

Sedimentation history of the Mundi Mundi alluvial fans: Western New South Wales.

*Sedimentary Geology, 22, 21-51.*



## Comportamiento del parámetro "b" de Gutenberg-Richter en los sismos de la región NOA. Argentina

### Behavior of Gutenberg-Richter "b" parameter in NOA region earthquakes. Argentina

Benitez, Lidia M.<sup>1-2</sup> ✉ - Grimolizzi, Otón Matías<sup>2</sup> - Benitez, Sonia B.<sup>1-2</sup>

Recibido: 12 de Julio de 2012 • Aceptado: 30 de Diciembre de 2012

#### Resumen

*La zona en estudio está ubicada en el Noroeste Argentino entre los paralelos 22° - 28° latitud sur y los meridianos 63° - 68° longitud oeste exhibiendo una gran complejidad en su geodinámica. Los datos empleados provienen del United States Geological Survey - National Earthquake Information Center (USGS), corresponden a registros instrumentales de actividad sísmica, con magnitud mayor que 4, entre el 1 de Agosto de 1927 y el 31 de Marzo de 2012.*

*El número acumulado de eventos sísmicos versus sus correspondientes magnitudes sigue la Ley de potencia de Gutenberg-Richter y se ajusta a una recta cuando se representa en escala semilogarítmica. El valor de la pendiente de ajuste de esta recta se denomina "b" y es propio del proceso sísmico de una determinada área (M. A. Rodríguez Pascua et al, 2000).*

*Se distinguieron tres grupos: eventos superficiales con profundidades  $\leq 70$  km, intermedios entre 100 y 300 km y profundos entre 500 y 600 km. El 85% de los sismos se encuentra entre los 100 y 300 km. Se calculó el valor de "b" para cada uno de los niveles, resultando para los sismos superficiales  $b=0,7736$ , para los sismos intermedios  $b=0,813$  y para los sismos profundos  $b= 0,5364$  con un valor mucho más bajo.*

**Palabras clave:** sismicidad, parámetro "b", frecuencia.

#### Abstract

*The region under study is located in North West Argentina, with latitude ranging between -22° and -28° and longitudes ranging between -63° and -68°, exhibiting a great geodynamical complexity. Data were taken from USGS information center and correspond to instrumental records of seismic activity with magnitudes larger than 4, spanning from August 1<sup>st</sup>, 1927 to March 31<sup>st</sup>, 2012. The cumulated number*

1. Cátedra de Matemática, Facultad de Cs. Naturales e Instituto M. Lillo, Universidad Nacional de Tucumán

2. Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial (IRGyST), Facultad de Cs Naturales e Instituto M. Lillo, Universidad Nacional de Tucumán

✉ lidiabenitez@hotmail.com

of seismic events versus their corresponding magnitude follows the Gutenberg-Richter power law, fitting to a straight line when plotted in semilogarithmic scale. The straight line slope value is known as “b” parameter and characterizes of the seismic process of the area under study (M. A. Rodríguez Pascua et al, 2000).

Three groups were distinguished according to their depth: shallow events with depths less than 70 km, intermediate events with depths ranging between 100 and 300 km, and deep events ranging between 500 and 600 km. Close to 85% of seismic events were located between 100 and 300 km. The calculated values “b” parameter resulted in 0.7736 for shallow events, in 0.813 for intermediate events and in 0.5364 for deep events, sensitively lower value.

**Keywords:** seismicity, “b” parameter, frequency

## INTRODUCCIÓN

Los parámetros clásicos de la sismicidad, tasa de actividad y parámetro “b” de la Ley de Gutenberg-Richter, magnitud máxima, mecanismos focales y fallas activas, han permitido realizar diversas caracterizaciones de esta región.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la actividad sísmica por profundidades en base al análisis del parámetro “b”.

El contraste entre los parámetros “b” a distintas profundidades permite distinguir mejor el fenómeno sísmico de la región en estudio a lo largo del tiempo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se evalúa la sismicidad desde la ubicación de los hipocentros, mediante un cluster de profundidades a fin de obtener

los límites para los sismos superficiales, intermedios y profundos. Se formaron tres dendogramas a una distancia Euclídea de 0.90, uno para sismos con profundidades menores o iguales a 70 km, denotándolos como superficiales, siguiendo el criterio de los cinco perfiles sismotectónicos del Noroeste Argentino identificados en Tesis Doctoral (Suayter 1983). También en la serie de perfiles sismotectónicos realizados en el Salar de Pipanaco en Tesis de Licenciatura (Zossi, 1979). El otro estrato abarca las profundidades entre 100 y 300 km (intermedios) siendo el grupo más numeroso y puede distinguirse un último estrato entre 500 y 600 km, que comprende los sismos más profundos. La Figura 1 presenta el área de estudio mostrando la sismicidad en planta donde se distinguen los tres tipos de sismicidad abordados en el trabajo.

