

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

*Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbuet, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel*

Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

*Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D. .*

Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

*Cruz, María P. - Martin Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.*

Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

*Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle*

Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

*Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bugan, Richard DH*

Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

*Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexou, Claudio - Carrica, Jorge*

Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

*Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.*

Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

*Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Abrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst*

Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

*Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo*

Portada: Vista de las características geomorfológicas del valle en el que se localiza Junín de los Andes, en segundo plano volcán Lanín.

Fotografía: F.X. Pereyra

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Número 34 • 2015

ISSN 2422-5703 (En línea)

ISSN 1851-7838 (Impresa)

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
editor@editoresasagai.org.ar  
www.editoresasagai.org.ar  
www.asagai.org.ar  
Tel/Fax (011)4322-2820





---

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

### EDITOR JEFE

*MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman*  
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba  
Argentina  
editor@editoresasagai.org.ar

### EDITOR ASOCIADO

*Dr. Clemente Irigaray Fernández*  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Granada  
España  
clemente@ugr.es

### COMITÉ EDITORIAL

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

*Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo*  
Departamento de Geodinámica  
Universidad Complutense de Madrid  
España  
vallejo@geo.ucm.es

*Dr. Julio Luis del Río*  
Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario  
Universidad Nacional de Mar del Plata  
Argentina  
julioluisdelrio@gmail.com

*Dra. Ofelia Tujchneider*  
Departamento de Hidrología y Ambiente  
Universidad Nacional de El Litoral. Santa Fe  
Argentina  
pichy@fich1.unl.edu.ar

*Lic. Luis Mario Giaconi*  
Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)  
Universidad Nacional de La Plata  
Argentina  
lmgiaconi@gmail.com

### SECRETARÍA

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

*Lic. María Paula Bunicontro*  
IGEBA (CONICET-UBA)  
Argentina  
paulabunicontro@hotmail.com

### 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 2014 - 2018**

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Fabio Sergio Luna</i>
SECRETARIA	<i>Cristina Dapeña</i>
TESORERO	<i>Luis Mario Giaconi</i>
VOCAL TITULAR	<i>Mabel Mena</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén A. López</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Martín Eduardo Guichón</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>María Beatriz Ponce</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>Eduardo Emanuel Celli</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>José Gabriel Salminci</i>

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

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe	<i>Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbuét, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel</i>	1
Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina	<i>Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D.</i>	11
Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales	<i>Cruz, María P. - Martin Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.</i>	21
Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe	<i>Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle</i>	25
Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad	<i>Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bugan, Richard DH</i>	33
Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)	<i>Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexow, Claudio - Carrica, Jorge -</i>	41
Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná	<i>Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.</i>	47
Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro	<i>Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Ahrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst</i>	57
Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda	<i>Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo</i>	75
Instrucciones para autores		85
Formulario de suscripción o compra		89



## MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

### Misión y objetivos de la publicación

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

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

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

### Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

### Precio de la revista

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

En la página 89 encontrará el formulario a completar a tal efecto

## Aims and objectives

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

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

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

## Authors Copyrights

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

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

## Price of the Journal

*All interested in buying a copy of any Journal issue should be in contact with the Editor ([editor@editoresasagai.org.ar](mailto:editor@editoresasagai.org.ar)).*

*In page 89 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



# Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

## Methodology for the delimitation of water risk areas in the Province of Santa Fe

Mastaglia, María Inés <sup>1</sup>✉ - Pusineri, Graciela <sup>2</sup> - Arbuét, Alejandra <sup>2</sup> - Pilatti, Miguel Ángel <sup>3</sup>

Recibido: 18 de enero de 2015 • Aceptado: 24 de febrero de 2015

### Resumen

*La Ley N° 11730 de la Provincia de Santa Fe regula el uso de suelos en áreas inundables con el objeto de reducir los efectos negativos de las inundaciones. La implementación de esta Norma requiere la delimitación de las zonas con diferentes frecuencias de inundación.*

*En este trabajo se desarrolló una metodología que permitió el trazado preliminar de las áreas de riesgo hídrico en veintiún sistemas hídricos de Santa Fe, abarcando prácticamente todo el territorio provincial. El procedimiento se basó en la demarcación en plataforma SIG de las áreas anegadas observadas en imágenes satelitales Landsat, conjuntamente con la aplicación de criterios edafológicos y geomorfológicos. El estado hídrico del sistema para la fecha de la imagen y la recurrencia asociada se analizó previamente mediante estudios hidrológicos de las variables hidrometeorológicas. Las áreas inundadas trazadas a partir de las imágenes se contrastaron y completaron con las determinadas con criterios edafológicos a partir de información sobre limitaciones de drenaje, hidromorfismo, salinidad y sodicidad. Estas tareas permitieron definir una técnica para el trazado de las áreas inundables aplicable a las zonas donde no se contó con información satelital para las recurrencias de interés.*

**Palabras clave:** *inundable, imagen satelital, criterios edafológicos, SIG.*

### Abstract

*The law No. 11730 of the Province of Santa Fe regulates land use in flood prone areas in order to reduce the negative effects of floods. The implementation of this Standard requires the delineation of zones with different frequencies of flooding.*

*In this work was developed a methodology that allows the preliminary traced of the water hazard areas in twenty-one Santa Fe water systems covering practically the whole province. The method was based in the demarcation on SIG platform of flooded areas that observed in Landsat satellite images in conjunction with the application of edaphological and geomorphological criteria. The flooded areas drawn from the*

1. Barbagelata Ingeniería S.A. San Lorenzo 63 (3100) Paraná, Argentina

✉ mmastaglia@gmail.com

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

3. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. Kreder 2805 - (3080) Esperanza, Argentina.

images were compared and completed with those determined by edaphological criteria from information about limitations of drainage, hydromorphism, salinity and sodium. The water status of the system to the date of image and associated recurrence were previously analyzed by hydrological studies of hydrometeorological variables. These tasks allowed define a technique for mapping of flood areas applicable to the zones where it had no satellite information for recurrences of interest.

**Keywords:** flood, satellite imagery, edaphological criteria, SIG.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surgió de la necesidad de delimitar las Áreas de Riesgo Hídrico (ARH) definidas en la Ley Provincial N° 11.730 para los sistemas hídricos indicados en la Figura 1 de la provincia de Santa Fe.

El procedimiento estándar para la delimitación de las ARH en ambientes fluviales/lacustres se basa en la modelación hidráulica de los cursos de agua para caudales de diferentes recurrencias, lo cual requiere disponer de perfiles transversales del curso y de mapas planialtimétricos detallados de las áreas inundables con curvas de nivel de equidistancia reducida. Este método

no podría aplicarse para el caso en estudio dada la extensión a analizar que cubre el 72% del territorio provincial y la carencia de la información planialtimétrica con el detalle requerido para todas las cuencas. Dicha situación condujo a proponer un procedimiento alternativo basado, esencialmente, en análisis de frecuencia de variables hidrometeorológicas y digitalización de áreas anegadas en imágenes satelitales a las cuales se le asocia la recurrencia del estado hídrico registrado. Con esta metodología se incluyen todas las áreas con excedentes hídricos visualizables en superficie y fue aplicada en un estudio antecedente (Pedraza *et al.*, 2002) de una cuenca piloto del sistema Saladillos.