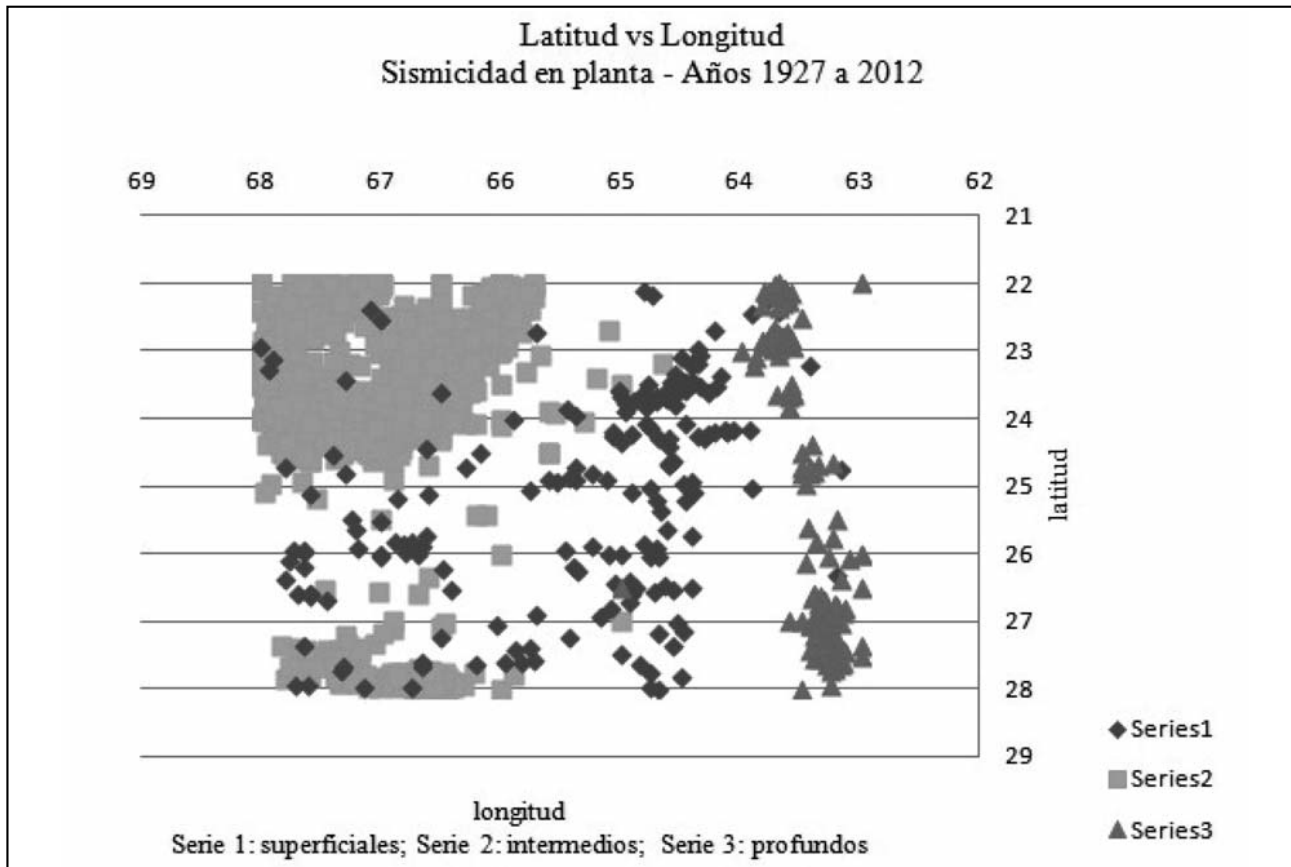


Figura 1. Gráfico Latitud vs Longitud sismos región NOA, años 1927 – 2012, se distinguen los sismos en profundidad (superficiales, Intermedios y profundos)



Los datos incluyen registros, cálculos de fecha, hora, latitud, longitud, profundidad, identificación de la fuente, magnitudes y su descripción (de cuerpo, de superficie, etc., siendo la mayoría de cuerpo).

Se tomó la sismicidad incluida en los catálogos globales por adoptar un criterio internacional, con el entendimiento de que la información consultada incluye datos de calidad de todas las redes locales. A mayor número de redes locales más datos, pero la característica del agrupamiento de los sismos en la región intermedia se seguirá manteniendo.

Los errores de latitud, longitud y profundidad son inherentes a la base de datos empleada. Sin embargo es posible referirse a la base de datos actual NAD83 empleando los algoritmos de conversión publicados en diversos sitios en internet (ej. [www.ap-salin.com/nad-conversion.aspx](http://www.ap-salin.com/nad-conversion.aspx)). Así por ejemplo para el sismo 24,70 latitud sud y 66,30 longitud oeste tomado de la base NAD27 corresponde 24,70004469 latitud sud y 66,2989782 longitud oeste que no afectan los criterios adoptados de separación de sismos por lo pequeño de sus diferencias en magnitud comparado con el tamaño de la región en estudio y las profundidades en decenas y centenas de kilómetros adoptadas para los límites en clasificación de sismos no afectan tal clasificación.