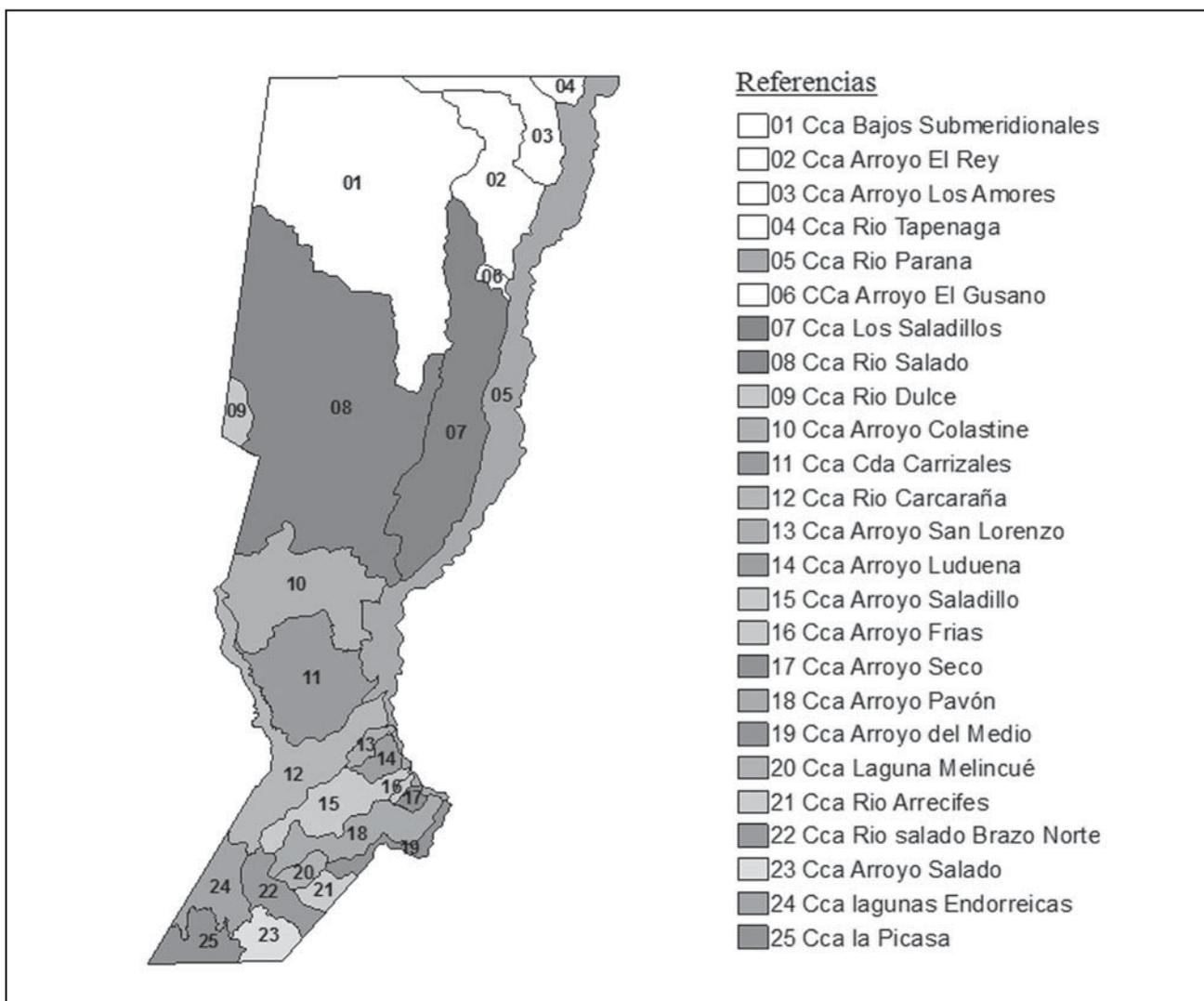


Figura 1. Sistemas hídricos analizados para la delimitación de áreas con riesgo de excedentes hídricos.

En el avance de los estudios se verificaron inconvenientes para obtener imágenes de calidad (sin cobertura nubosa u otros defectos) para las fechas de interés, a lo cual se le sumó que, dada la resolución temporal de las imágenes Landsat (16 días), tampoco se podía disponer de fechas cercanas. Esto hizo necesario readecuar la metodología propuesta recurriendo a los criterios edafológicos, que pasaron de ser elementos complementarios para “fortalecer” el mapeo realizado a partir de las imágenes, a considerarse “base” para la cartografía de las ARH asociadas a las mayores recurrencias.

## METODOLOGÍA

La delimitación de las ARH se basó esencialmente en la demarcación de las áreas anegadas en imágenes satelitales de fecha coincidente con la ocurrencia de un evento de recurrencia preestablecida a partir de estudios hidrológicos y complementando con la aplicación de criterios edafológicos principalmente en las zonas donde no se dispuso con información proveniente de imágenes.

La aplicación metodológica abarcó tres etapas: en primer lugar el análisis de frecuencia de las variables hidrometeorológicas, posteriormente la selección y análisis de imágenes satelitales y por último el trazado de las ARH. Esta última etapa abarcó también la adaptación del procedimiento para demarcación de las áreas en función de la disponibilidad de información.

### Análisis de Frecuencia de Variables Hidrometeorológicas

Para establecer la recurrencia de un evento observado en un determinado sistema hídrico fue necesario realizar un análisis de frecuencia de la variable hidrometeorológica (caudal, altura hidrométrica o precipitación) previamente seleccionada en función de la disponibilidad de datos. Cuando se dispuso de datos de más de una variable ésta se adoptó según el siguiente orden de prioridad: en primer lugar el caudal considerado éste como la variable más consistente cuando se trata de establecer el espacio que inunda un curso de agua en diferentes situaciones hidrológicas (CFI - AFIN, 1993), en el caso de inexistencia de datos de caudal pero sí de alturas hidrométricas se adoptó esta variable bajo la hipótesis simplificada de correspondencia entre las recurrencias de alturas y caudales de un evento dado y en última instancia, cuando no se dispone de datos de caudal ni de altura hidrométrica se optó por la precipitación como variable de estudio bajo la hipótesis simplificada de correspondencia entre las recurrencias de precipitaciones y caudales de un evento dado. Seleccionada la variable se generó la serie muestral de máximos anuales (año hidrológico) y para cada serie se realizó un análisis de frecuencia con el programa AFMULTI (Paoli, 1991), a partir del cual se definió la función de distribución que mejor ajustó entre las analizadas (Log Normal, Gumbel, GEV, Pearson III, Log Pearson III y Exponencial). Para la función de distribución adoptada se determinaron los valores maximizados de la variable para las recurrencias de interés (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años) y las recurrencias correspondientes a cada valor de la serie muestral.

### Selección y Análisis de Imágenes Satelitales

El estudio se limitó, por razones presupuestarias, al uso de las imágenes del satélite Landsat de dominio público. Éstas poseen una resolución espacial de 30 m y temporal de 16 días. A partir de los catálogos de imágenes disponibles en sitios de internet (USGS, CONAE, INPE) se elaboró un listado de las fechas de adquisición de imágenes en las cuales éstas reunían

las condiciones de calidad necesaria para la interpretación. A cada imagen se le asignó la recurrencia correspondiente al estado hídrico registrado determinada a partir de la variable y función de distribución adoptada en el análisis previo de frecuencia. Luego se seleccionaron aquellas imágenes que cubrieron el rango de recurrencias de interés con preferencia de las fechas recientes, a efectos que sean representativas del sistema de drenaje actual.

Se realizó el pre-procesamiento digital de las imágenes satelitales seleccionadas para ajustarlas al sistema cartográfico del estudio (Posgar 2007) y posteriormente se efectuó el procesamiento digital consistente básicamente en la aplicación de distintos métodos, tales como: composiciones en color, realces, filtros, restas y cocientes de bandas, etc., los cuales se emplearon con el fin de mejorar la visualización del elemento de interés a interpretar, límite agua-suelo en este caso.

### Delimitación de las Áreas de Riesgo Hídrico

Las ARH establecidas en la Ley Provincial 11730 son las denominadas áreas I, II y III. El área I corresponde a los cauces naturales y artificiales y cuerpos de agua permanente, es aquella superficie que normalmente ocupa el agua y la recurrencia para fijar este límite se estableció en 2 años. El área II comprende las vías de evacuación de crecidas y áreas de almacenamientos y se asoció a recurrencias entre 2 años y 25 años. El área III corresponde a las zonas con riesgo de inundación no incluidas en las áreas I y II.

En la selección de imágenes se verificaron inconvenientes para obtener material de calidad para las fechas coincidentes con estados hídricos de recurrencia superior a los 10 años, además dada la resolución temporal de las imágenes Landsat tampoco se pudo disponer de fechas cercanas a eventos críticos. Esta circunstancia limitó la disposición de imágenes de recurrencias altas a solo algunos sistemas hídricos y exigió el desarrollo de un procedimiento basado en criterios edafológicos. En consecuencia la metodología que se aplicó varió en función de la disponibilidad de imágenes, así para el área I, de baja recurrencia, se utilizó el procedimiento basado en imágenes satelitales mientras que para las áreas II y III, asociadas a mayores recurrencias, se utilizaron criterios edafológicos.

#### Procedimiento para el Área I basado en interpretación de imágenes

En los cauces naturales y artificiales los límites del área I se identificaron en base a imágenes satelitales digitalizando la superficie anegada para una recurrencia de 2 años, aproximadamente. En los cuerpos de agua cerrados se identificaron como permanentes a aquellos que contenían agua en imágenes correspondientes a un estado hídrico de sequía severo y se delimitó como área I a aquella que incluye la superficie anegada más la franja perimetral con vegetación nula o muy escasa (palustre), con o sin depósitos de sal, aspecto indicativo de suelos sujetos a un anegamiento muy frecuente.

#### Procedimiento para las Áreas II y III basado en criterios edafológicos

El procedimiento propuesto para elaborar un mapa de zonas con excedentes hídricos a partir de la información edafológica se basa en la circunstancia que el suelo tiene “memoria” de excesos hídricos manifestada a través de diversos rasgos: colores, moteados, concreciones ferromangánicas, entre otros. Si bien a esta apreciación no es posible asociarle una recurrencia

cuantitativa sí puede realizarse una valoración semicuantitativa en los términos de muy anegable, frecuentemente anegable, ocasionalmente..., hasta no anegable. Esto está considerado en la clasificación de los suelos por grupos de aptitud productiva (GAT) en la que se identifican en clases y subclases. Las clases son ocho, con restricciones crecientes para el uso de la tierra desde la 1 (óptima) a la 8 (no apta) y cada una de ellas agrupa tierras con riesgos de similares magnitud para la producción. Las clases se subdividen en subclases que indica el tipo de limitación, tal como: erosión (e), permanencia de excesos hídricos (w), restricciones del suelo en la zona de enraizamiento (s) y climáticas (c). Mayor referencia sobre este tema se puede consultar en los trabajos realizados por INTA - Rafaela (*Giorgi et al., 2010*).

A través del Servicio de Catastro e Información Territorial (SCIT) se contó con información de suelos que permitió elaborar un mapa para la provincia de Santa Fe, en formato shape y escala 1:50.000, de unidades cartográficas (UC) con la simbología según la taxonomía de suelos y con las clases y subclases según clasificación por GAT. Este material fue la base para el desarrollo del procedimiento para delimitar las ARH con criterios edafológicos el cual abarcó las siguientes etapas:

1. Definición de los criterios edafológicos. A partir del mapa de suelos elaborado se realizó una primera zonificación de ARH considerando el riesgo de anegamiento asociado a la clasificación en clases y subclases de las UC. Se delimitaron las tres zonas definidas por la Ley 11730 (I, II y III) y otras tres que son la zona IV tácita en la Ley que supone tierras con muy baja a nula probabilidad de inundación y las II/III y III/IV consideradas, según los criterios aplicados, como áreas intermedias (grises) entre las definidas por la Ley.
2. Validación de los criterios edafológicos. Se seleccionaron cuencas con relieve contrastante y que además dispusieran de imágenes con recurrencia conocida. Sobre estas cuencas se demarcaron las áreas de riesgo según los criterios edafológicos definidos en la etapa anterior y por otro lado se digitalizaron las áreas inundadas visualizadas en las imágenes lo que permitió asociarles una recurrencia a las áreas. Se contrastó la zonificación por suelos con la mapeada en las imágenes, considerando éstas como mejor aproximación. Se calculó el grado de concordancia definido como el porcentaje del área de suelos que concuerda con el área mapeada.
3. Re-definición de los criterios edafológicos. A partir de los resultados de la etapa anterior se realizaron correcciones y optimizaciones a la zonificación edafológica y se re evaluó el grado de concordancia. Se reasignaron las clases y subclases de suelos a cada área de riesgo.
4. Extrapolación de los criterios edafológicos. Se aplicó la zonificación según criterios edafológicos al resto de los sistemas hídricos de la provincia indicados en la Figura 1, a excepción del sistema Paraná donde por su régimen fue posible disponer de imágenes de recurrencia próxima a los 20 años para la demarcación del Área II.

La recurrencia adoptada para la delimitación del área II por criterios edafológicos fue de 10 años. Si bien éste es un valor bajo de recurrencia como límite del

área II es el que permitió la información disponible considerando que no se hallaron imágenes satelitales, requeridas para la validación, de recurrencias superiores a 10 años y además, desde el punto de vista de los criterios edafológicos, a medida que la frecuencia de anegamiento es mayor es más nítida la relación de los suelos con su característica de inundabilidad ya que las crecidas más frecuentes dejan rasgos más marcados y distintivos en el suelo que las menos frecuentes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de Frecuencia de Variables Hidrometeorológicas

Las variables hidrológicas analizadas en cada cuenca y la función de distribución adoptada se sintetizan en la Tabla 1. Las variables se adoptaron de acuerdo a los criterios establecidos y previo análisis de consistencia de las mismas.

### Selección de Imágenes Satelitales

Con base a los resultados del análisis de frecuencia de las variables hidrometeorológicas se establecieron las fechas en las cuales se produjo un evento de recurrencia próxima a las de interés (2, 10, 25 y 100 años) y se buscaron imágenes coincidentes o próximas a dichas fecha. En este proceso se hallaron los principales inconvenientes para la obtención de tal producto con la calidad requerida. Ante esta situación se procedió a ampliar el listado de imágenes considerando también aquellas donde se observaron condiciones de crecida y/o humedad en el suelo. Las recurrencias correspondientes a los estados hídricos observados en cada imagen se determinaron a partir de las funciones teóricas de probabilidad ajustadas en el análisis de frecuencia. En total se analizaron imágenes de 57 fechas y el resultado se sintetizó en una matriz donde se indicó para cada cuenca y para cada fecha la recurrencia del estado hídrico observado en la imagen.

### Delimitación de las Áreas de Riesgo Hídrico

#### Delimitación Del Área I

Los límites del área I en cauces se identificaron en base a imágenes de satélite de fechas recientes a partir de la selección de eventos de recurrencia de 2 años, aproximadamente, sobre las que se digitalizó la superficie anegada (ejemplo en la Figura 2).

Los cuerpos de agua cerrados se identificaron como permanentes mediante interpretación de la imagen satelital de agosto 2009 correspondiente a un estado hídrico de sequía severo. Luego se definió como área I a aquella que incluye la superficie anegada (lagunas permanentes) más la franja perimetral con vegetación escasa (ejemplo en la Figura 3).

#### Delimitación De Las Áreas II y III

##### Primera Tentativa de Zonificación con Criterios Edafológicos

El mapa de suelos generado a partir de los datos del SCIT conjuntamente con el análisis de las características desde el punto de vista hídrico de los suelos de cada clase y subclase, permitió definir, en forma tentativa, una primera aproximación de la zonificación mediante la siguiente correspondencia entre clasificación de los suelos y zonas con excedentes hídricos.

En la Tabla 2 la ARH denominada "I y II" se refiere a que los suelos agrupados en ella están incluidos en las áreas I y II en

Tabla 1. Variables Hidrometeorológicas Analizadas en cada Sistema y Función de Distribución Adoptada

Sistema	Curso de agua	Variable Hidrometeorológica	Estación	Función distribución	
Nº	Nombre				
5	Río Paraná	Paraná	Altura hidrométrica	Reconquista	GEV
		San Javier	Altura hidrométrica	Alejandra	GEV
		San Javier	Altura hidrométrica	San Javier	GEV
		San Javier	Altura hidrométrica	Helvecia	PEARSON
		San Javier	Altura hidrométrica	Cayastá	GEV
		Coronda	Altura hidrométrica	Puerto Gaboto	GEV
		Paraná	Altura hidrométrica	Puerto San Martín	GEV
		Paraná	Altura hidrométrica	Rosario	GEV
7	Saladillos	Río Toba	Altura hidrométrica	Margarita	PEARSON
		Saladillo Amargo	Altura hidrométrica	RP39	GEV
		Saladillo Dulce	Altura hidrométrica	RP39	GEV
		Saladillo Amargo	Altura hidrométrica	RP81S (Vera Mujica)	GEV
		Saladillo Dulce	Altura hidrométrica	RP81S (La Noria)	GEV
		Saladillo	Altura hidrométrica	RP62	GEV
		Riacho Santa Fe	Altura hidrométrica	Puerto Santa Fe	GEV
8	Salado	Río Salado	Caudal	RP70 (Recreo)	GEV
		A° Cululú	Caudal	RP50 (MASPYMA)	LOGPEARSON
			Precip.media areal	M.Ville, Sunchales, Eusebia, Rafaela, Esperanza y Saguier	LOGGAUSS
		A° San Antonio	Precip.media areal	M.Ville, S.Guillermo, S.Cristobal, S.Justo, Va.Saralegui	GEV
		A° Las Conchas	Precip.media areal	Ceres, Huanqueros, S.Guillermo, S.Cristóbal, Tostado, Va.Saralegui, V.Pintado	GEV
9	Laguna de Mar Chiquita	Precipitación	San Guillermo	PEARSON	
10	Colastiné	Precip.media areal	Pelligrini, Rafaela, Sauce Viejo	GEV	
11	Cda. Carrizales	Precip.media areal	Pelligrini, Totoras, Cda. Gómez	GEV	
12	Carcaña	Caudal	Pueblo Andino	GEV	
13	A° San Lorenzo	Precip.media areal	Rosario, Oliveros y Roldán	GEV	
14	Ludueña	Precip.media areal	Rosario y Roldán	LOGPEARSON	
15	Arroyo Saladillo	Precip.media areal	Rosario, Roldán y Cda. Gómez	GEV	
16	Arroyo Frias	Precip.media areal	Rosario y Cnel.Bogado	PEARSON	
17	Arroyo Seco	Precip.media areal	Rosario y Cnel.Bogado	PEARSON	
18	Arroyo Pavón	Caudal	Cnel. Bogado	GEV	
19	Arroyo del Medio	Caudal	La Emilia	LOGPEARSON	
20	Laguna Melincué	Niveles observ.		GEV	
21	Arrecifes	Precip.media areal	Venado Tuerto y Pergamino	LOGGAUSS	
22	Río Salado Brazo Norte	Precipitación	Venado Tuerto	PEARSON	
23	Río Salado Brazo Sur	Precip.media areal	Venado Tuerto, Rufino Y Junin	PEARSON	
24	Lagunas endorreicas	Precipitación	Venado Tuerto	PEARSON	

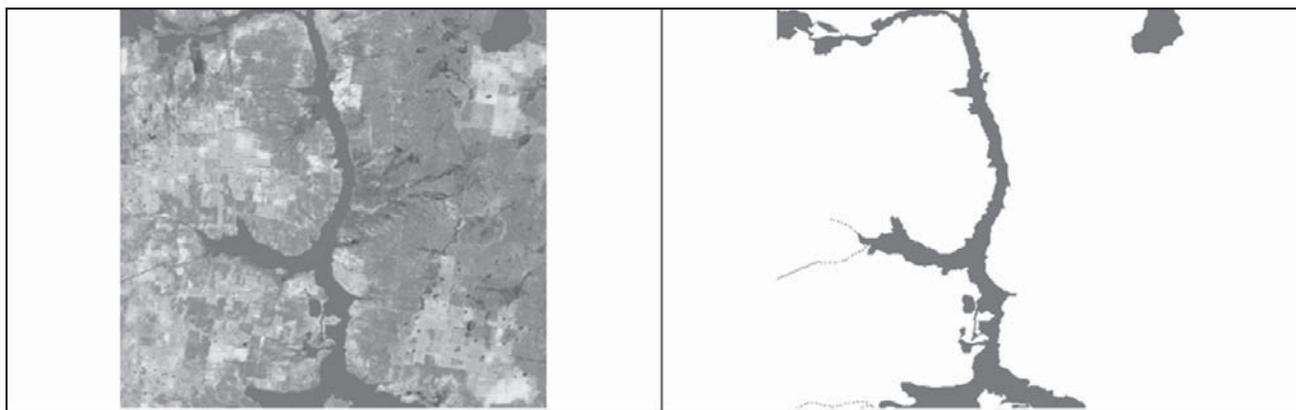


Figura 2. Trazado Área I de Riesgo Hídrico (Santa Fe, Argentina) en cauces naturales y artificiales.