Se analizaron 2461 sismos, de los cuales 2431 (98%) están comprendidos en algunos de los tres grupos, 178 superficiales, 2095 intermedios y 158 profundos. El 85% de los considerados tiene su hipocentro entre los 100 y 300 km de profundidad, es decir que la sismicidad es intermedia en esta región. A lo largo de 85 años los sismos siguen ocurriendo en esa misma franja (entre los 100 y 300 km) y se encuentran al noroeste de la zona de estudio entre los 66° y 68° de longitud oeste y los 22° y 25° grados de latitud sur. Un grupo menor ocurrió entre los 27,5° y 28° de latitud sur. Son considerados sismos interplacas, contenidos en lo que se denomina plano de "Wadatti-Benioff" o zona de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, que es donde se origina el 85% de la sismicidad de la zona. Los epicentros se encuentran en su mayoría, en la Cordillera Oriental; que corresponde al extremo austral de la larga faja andina que comprende la Cordillera Oriental del Perú y las Cordilleras Oriental y Central de Bolivia. La comarca se conoce con el nombre de Andes de Salta y Jujuy. Todos los sismos profundos, es decir un 6,24% del total, se ubicaron en la franja de longitudes comprendida entre los 63° O y 64° O.

El parámetro "b" puede tomar diversos valores, oscilando dentro del intervalo 0,5-1,5 (Aki, 1981) aunque otros autores lo restringen algo más: 0,6-1,3 (King, 1983), siendo 1,1 para la sismicidad mundial. También se sugirió que el valor de "b" representa un índice de complejidad estructural, directamente relacionado con la geometría de la fracturación y la dimensión fractal de la distribución epicentral (Muñoz-Martín et al., 2000).

Teniendo en cuenta la profundidad, se calculó el valor de "b" para cada uno de los niveles por separado con sus respectivos Errores Estándar (EE), dando como resultado para los sismos superficiales  $b=0,7736$  con  $EE=0,02$ , para los sismos intermedios  $b=0,813$  con  $EE=0,01$  y para los sismos profundos  $b=0,5364$  con  $EE=0,01$  un valor mucho más bajo. El valor promedio de "b" obtenido para todas las profundidades en conjunto fue de 0,7076.

Se analizó también el comportamiento del parámetro "b" cada 20 años dentro de cada nivel de profundidad, obteniéndose valores similares a los mencionados, con un rasgo llamativo en lo que corresponde a la franja de los años 1950-1970

presentando en todos los niveles de profundidad una disminución en los valores de b, para los intermedios alrededor de un 40%, para los superficiales y profundos un 22%. Este descenso en la pendiente de la recta es consecuencia del cambio de comportamiento en la actividad sísmica y se refleja en variaciones temporales de "b". Estos valores también se pueden explicar por una falta de registro en los sismos de magnitudes bajas.

Dos modelos son propuestos para explicar la distribución de frecuencia-magnitud. El primer modelo (e.g. Aki, 1984; Wesnousky, 1994; Zúñiga et al., 2009) considera que algunas fallas tienen asociada una ocurrencia preferencial de eventos de ciertas dimensiones, sismos de recurrencia característicos, es decir, que la relación Gutenberg-Richter no se cumple en todo el rango de magnitudes, rompiendo con la autosimilaridad para las magnitudes consideradas. El segundo modelo (e.g. Kagan, 1993; Wesnousky, 1994; Turcotte, 1997) considera que hay una distribución en ley de potencias de la relación frecuencia-magnitud (Ecuación 1). Los sismos superficiales de la zona en estudio se comportan siguiendo este modelo (Figura 2), donde la universalidad de la relación Gutenberg-Richter implica un comportamiento fractal de sismicidad, entendido esto como, cuando una estructura o un fenómeno se repite (de manera exacta o aproximada) a diferentes escalas espaciales y/o temporales, se dice que dicha estructura o fenómeno exhibe un comportamiento fractal y así puede ser asociado con un comportamiento caótico y de auto organización crítica (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000). En la Figura 2 se observa un muy buen ajuste de los puntos a una recta, cumpliéndose la ley de Gutenberg-Richter.

Un ejemplo del primer modelo es el comportamiento de los sismos profundos, zona sismogénica correspondiente a la subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana en la zona de Benioff (500 a 600 km), donde la auto similaridad (línea recta de la relación Gutenberg-Richter) no se cumple para los valores de magnitudes más grandes (Figura 3). Si bien es cierto el valor de  $R^2$  es alto sólo hay un buen ajuste hasta magnitudes de 6,50 aproximadamente.

Los sismos intermedios siguen también el segundo modelo ajustándose a la relación Gutenberg-Richter y corresponde a los sismos de subducción de la zona de Benioff (100 a 300 km) (Figura 4). Se observa un ajuste casi perfecto de los puntos a una recta con un  $R^2$  de 0,99.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La sismicidad es un proceso estocástico que responde a un modelo de distribución temporal de magnitudes de tipo fractal. Dicha estructura fractal está relacionada directamente con el parámetro "b" (ley Gutenberg-Richter, 1956), a partir de una ley de potencia (Hirata, 1989).