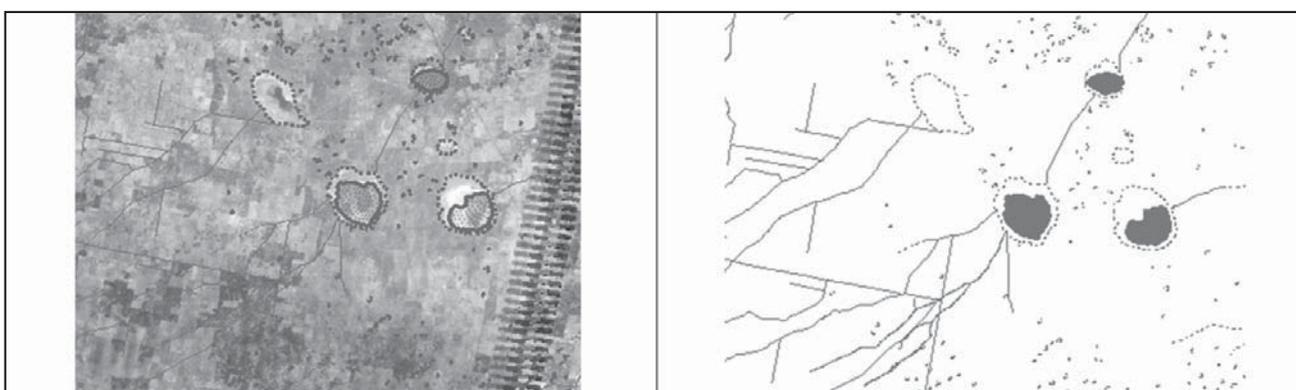


Figura 3. Trazado Área I de Riesgo Hídrico (Santa Fe, Argentina) en cuerpos de agua cerrados.

un procesamiento posterior podrá definirse el área II sustrayendo la I que se delimita con imágenes. Las ARH designadas “II / III” y “III / IV” son zonas grises con incertidumbre en la asignación de los suelos hacia una u otra. La ARH IV comprende todos los suelos no inundables.

*Validación de los Criterios Edafológicos*

Para validar la zonificación del punto anterior se seleccionaron cuencas que poseen imágenes con recurrencia conocida.

A modo de ejemplo se describe lo realizado en la cuenca del Arroyo Colastiné. En la Figura 4 se presenta la zonificación en la cuenca con los criterios edafológicos indicados en la Tabla 2.

A fin de verificar las áreas definidas con criterios edafológicos se digitalizaron las manchas de humedad identificadas en imágenes de satélite con recurrencias próximas y superiores a los 10 años, para representar eventos de recurrencias incluidas en las áreas II y III. El reconocimiento de las manchas de humedad en dichas imágenes es un proceso que cuenta con

Tabla 2. Primer tentativa de zonificación de Áreas de Riesgo Hídrico según criterios edafológicos.

ARH	Clases y Subclases de suelos según GAT										
I y II	5 w	5 w(s)	5 ws	5 ws(e)	5/6 ews	5/6 w	5/6 ws	6 e	6 ew	6 ews	6 w
	6 ws	6 ws(e)	6/5 ws	6/7 ews	6/7 ws	6ws	7 ews	7 w	7 ws	7/6 ews	7/6 ws
	8 0	8 ews	8 w	8 ws	8 ws(e)	10w					
II / III	5 e	5 ew	5 ew(s)	5 ews	5/4 ews	5/4 w	5/4 ws				
III	2/3 ew	2/3 w	2/3 w(e,s)	2/3 w(s)	2/3 ws	3 e	3 e(w)	3 ew	3 ew(s)	3 ews	3 s(e)
	3 sw	3 sw(e)	3 w	3 w(e)	3 w(e,s)	3 w(s)	3 ws	3/2 w(s)	3/2 ws	3/4 ew(s)	3/4 ews
	3/4 w	3/4 w(e,s)	3/4 w(s)	3/4 ws	3w	4 e	4 e(w)	4 ew	4 ew(s)	4 ews	4 s
	4 sw(e)	4 w	4 w(s)	4 ws	4 ws(e)	4/3 ews	4/3 w(s)	4/3 ws	4/5 ews	4/5 ws	
III / IV	2 w	3 s	3 s(e)	3 sw	3 ws						
IV	1	1 (e)	1 (s)	1 (w)	1 w	1 w(s)	1(w)	1/2 w	2	2 (s,c)	2 c(w)
	2 e	2 e(w)	2 s	2 w(e)	2 w(s)	2 ws	2/3 e	3 e	3 s(c)		

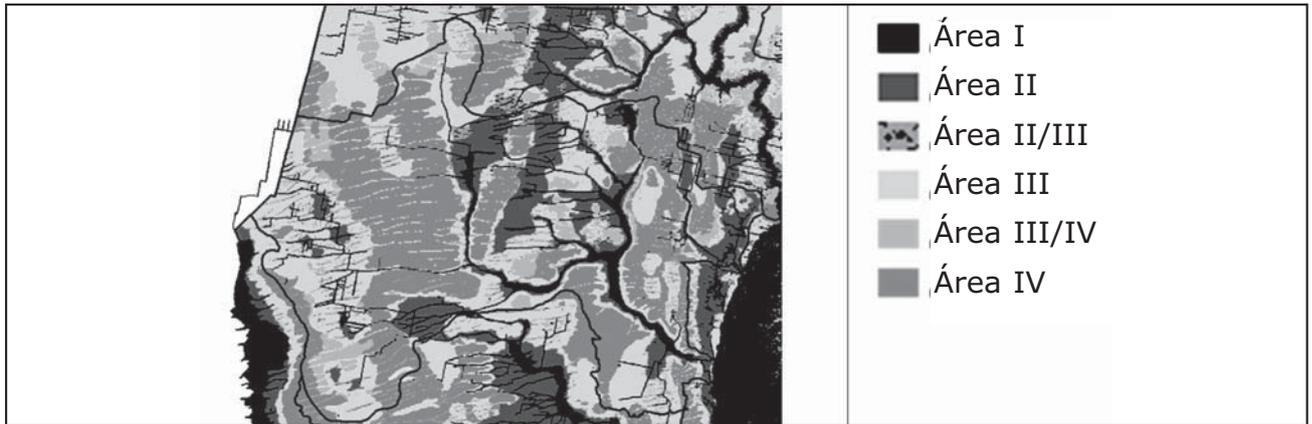


Figura 4. Cuenca del Arroyo Colastiné (Santa Fe, Argentina). Primer tentativa de zonificación de Áreas de Riesgo Hídrico según criterios edafológicos.

incertidumbres debido a varios factores: en primer lugar las fechas de las imágenes aptas que se obtuvieron para cubrir eventos de una recurrencia asimilable a una ARH muchas veces eran de varios días posteriores al evento, por lo que la mancha de humedad que se podía visualizar dependía de la humedad del suelo antecedente, pendiente del terreno, etc. En segundo lugar la distribución espacial de los eventos, sobre todo cuando las imágenes se eligen con el evento precipitación, hace que una imagen no sea igualmente válida para toda una cuenca, sino sólo para un sector. Por lo tanto, el proceso de mapeo se realizó superponiendo varias imágenes de diferentes fechas a efectos de testear que pasaba con distintos fenómenos hidrometeorológicos.

En la Tabla 3 se indican las fechas de las imágenes seleccionadas para la validación en la cuenca del A° Colastiné y las recurrencias asociadas a los eventos pluviométricos observados.

Tabla 3. Cuenca del Arroyo Colastiné - Fechas Imágenes Seleccionadas para las Áreas II y III.

Zona de aplicación imagen dentro de la cuenca	Fecha Imagen	Recurrencia asociada
Este	18/04/07	83 años
Centro	27/12/06	9 años
Oeste	09/04/07	77 años

Sobre las imágenes seleccionadas se digitalizaron las áreas inundadas y manchas de humedad, de acuerdo al análisis de recurrencias se asignaron las zonas definidas en imagen 2006 al ARH II mientras que las mapeadas sobre imagen 2007 se asociaron al ARH III. El resultado del mapeo se sintetiza en la Figura 5.

El paso siguiente fue superponer el mapeo realizado a partir de imágenes satelitales (Figura 5) con la zonificación a partir de criterios edafológicos (Figura 4)

#### Reasignación de las clases de suelos a la zonificación

En función del análisis de la superposición de los mapas se procedió a corregir la clasificación en zonas realizada a partir del mapa de suelos considerando la digitalización de las áreas anegadas sobre las imágenes de satélites asociadas a cada área. La corrección se realizó a partir de procesos analíticos espaciales reasignando los grupos de suelo de la Tabla 2 en función de su condición respecto a la inclusión en las áreas mapeadas.