Mediante análisis estadísticos sobre la distribución de la frecuencia acumulada del tamaño de los terremotos Ishimoto e Ida (1939) y Gutenberg y Richter (1944) en forma independiente, establecieron la siguiente ley empírica entre la magnitud de un terremoto y su frecuencia:

$$\log N(m) = a - bm \quad (1)$$

con a y b constantes positiva y N(m) es el número acumulado de eventos en una región y ventana de tiempo específicos, con magnitudes mayores o iguales a m. El valor de "b" varía de región en región (e.g. Kossobokov y Keilis-Borok, 2000), su valor

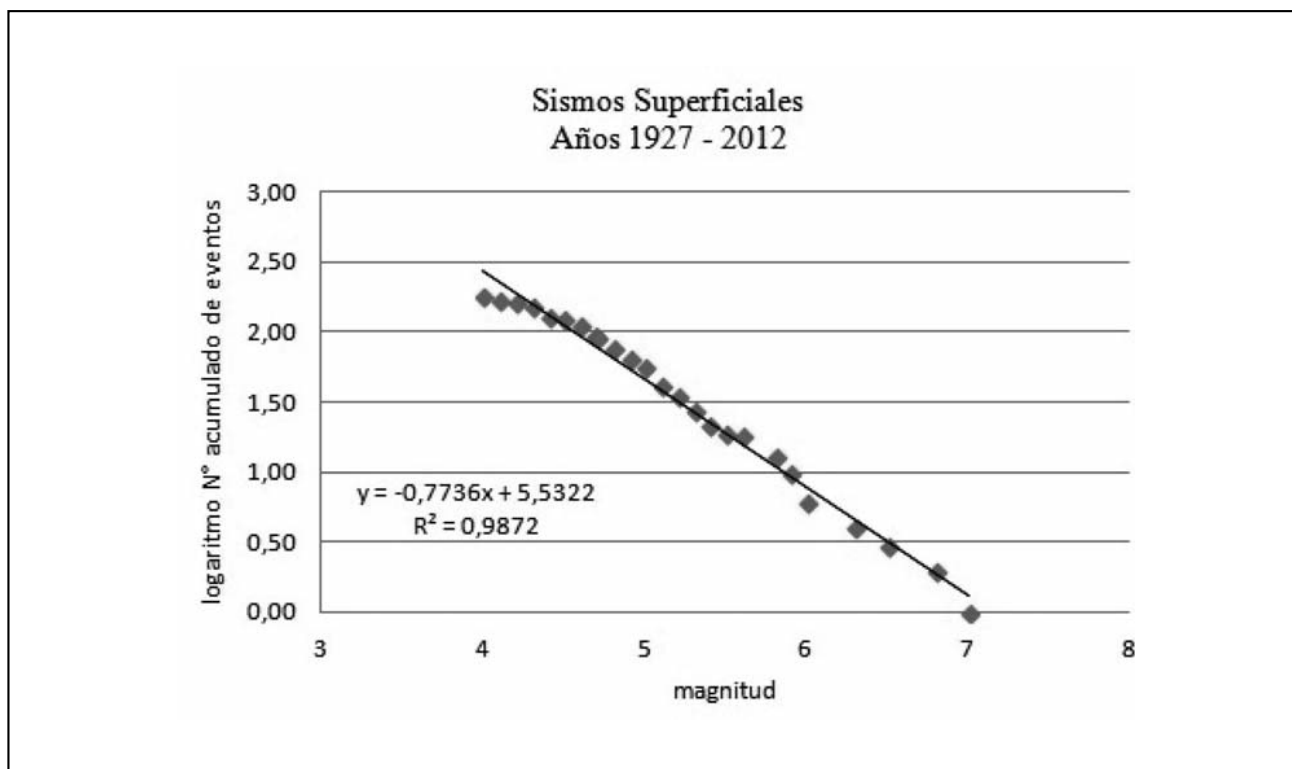


Figura 2. Análisis de la relación Gutenberg-Richter para sismos superficiales Región NOA. La pendiente de la recta Gutenberg-Richter muestra un ajuste que indica una autosimilitud como lo propone el segundo modelo