Surgieron situaciones particulares de los análisis de las imágenes en comparación con la clasificación de suelos como ser el caso de cañadas que en la clasificación de suelos aparecían como áreas III/IV o IV mientras que en imágenes de alta recurrencia, como las del 2007, aparecían anegadas, como hilos o concatenación de pequeñitos bajos naturales, dentro de una zona seca, en estos casos no se mapearon dada su complejidad



Figura 5. Cuenca Arroyo Colastiné (Santa Fe, Argentina). Demarcación de las ARH con criterios hidrológicos a partir de Imágenes satelitales

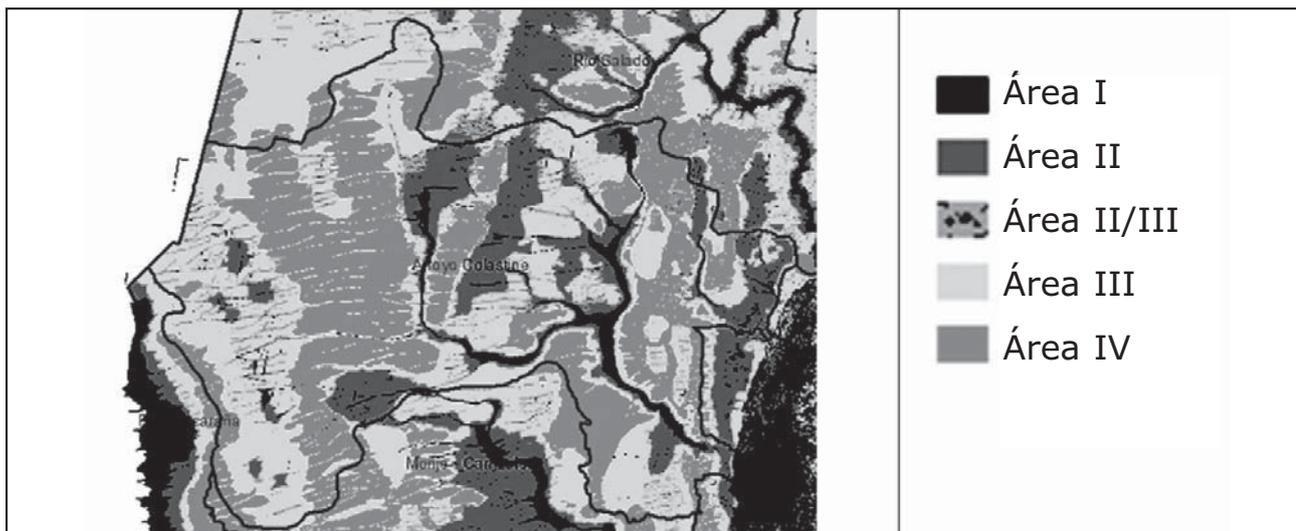


Figura 6. Cuenca del Arroyo Colastiné (Santa Fe, Argentina). Zonificación final de las Áreas de Riesgo Hídrico según criterios edafológicos.

cartográfica, sino que directamente se cambió la clasificación de los suelos, considerando que si la imagen marcaba la existencia de agua, la cañada debía estar considerada al menos como área III.

De manera similar a lo realizado en la cuenca del Ao. Colastiné se procedió con otras cuencas en las que se disponía de imágenes satelitales. El análisis realizado concluyó en la reasignación de las clases y subclases de los suelos asociadas a cada ARH como se indica en la Tabla 4. En la Figura 6 se representa la zonificación en la cuenca del Arroyo Colastiné resultante de la aplicación de los criterios edafológicos finalmente adoptados.

**CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES**

La metodología desarrollada para el trazado de las ARH es el resultado de un minucioso análisis de la información disponible para maximizar y optimizar su uso, y resulta acorde con la escala del área analizada.

Del contraste de las áreas con excedentes hídricos delimitadas con imágenes satelitales versus la zonificación con criterios edafológicos se determinó que en la delimitación del área II existe una coincidencia del 79% al 96% según el sistema y fecha analizada, mientras que para el área III los criterios fueron válidos para el 69 al 73% de los casos.

El producto final que se obtiene con la aplicación de esta metodología presenta limitaciones, principalmente por la imposibilidad de asociar en forma precisa los límites de las ARH II y III a un valor de recurrencia y como tal tiene un carácter preliminar no debiendo ser interpretado como una zonificación definitiva para regular el uso de suelos pero sí como una valiosa herramienta para una primera apreciación del grado de vulnerabilidad de un sector específico que permita definir la necesidad de llevar a cabo estudios más detallados.

Tabla 4. Zonificación final de las Áreas de Riesgo Hídrico según criterios edafológicos.

ARH	Clases y Subclases de suelos según GAT										
II	5 w	5 w(s)	5 ws	5 ws(e)	5/4 ews	5/4 w	5/4 ws	5/6 ews	5/6 w	6 e	6 ew
	6 ews	6 w	6 ws	6 ws(e)	6/5 ws	6/7 ews	6/7 ws	7 ews	7 w	7 ws	7/6 ews
	7/6 ws	8	8 ews	8 w	8 ws	8 ws(e)	10w				
II / III	5 e	5 ew	5 ew(s)	5 ews	5/4 ews	5/4 w	5/4 ws	2w	2 w(e)	2 w(s)	2 ws
	2/3 ew	2/3 w	2/3 w(e,s)	2/3 w(s)	2/3 ws	3/2 w(s)	3/2 ws				
III	3w	3 w(e)	3 w(e,s)	3 w(s)	3 ws	3s	3 e	3 e(w)	3 ew	3 ew(s)	3 ews
	3 s(e)	3 sw	3 sw(e)	3/4 ew(s)	3/4 ews	3/4 w	3/4 w(e,s)	3/4 w(s)	3/4 ws	4 e	4 e(w)
	4 ew	4 ew(s)	4 ews	4 s	4 sw(e)	4 w	4 w(s)	4 ws	4 ws(e)	4/3 ews	4/3 w(s)
	4/3 ws	4/5 ews	4/5 ws								
IV	1	1 (e)	1 (s)	1 (w)	1 w	1 w(s)	1/2 w	2	2 c(w)	2 e	2 e(w)
	2 s	2 (s,c)	2/3 e	3 e	3 s(c)						

**TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- CFI-AFIN, 1993.  
Estudio para la Determinación de la Línea de Ribera del Río Negro.  
*Informe Final. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.*
- COMISIÓN NACIONAL DE ACTIVIDADES ESPACIALES (CONAE).  
Catálogo de imágenes Landsat.  
*Disponible en <http://catalogos.conae.gov.ar/LANDSAT/defaultl.asp>.*
- GIORGI R., TOSOLINI R., SAPINO V., LEÓN C., 2010a.  
Agrupamiento por aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe (GAT) - I.  
*Conceptos del sistema. Disponible en [http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/GAT\\_conceptual.htm](http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/GAT_conceptual.htm)*
- GIORGI R., TOSOLINI R., SAPINO V., LEÓN C., 2010b.  
Agrupamiento por aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe (GAT) - II.  
*Procedimientos operativos para la clasificación de las unidades cartográficas en clases y subclases de aptitud agropecuaria. Disponible en [http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/GAT\\_operativo.htm](http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/GAT_operativo.htm)*
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE).  
Catálogo de Imagens.  
*Disponible en <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>*
- PAOLI C, BOLZICCO J, CACIK P., 1991.  
Manual del Usuario - Programa AFMULTI.  
*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*
- PEDRAZA R., TONINI C., TARDIVO R., PUSINERI G., GRACIANI S., GARDIOL M., 2002.  
Delimitación de áreas de riesgo hídrico en el Sistema Saladillos - San Javier.  
*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS).  
Landsat Missions.  
*Browse and Download Data. <http://glovis.usgs.gov/>*





# Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

## Functional network model oriented to water level forecasting in flatland streams of Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

Scuderi, Carlos M. <sup>1</sup> ✉ - Riccardi, Gerardo A. <sup>1,2</sup> - Zimmermann, Erik D. <sup>1,3</sup>

Recibido: 4 de febrero de 2015 • Aceptado: 25 de febrero de 2015

### Resumen

Se presentan diferentes modelos de redes funcionales orientados a pronóstico de niveles, que fueron aplicados en cuencas del Gran Rosario. Las variables de entrada son precipitación y nivel vinculado a un tiempo  $t_0$ , mientras que la salida está dada por niveles asociados a diferentes horizontes temporales  $t_{pi}$ . A partir de los eventos observados, en promedio 10 tormentas sobre 15 estaciones limnimétricas, se calculan las combinaciones posibles para constituir dos grupos: uno para aprendizaje y otro para validación de la red. La evaluación de los modelos se efectúa por medio de distintos estadísticos, entre ellos: diferencia máxima en el nivel pico ( $D_{pico}$ ), coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) y raíz del error cuadrático medio (RECM). Para los cuatro limnímetros presentados en este trabajo el valor de  $D_{pico}$  varía entre 0,04 m y 1,07 m, el de NS varía entre 0,99 y 0,75 y el de RECM fluctúa entre 0,03 m y 0,32 m, para tiempos de pronóstico desde 15 minutos hasta 6 horas respectivamente. Este tipo de modelos puede ser implementado en cualquier cuenca que posea datos de precipitación y niveles. Los resultados obtenidos hasta el presente son favorables, demostrando la capacidad de “aprendizaje” y simulación de eventos de estos modelos.