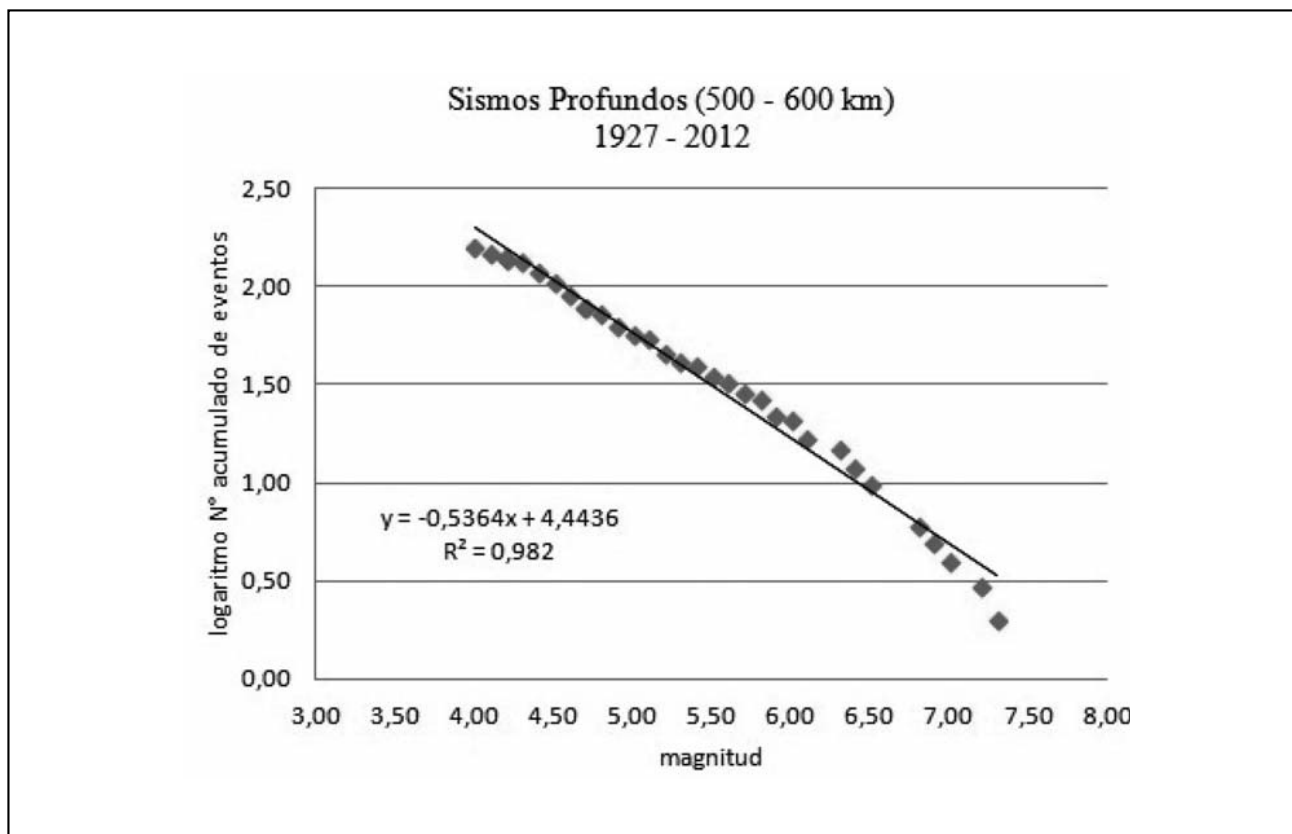


Figura 3. Relación Gutenberg-Richter para la Región NOA, sismos profundos. Se observa la desviación de la auto similitud para eventos de magnitudes desde 6,8 a 7,3, lo que nos indicaría áreas con preferencia a la ruptura como el primer modelo.

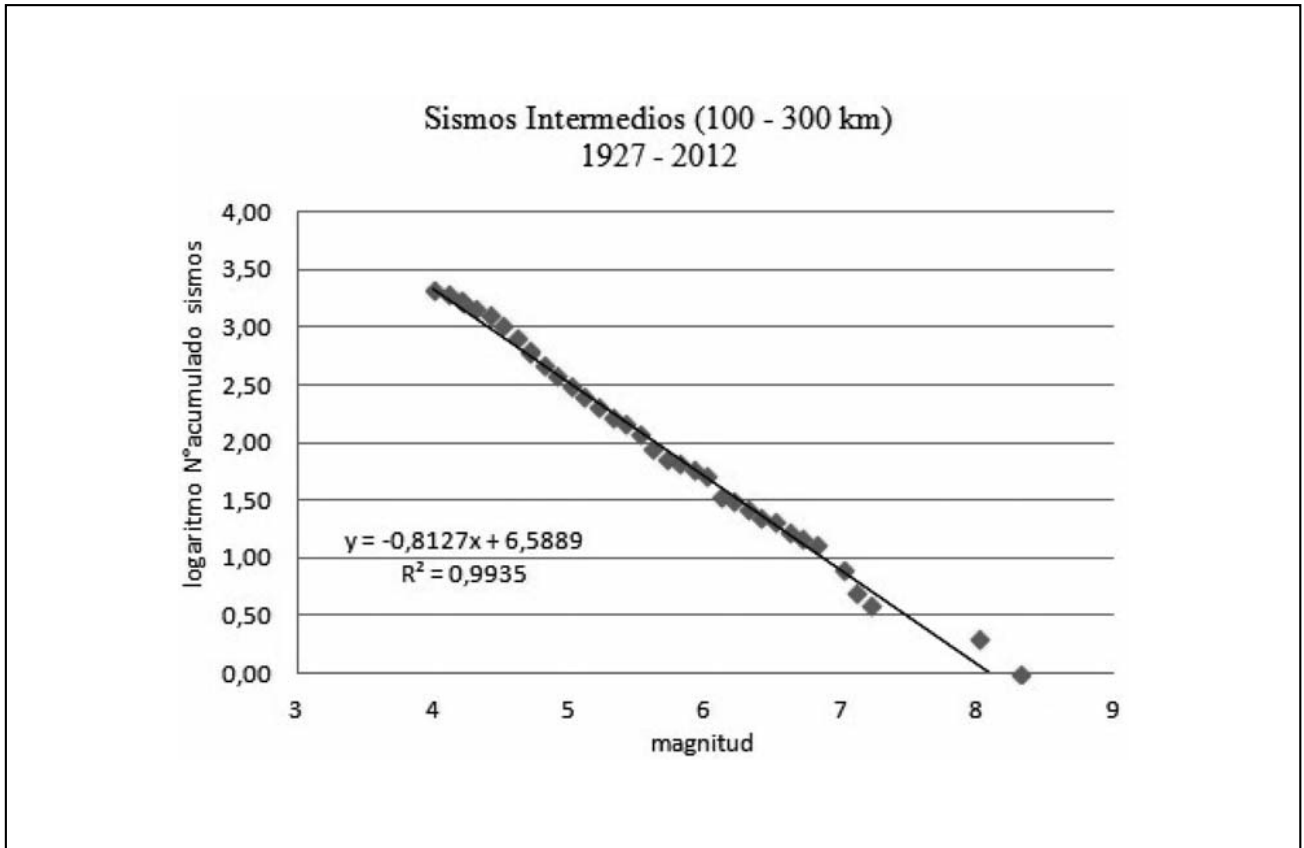


Figura 4. Análisis de la relación Gutenberg-Richter para sismos intermedios Región NOA. La pendiente de la recta GR muestra un ajuste que indica una autosimilitud como lo propone el segundo modelo.

típico es cercano a 1 y es un parámetro tectónico que describe la abundancia relativa de sismos grandes respecto de los pequeños, es decir que representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona. De alguna manera caracteriza al medio sísmico, representando condiciones de la tensión y/o del material en la región focal.

El parámetro "b" también ha sido considerado como una medida del esfuerzo promedio en la región considerada (Wiemer y Wyss, 2002). Se ha observado en el laboratorio que tiene una fuerte relación con el esfuerzo en el volumen a considerar (Scholz, 1968). Hay una relación inversa entre el valor de "b" y el nivel de esfuerzo, dado que un menor valor de "b" implica una menor pendiente en la relación Gutenberg-Richter, que a su vez estaría relacionado con un número mayor de eventos de magnitudes grandes con relación a la cantidad de eventos menores. Esto implica una concentración de esfuerzos mayor en la zona; de la misma forma valores de b grandes implican una concentración de esfuerzo menor (e.g. Zúñiga y Wyss, 2001; Wiemer y Wyss 1997, 2002).

El valor a es una medida del nivel de sismicidad regional o productividad sísmica (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000); matemáticamente expresa el logaritmo del número de sismos con magnitud mayor que cero, es decir, el total esperado de eventos en la región si se extrapola la relación hasta las magnitudes más pequeñas. La validez de esta relación está vinculada

con un escalamiento fractal entre el número de sismos mayor a determinada magnitud y las áreas de ruptura de los mismos determinada a través de la magnitud de momento sísmico (Tesis Figueroa Soto, México 2009). Si esto es así, la ley de escalamiento Gutenberg-Richter está relacionada mediante una ley de potencias con el área de ruptura (Turcotte, 1997; Shcherbakov et al., 2005) de la forma expresada por la ecuación:

$$N(\geq A) \propto A^{(-D/2)} \quad (2)$$

donde  $N(\geq A)$  es el número de eventos con área de ruptura mayor o igual a A y D es la dimensión fractal expresada por  $D = 2b$  para sismos de magnitud intermedia, o como  $D = b$  para eventos grandes (Legrand, 2002).

La dimensión fractal D se puede entender como un indicador de la autosemejanza geométrica.

Los valores calculados están entre 0,5 y 1, en acuerdo con el modelo de líneas de falla conformando un plano o modelo de Goishi (Otsuka, 1972) y con el modelo de ramificación de Vere-Jones (1976). Entonces, suponiendo que el largo total de las ramificaciones sea proporcional a la energía del terremoto, el valor de b según estos modelos sería de 0,75 correspondiendo a una dimensión fractal 1,5.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AKI, K. 1981.  
A probabilistic synthesis of precursory phenomena.  
*In: Earthquake Prediction: An international Review, Maurice Ewing Ser. vol 4, edited by W. Simpsom & P.G. Richards, pp. 566-574. Agu, Washington, D. C.*
- AKI, K. (1984).  
Asperities, Barriers, Characteristic Earthquakes and Strong Motion Prediction.  
*Journal of Geophysical Research. 89. No.B7. 5867-5872.*
- FIGUEROA SOTO, A. (2009).  
Análisis de tiempo interevento en secuencias de réplicas para la identificación de estados de relajación del esfuerzo.  
*Tesis en Sismología Estadística de la Universidad Nacional Autónoma de México.*
- GUTENBERG, B. et al. (1944).  
Frequency of earthquakes in California.  
*Bull. Seismol. Soc. Am. 34: 184-188.*
- GUTENBERG, B. et al. (1956).  
Magnitude and energy of earthquakes.  
*Ann. Geofis., 9:1-15*
- HIRATA, T 1989.  
A correlation between the b value and the fractal dimension of Earth.  
*Jour. Geophys. Res. 94, 36: 7507-7514.*
- ISHIMOTO, M. ET AL. (1939).  
Observations sur les seism enregistres par le microseismograph construit dernièrement (I).  
*Bull. Earthquake Res. Inst. 17: 443-478.*
- KAGAN, Y.Y. (1993).  
Statistics of characteristic earthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 83. No. 1. 7-24.*
- KING, G. 1983.  
The Accommodation of Large Strains in the Upper Lithosphere of the Earth and Other Solids by Self-similar Fault System: the Geometrical Origin of b-Value.  
*Pure App. Geophys. 121: 761-815.*
- KOSSOBOKOV, V.G. ET AL. (2000).  
Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting.  
*Pure and Applied Geophysics, 157. No. 11. 2323-2349.*
- LEGRAND, D. (2002).  
Fractal Dimensions of Small, Intermediate, and Large Earthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 92. 3318-3320.*
- MOGI, K. 1962.  
Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to the earthquake phenomena.  
*Bull. Earthquake Res. Inst. 40: 125-173.*
- OKAL, E. A. et al. (1994).  
On the variation of b-values with earthquake size. Phys.  
*Earth Planet. Interiors 87: 55-76.*
- OTSUKA, M. (1972).  
A chain-reaction type source model as a tool to interpret the magnitude frequency relation of earthquakes,  
*J. Phis. Earth, 20, 35-45*
- RODRÍGUEZ PASCUA M.A. et al. (2000).  
Similitudes entre la actividad sísmica actual y la paleosismicidad.  
*Revista Sociedad Geolog. España, 13(3-4)*
- SHCHERBAKOV, R. et al. (2005).  
Aftershock Statistics.  
*Pure and Applied Geophysics. 162. 1051 – 1076.*
- SCHOLZ, C.H. (1968).  
The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to arthquakes.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. 58. No.1. 399-416.*
- SUAYTER, L.E. (1983).  
Sismicidad y Tectónica de los Andes del Norte Argentino.  
*Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.*