**Palabras clave:** modelos de caja negra, redes funcionales, pronóstico de niveles, cuencas de llanura.

### Abstract

Different models of functional networks oriented to forecasting water levels, which were applied in watersheds of Gran Rosario are presented. The input variables are rainfall and water level linked to a time  $t_0$ , while the output is given by water levels associated with different time horizons  $t_{pi}$ . From the observed events, an average of 10 storms over 15 gauge stations, the possible combinations are calculated to form two groups: one

1. Departamento de Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones HidroAmbientales

✉ cscuderi@fceia.unr.edu.ar

2. Investigador CIC-CIUNR. Universidad Nacional de Rosario

3. Investigador CONICET. Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario (UNR). Riobamba 250 bis. Rosario (2000). Santa Fe, Argentina

for learning and one for network validation. The evaluation of the models was carried out using different statistics, including: maximum difference in peak water level ( $D_{pico}$ ), coefficient of efficiency Nash-Sutcliffe (NS) and root mean square error (RECM). For the four gauges presented here  $D_{pico}$  value varies between 0,04 m and 1,07 m, the NS varies between 0,99 and 0,75 and the RECM fluctuates between 0,03 m and 0,32 m, for forecasting time from 15 minutes to 6 hours respectively. Such models can be implemented in any basin that has rainfall and water levels data. The results obtained to date are auspicious, showing the ability of "learning" and event simulation of these models.

**Keywords:** black box models, functional networks, level water forecast, plain watersheds.

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son uno de los desastres naturales de mayor impacto, que provocan miles de muertes, afectados y cuantiosos daños materiales con pérdidas millonarias. Las mismas se producen prácticamente en la totalidad de los países del mundo, razón por la cual es necesario anticiparse a su ocurrencia o al menos atenuar sus consecuencias (Berga Casafont, 1990; Dueñas Molina, 1995). El manejo actual de las inundaciones requiere un enfoque multidisciplinario donde se integren aspectos técnicos, sociales, económicos y políticos (Gruntfest, 1995). Dentro de la ingeniería, las medidas destinadas al control de las inundaciones pueden ser estructurales o no estructurales (Berga Casafont, 1995). Las primeras intervienen durante la formación y ocurrencia del evento al modificar las características hidrológicas e hidráulicas de la cuenca, mientras que las segundas plantean la convivencia del hombre y del agua en un mismo espacio geográfico con el fin de minimizar los daños derivados de las inundaciones. En la actualidad, se recomienda el empleo conjunto de ambos tipos de medidas (Berga Casafont, 1995; Lekkas et al., 2004).

El pronóstico de caudales o niveles en cursos de agua, que se encuentra entre las medidas no estructurales, consiste en estimar con la adecuada anticipación la evolución temporal de dichas variables hidráulicas con el fin de poder ejecutar las medidas tendientes a proteger a la población y a la infraestructura en caso de situaciones con riesgo de inundación. Dicho pronóstico se efectúa a partir de un modelo matemático que puede ser físicamente basado o por el contrario de caja negra. Los modelos físicamente basados tienden a representar con rigurosidad los procesos físicos que se desarrollan en una cuenca durante la ocurrencia de un proceso de tormenta - crecida (Ogden et al., 2000) a través del planteo de las ecuaciones de conservación de masa y momentum; hecho que demanda gran cantidad de datos de entrada, recurso computacional y tiempo de cálculo. En cambio los modelos de tipo caja negra se basan en una concepción diferente: dado que el pronóstico de niveles (y/o caudales) en tiempo real requiere disponer de resultados lo más aproximados en el menor tiempo posible, es válido ignorar ciertos aspectos y componentes físicos del sistema estudiado (Hsu et al., 1995).

Estos últimos relacionan la precipitación con el nivel (y/o caudal) en los cursos de agua de forma muy simplificada, siendo precisamente esta sencillez lo que hace que ganen popularidad en el pronóstico de crecidas. Diferentes modelos de caja negra se utilizan para pronóstico asociados al estudio de inundaciones, entre ellos las redes neuronales (RN) han comenzado a emplearse desde hace aproximadamente unos 15 años (Thirumalaiah y Deo, 1998; Campolo et al., 1999; Bruen y Yang, 2005). Bruen y Yang (2005) destacan tres propiedades de las mismas: (1) la habilidad para aprender a partir de los datos de

entrada, (2) la potencialidad para describir el comportamiento de sistemas no lineales complejos en forma precisa, por ej. el proceso de transformación lluvia - caudal (o lluvia - nivel), y (3) no requerir a priori el conocimiento detallado del proceso a representar. Sin embargo, existe un consenso generalizado (Dawson y Wilby, 1998; Maier y Dandy, 2000) en que las RN no permiten extrapolar resultados más allá de los datos de entrada con las que fueron entrenadas. Dawson y Wilby (1998) junto con Thirumalaiah y Deo (1998) concuerdan en que la selección del período de aprendizaje y de validación afecta la capacidad de pronóstico de la red, mientras que Shrestha et al. (2005) observan que la red puede funcionar muy bien en aprendizaje siendo incapaz de generalizar resultados más allá del rango de datos de entrada.

El objetivo de este estudio es evaluar el desempeño de diferentes modelos de redes funcionales (RF), que son una generalización de las redes neuronales (Castillo y Gutiérrez, 1998), aplicados al pronóstico de niveles en distintas secciones características de los arroyos Ludueña y Saladillo, situados en la zona del Gran Rosario (sur de la provincia de Santa Fe, Argentina). Para ello se proponen tres familias de funciones: polinómica, exponencial y de Fourier, con diferentes grados de aproximación. Como variables de entrada son utilizadas la precipitación y el nivel limnimétrico para un tiempo  $t_0$  con el objetivo de pronosticar como variable de salida los niveles limnimétricos para diferentes tiempos de pronóstico  $t_{pi}$ , que comprenden horizontes temporales desde 15 minutos hasta 6 horas de anticipación. Algunos resultados preliminares de este trabajo, que forman parte de los estudios de doctorado que están siendo llevados a cabo por el primer autor, se presentan en Scuderi et al. (2011) y en Scuderi et al. (2012).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La zona centro - este de la República Argentina, conocida como Llanura Pampeana, posee suelos de excelente calidad para agricultura y ganadería y dispone de fuentes seguras de agua para consumo humano. Estas condiciones alientan el establecimiento de grandes urbes que tienden a concentrar un elevado número de personas en espacios reducidos (Tucci y Bertoni, 2003) y de esta forma incrementar la presión sobre los conglomerados urbanos y sus sistemas.

La región del Gran Rosario, tercera metrópoli del país, se encuentra situada al sur - este de la provincia de Santa Fe y a la vera del río Paraná; presentando un relieve sumamente plano con escasa pendiente y suelo arcilloso - limoso con permeabilidad moderada a moderadamente lenta (INTA, 1983). Estos hechos particulares de características naturales sumados al incremento en la densidad poblacional a través de emprendimientos urbanísticos (esencialmente por la construcción de barrios cerrados) y a la impermeabilización de los suelos debido a prácticas

agrícolas intensivas (principalmente por el cultivo de soja), favorecen la generación de un mayor volumen de escurrimiento superficial junto con una disminución en los tiempos de respuesta de las cuencas. La zona del Gran Rosario ha sufrido el impacto periódico de diferentes eventos pluviométricos intensos (en las décadas de 1940 y de 1960, y en los años 1986, 2007 y 2012), que generaron inundaciones con diferente grado de severidad, provocando grandes pérdidas económicas y en algunos casos hasta la pérdida de vidas humanas. Estos hechos han llevado a la ejecución de obras de conducción y alivio por parte de las autoridades públicas. Las condiciones descritas anteriormente favorecen un escenario cada vez más vulnerable a las inundaciones, razón por la cual la protección de la población (generalmente de sectores marginados que ocupan las adyacencias de los cursos de agua o sectores deprimidos, ambos de escaso valor inmobiliario) como de infraestructura pública y de bienes materiales cobra cada vez mayor importancia.

#### Cuencas en estudio

Las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo (Figura 1) se sitúan en el sureste de la provincia de Santa Fe (República Argentina). El clima de la región es templado subtropical sin estación seca (verano cálido) o Cfa (según la clasificación climática de Köppen). La precipitación media anual es de 1014,4 mm (estación Rosario Aero, SMN, serie 1936-2013), registrándose el 70% en el período primavera-verano (octubre a marzo). La temperatura media anual es de 17,5 °C, mientras que la humedad relativa media anual es de 72% (estación Rosario Aero, SMN, serie 1973-2012). Ambas cuencas presentan una fuerte intervención antrópica, encontrándose atravesadas por numerosas vías de comunicación (rutas y ferrocarriles); mientras que la agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose la producción de soja, maíz y trigo.

La cuenca del arroyo Ludueña se ubica entre los paralelos 32° 45' y 33° 07' S y los meridianos 60° 41' y 61° 06' O. La red hídrica se compone del arroyo Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat con sus tributarios, cuya longitud total es de 140 km; sin embargo en época de lluvias la gran cantidad de pequeños cursos intermitentes acrecienta dicha longitud hasta los 370 km. El área de aporte es de 740 km<sup>2</sup> y su elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar, con pendiente media del orden de 1,5 m.km<sup>-1</sup>. El caudal base del arroyo Ludueña es de 0,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, alcanzando los 80 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en crecidas ordinarias y caudales superiores a los 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en eventos extraordinarios con recurrencia mayor a los 50 años (Riccardi et al., 2002).