- TURCOTTE, D.L. (1997).  
Fractal and Chaos in Geology and Geophysics.  
2nd. Ed. Cambridge University Press.
- VERE-JONES, D. (1976).  
A. branching model for crack propagation,  
*PAGEOPH*, 114, 711-725.
- WESNOUSKY, S.G. (1994).  
The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, wich is it?.  
*Bulletin of the Seismological Society of America*. 84. No. 6.1940-1959.
- WIEMER, S. ET AL. (1997).  
Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?.  
*Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 102(B7), 15115-15128.
- WIEMER, S. et al. (2002).  
Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes.  
*Advances in Geophysics*. 45. 259-302.
- ZOSSI, M.M. (1979).  
Estudio de la Actividad Sísmica de la Provincia de Tucumán.  
*Tesis de Licenciatura en Física Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán*.
- ZÚÑIGA, F.R. et al. (2001).  
Most- and Least-Likely Locations of Large to Great Earthquakes along the Pacific Coast of Mexico  
Estimated from Local Recurrence Times Based on b-Values.  
*Bulletin of the Seismological Society of America* 91 No. 6. 1717-1728.
- ZÚÑIGA, F.R. et al. (2009).  
A Seismotectonic Regionalization of Mexico for Engineering Purposes.  
*In process*.





## Reseñas de libros

Rubén A. López

### *The story of Vaiont*

*Told by the Geologist Who Discovered the Landslide*

Edoardo Semenza, 2010

Ed. K-flash. 205p. ISBN 978-88-89288-02-3

El nombre Vaiont, podría pasar desapercibido para la mayoría de las personas. Sin embargo no existe geólogo o ingeniero que su simple mención, no le recuerde una de las mayores catástrofes relacionadas con la remoción en masa y las grandes obras de ingeniería. La breve explicación que en algún momento de nuestra formación hemos recibido sobre la represa de Vaiont y el trágico deslizamiento ocurrido el 9 de octubre de 1963, que causó la muerte de más de 2000 personas, no nos permite conocer el universo de opiniones y discusiones que rodeó el proyecto de Vaiont antes y después de su construcción.

Para entender “*la historia de Vaiont*” nadie mejor que un testigo *presencial* “*El hombre que descubrió los deslizamientos*”, Edoardo Semenza. Autor del libro, y participante del proyecto de la presa.

Este libro recorre desde los inicios del proyecto de la presa de Vaiont, allá por 1926 cuando su padre, el Ingeniero Carlos Semenza - Director de Construcciones Hidráulicas de SADE (Sociedad Adriática de Electricidad), formula el primer plan preliminar del aprovechamiento hidráulico. Se muestra como se suceden las discusiones de los distintos modelos de presas para el mayor aprovechamiento del valle, como así también la cota máxima de inundación. Como surgen, en la década del 40, los primeros interrogantes sobre la estabilidad de los márgenes del valle. Y en 1957 el inicio de la construcción de la presa, que eleva la altura de la bóveda de la presa de 206 a 266 m y pasa a ser la más alta del mundo de este tipo.

El relato cronológico de la secuencia de estudios, eventos y discusiones sobre posible desarrollo de deslizamientos, los indicios claros registrados en otros afluentes de la cuenca, como así también la detección de paleodeslizamientos en el valle de Vaiont es realmente apasionante. El detalle de los días previos a la catástrofe, las decisiones de último momento y las acciones desesperadas tomadas por los responsables a medida que se elevaba la cota de inundación de la presa, hacen de este libro una atrapante novela histórica con final conocido.

*La historia de Vaiont* es también un documento científico lleno de precisas citas bibliográficas e informes técnicos, con un impecable registro fotográfico. Además encontramos, bosquejos en viejas libretas de campo, mapas, trabajos geomorfológicos sobre fotografías aéreas y oblicuas, las evidencias de campo plasmadas en imágenes con muescas de deslizamientos pasadas y contemporáneas al proyecto, árboles alabeados y caídos, cicatrices en suelos y grandes masas de material movilizado. Completan el texto un análisis actual de la reconstrucción pre y posdeslizamiento con perfiles de detalle y modelos de laboratorio a escala y mapas.