La cuenca del arroyo Saladillo se ubica entre los paralelos 32° 59' y 33° 37' S y los meridianos 60° 36' y 61° 54' O. La red hídrica principal se compone del arroyo Saladillo, el arroyo La Candelaria y el canal Sanford-Arequito, entre otros. La longitud del curso principal (arroyo Saladillo) es de 145 km, mientras que la red total de cursos (considerando los afluentes de los anteriores) es de 359 km. El área de aporte es de 3150 km<sup>2</sup> y su elevación varía entre 115 m y 18 m sobre el nivel del mar. El caudal base del arroyo Saladillo es de 1 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, alcanzando los 1140 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> para eventos extraordinarios (Riccardi et al., 2008).

#### Datos de precipitación y niveles

La autoridad hídrica provincial, el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente, MASPMA, instaló en el año 2007 una red telemétrica de sensores de precipitación y niveles en cada una de las cuencas en estudio. Ambas redes se componen de 10 sensores pluviométricos (4 en Ludueña y 6 en Saladillo) y de 18 sensores limnimétricos (11 en Ludueña y 7 en Saladillo).

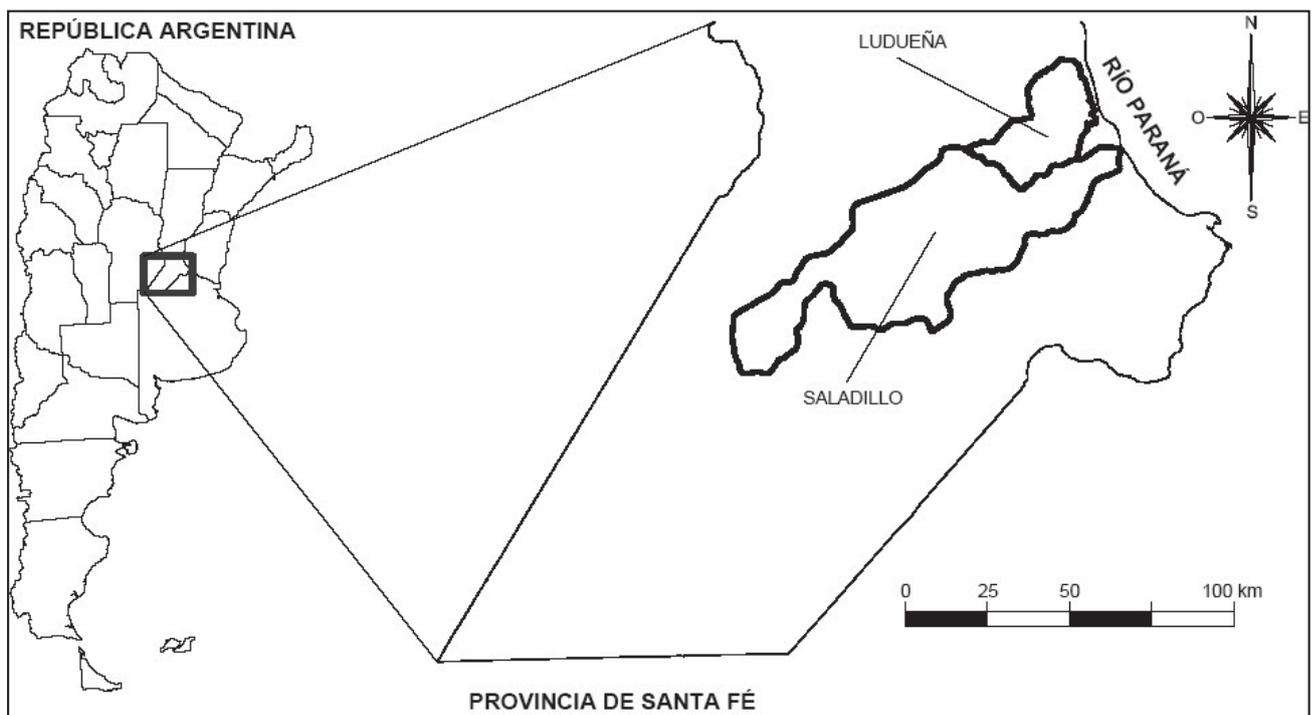


Figura 1. localización esquemática de las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo.

En la Figura 2 se señala la posición de los pluviómetros en cada cuenca mediante un triángulo, donde además en línea continua gruesa se exhiben los límites de cuenca, en línea de trazo los polígonos de Thiessen y línea continua delgada la red de cursos. En la Figura 3 se presenta la posición de los limnómetros dentro de cada cuenca mediante círculos, donde además en línea continua negra se exhiben las subcuencas y la red de cursos. Los datos son registrados cada 15 minutos, siendo luego transmitidos automáticamente a una estación central, donde se almacenan en un servidor y se disponibilizan en estado crudo mediante una página web. El acceso a los datos fue realizado manualmente desde la página web, gracias a la cesión de los mismos por parte de la autoridad hídrica provincial. El período de datos utilizado abarca desde julio de 2007 hasta junio de 2012, inclusive, siendo empleada la estación Rosario AERO (dependiente del Servicio Meteorológico Nacional, SMN) para el contraste de los datos pluviométricos.

El contraste entre lluvias registradas y la estación Rosario AERO, mediante dobles acumulaciones, arroja lo siguiente: las estaciones registran por debajo de la estación de testeo en un rango entre 28% y 46% (valor medio 35%). No obstante cuando se compara evento por evento, con un total de 20 tormentas, el contraste produce una diferencia, también en

menos, que fluctúa entre 11% y 28% (valor medio 18%) con un coeficiente de determinación  $r = 0,78$ . Respecto de los registros limnimétricos, algunos de ellos fueron cotejados con reglas en ciertas secciones; no obstante los equipos haber estado sometidos a situaciones de vandalismo. Un análisis más profundo sobre el desempeño de los sensores puede ser consultado en Scuderi et al. (2009).

Realizada la verificación de calidad de los datos, se efectuaron una serie de procedimientos complementarios: (1) cada una de las cuencas fue dividida en subcuencas en correspondencia con el área de aporte a cada sensor limnimétrico, empleando curvas de nivel espaciadas cada 1,25 m y la traza de los diferentes terraplenes viales y ferroviarios; (2) fue estimada el área de influencia de cada sensor pluviométrico mediante polígonos de Thiessen; (3) en función de las áreas obtenidas en los dos puntos anteriores se calculó el porcentaje de contribución de cada sensor pluviométrico a cada subcuenca a través de la intersección de ambas superficies.

Como etapa final fueron compatibilizados los datos de precipitación y niveles registrados, considerando como eventos válidos aquellos que cumplieran los siguientes requisitos establecidos en forma arbitraria: (a) la precipitación caída en la subcuenca supera los 10 mm (calculada en función del aporte

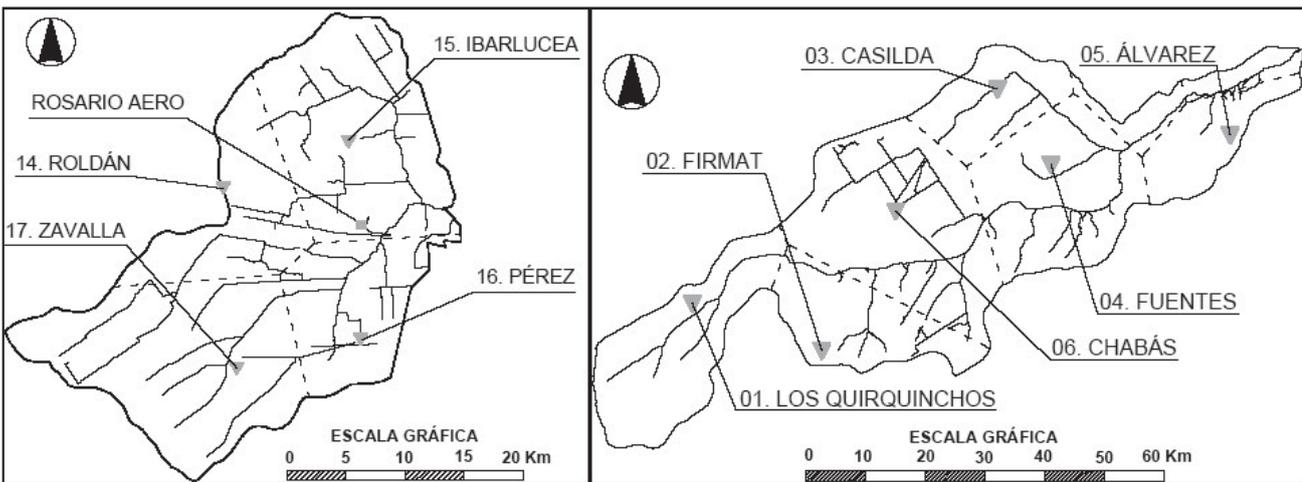


Figura 2. Estaciones pluviométricas, (izq) Ludueña y (der) Saladillo.