Sabemos que la tragedia de Vaiont marcó un antes y un después en los proyectos de construcción de presas. *La historia de Vaiont* es el documento de lectura indispensable para geólogos e ingenieros del campo de la geotecnia y geomorfología.





# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

*La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas Técnicas, Reseñas de Libros, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.*

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

## a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado, total o parcialmente, con anterioridad.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o copyright), que los derechos de terceros (terceras partes) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se podrán recibir trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y la Dirección de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico

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

- La versión original deberá ser editada en Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra Times New Roman tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.  
El título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.
- Debajo del título, el texto centrado, en letra Times New Roman tamaño 10, con los datos de los autor/es y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. Se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras; un "Abstract", y opcionalmente se podrá incorporar el "Resumo" en portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes "Keywords" y "Palavras chave" en portugués.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el "Abstract", además de un resumen en el idioma en el que está escrito el trabajo. A continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.  
El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superi-

or e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.

- La extensión no deberá superar las 20 páginas en el caso de Artículos Originales. En el caso de Artículos Invitados la extensión podrá ser superior siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con la Dirección de la Revista y el Comité Editorial. En el caso de las Notas Técnicas la extensión no deberá superar las 3 carillas, y en el resto de las situaciones mencionadas una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
  - Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
  - Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
  - No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
  - Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
  - Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
  - Los subíndices y superíndices deben ser claros.
  - Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
  - Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
  - Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo:  $Sy/Xm$  en lugar de  $\frac{Sy}{Xm}$
  - Aquellas ecuaciones explícitamente referenciadas en el texto deben numerarse sucesivamente al lado derecho, entre paréntesis.
  - En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo,  $Ca^{2+}$  y  $CO_3^{-2}$ , no como  $Ca^{++}$  o  $CO^{-3}$ .
  - Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo:  $^{18}O$ .
  - Donde sea posible se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como  $P_2O_5$ ).
- ## c) Sobre el formato de figuras y tablas:
- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja.
  - Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de claridad. Deben tener una resolución mínima de 300 dpi.
  - Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.

- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma, la que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
  - Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
  - Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben ser pancromáticas, contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg, .pdf o .eps. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.  
Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).
  - Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados, claros y con una resolución mínima de 300 dpi.
  - Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
  - Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
  - Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.
  - Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
  - Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Se deben remitir como archivo de texto y no como imagen.
  - Las Tablas serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis. Es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
  - La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
  - Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda
- d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores**
- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor o los autores. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del trabajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar “modificada a partir de ...” seguido de la cita del artículo original.
  - A los autores que deseen incluir figuras tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
  - Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
  - La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
  - Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
  - Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:  
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
  - Los artículos en textos:  
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
  - Los libros de textos:  
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
  - Cuando los autores del trabajo citado en el texto sean más de dos, se indicará Casio et al. (1980).
  - En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, la cita deberá aparecer entre paréntesis y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,.... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irre-

sueitas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).

- Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980):  
CASIO, M.; MARCINUS, F; SALINA, R y HUBBARD, R.T., 1980. La caída del imperio romano. Revista de Occidente, Vol 180: 224-234.
- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo al siguiente modelo: Barker, A and C Jones 2007. Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En Environmental Assessment Lecturer’s Handbook, ed. T B Fischer et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta-eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

#### e) Notas Técnicas

- Es un artículo original que describe un proceso o técnica

sin incluir, necesariamente, una exposición teórica y datos. También puede referirse a un estudio de caso, el que por lo novedoso de los datos que se obtienen o de las técnicas utilizadas, el/los autor/es consideran de interés su difusión. La extensión total del manuscrito, que no debe superar las 3 (tres) páginas y ajustarse a los parámetros mencionados en el punto b, incluye Resumen, Abstract, palabras clave, keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla acorde a lo establecido en el punto c. Las referencias bibliográficas deberán respetar lo establecido en el punto d.

#### f) Arbitraje

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.



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

**FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA**

ENVIAR A:

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

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

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

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

\_\_\_\_\_ [ ]

3. Deseo comprar los artículos:

\_\_\_\_\_ [ ]

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

**FORMA DE PAGO**

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

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

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

**PRECIO DE COMPRA (Desde 01-04-2012):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **230** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **90** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **52** Dólares
- Compra de número atrasado: **43** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-04-2012):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **240** Pesos
- Suscripción en formato electrónico: **170** Pesos
- Suscripción Instituciones: **960** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **110** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **54** Dólares
- Suscripción en formato electrónico: **38** Dólares
- Suscripción Instituciones: **216** Dólares
- Compra de número atrasado: **430** Dólares

**Envíos fuera de Argentina:** se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: [www.correoargentino.com.ar](http://www.correoargentino.com.ar)

Se pueden enviar los números completos de la Revista por correo electrónico en formato .pdf en cuyo caso, no se cobran gastos de envío.

*Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en [www.asagai.org.ar](http://www.asagai.org.ar)*

**Los Socios de ASAGAI reciben gratuitamente y sin cargo alguno la revista.**

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2012  
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Diciembre de 2012