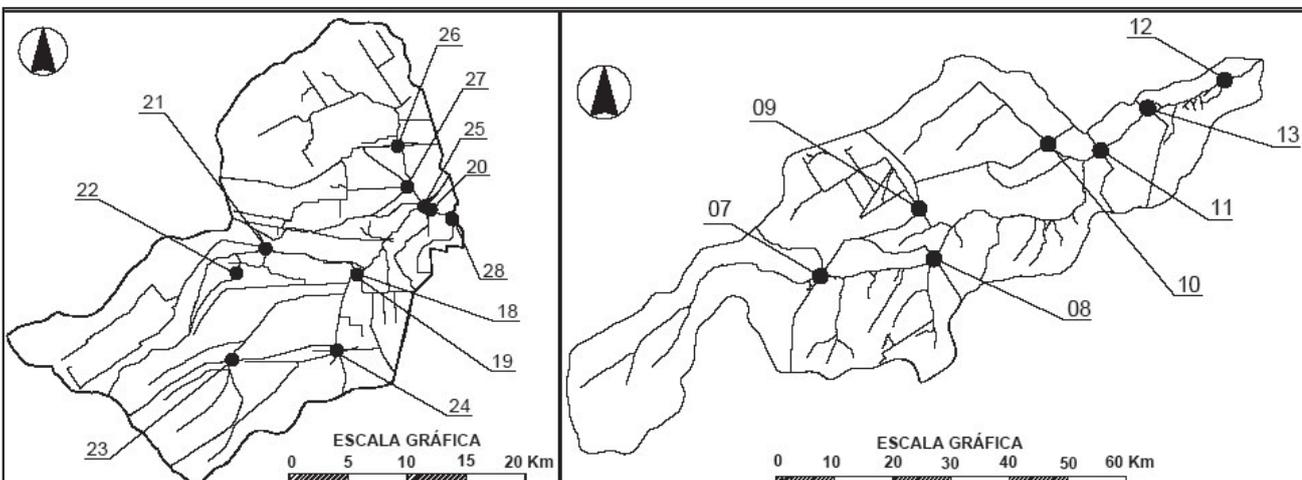


Figura 3. Estaciones limnimétricas, (izq) Ludueña y (der) Saladillo.

proporcional de cada pluviómetro) y (b) el nivel de agua en la sección estudiada registra un incremento mayor al 15% de la diferencia máxima entre nivel pico y nivel base de todos los eventos medidos en la sección. Se obtuvieron diferentes cantidades de eventos válidos para cada subcuena, entre 4 y 15 tormentas, con un valor medio de 10 tormentas por subcuena.

**Modelo de redes funcionales**

Los elementos componentes de una red funcional (RF), Figura 4, son (Castillo, 1988): a) una capa de unidades de

entrada, que contiene los datos de entrada; b) una capa de unidades de salida, es la última capa y contiene los datos de salida; c) una o varias capas de neuronas o unidades de cómputo, donde se evalúa un conjunto de valores de entrada provenientes de la capa anterior y produce un conjunto de valores de salida a la próxima capa; d) un conjunto de enlaces dirigidos, que conectan la capa de entrada a la primera capa de neuronas, neuronas de una capa a otras de la próxima capa, y la última capa de neuronas con la capa de salida. La dirección de la información se produce en una única dirección, desde la capa de entrada hacia la capa de salida.

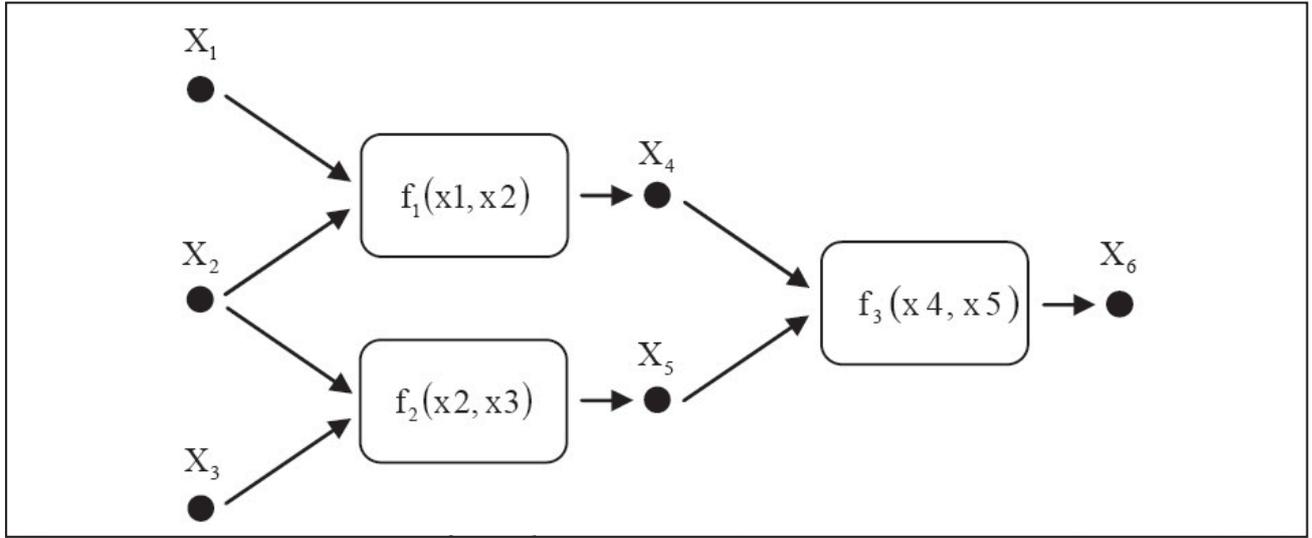


Figura 4. Esquema típico de una RF (Fuente: Bruen y Yang, 2005).

Se propone emplear un esquema de red funcional simple separable con dos variables de entrada x e y (precipitación acumulada cada 15 minutos y nivel para un tiempo t<sub>0</sub>) y una de salida z (nivel para diferentes tiempos t<sub>pi</sub>). Como su nombre lo indica, en este tipo de red se considera el efecto de cada una de las variables de entrada en forma separada. La relación matemática entre las variables x, y y z puede ser establecida según la ecuación (1) (Bruen y Yang, 2005):

$$z = F(x, y) = \sum_{i=1}^n f_i(x)g_i(y) \tag{1}$$

donde x e y son las variables de entrada, z es la variable de salida, f<sub>i</sub> y g<sub>i</sub> son las funciones neuronales a ser calculadas y n es el orden máximo de la función neuronal. El proceso de entrenamiento de la red consiste en obtener las funciones f y g a partir de los datos de entrada, siendo en la práctica equivalente al proceso de calibración de un modelo hidrológico convencional. Las funciones neuronales f y g pueden ser expresadas según la ecuación 2 (Bruen y Yang, 2005):

$$\hat{f}(x) = \sum_{j=1}^p a_j \varphi_j(x) \quad , \quad \hat{g}(y) = \sum_{j=p+1}^{p+q} a_j \varphi_{j-p}(y) \tag{2}$$

en que los coeficientes a<sub>j</sub> son los parámetros de las funciones neuronales φ<sub>j</sub> que serán aprendidos durante el proceso de entrenamiento de la red, y p y q son los órdenes de cada familia de funciones. El objetivo durante el entrenamiento es minimizar una función de error que contempla la diferencia entre el valor calculado por el modelo y el valor medido. La función objetivo FO usada es la suma de los errores cuadráticos. Para lograr una representación única de la red es necesario dar un valor inicial a alguna de las funciones neuronales. En este caso pueden utilizarse cualquiera de las dos condiciones iniciales: f(x<sub>0</sub>) = u o g(y<sub>0</sub>) = v. Este término se agrega a la función objetivo, quedando como se presenta en la ecuación 3 (Bruen y Yang, 2005):

$$FO = \sum_{i=1}^k \left[ z_i - \sum_{j=1}^p a_j \varphi_j(x_i) - \sum_{j=p+1}^{p+q} a_j \varphi_{j-p}(y_i) \right]^2 + c \left[ \sum_{j=1}^p a_j \varphi_j(x_0) - u \right] \tag{3}$$

siendo k la cantidad de datos de entrenamiento y c una constante. La resolución de la función objetivo FO es equivalente a resolver un conjunto de derivadas de FO respecto de los parámetros a<sub>j</sub> y del multiplicador c, obteniendo un sistema de p+q+1 ecuaciones lineales donde los coeficientes a calcular son los parámetros a<sub>j</sub> y la constante c. Para conocer con mayor detalle el desarrollo matemático del modelo se debe consultar a Bruen y Yang (2005).

Se adopta la utilización de tres familias funcionales: polinómica, exponencial y de Fourier; y además se plantea usar cuatro modificaciones de las mismas (tres exponenciales y una de Fourier) por lo que en definitiva se obtienen siete familias funcionales a ser estudiadas (Tabla 1).

**Tabla 1. Familias funcionales testeadas.**

Familia funcional	Términos considerados
1. polinómica	1, x, x <sup>2</sup> , ... x <sup>9</sup>
2. exponencial A	1, e <sup>x</sup> , e <sup>-x</sup> , e <sup>2x</sup> , e <sup>-2x</sup> , ... e <sup>5x</sup>
3. exponencial B	1, e <sup>x</sup> e <sup>-x</sup> , e <sup>2x</sup> e <sup>-2x</sup> , ... , e <sup>9x</sup> e <sup>-9x</sup>
4. exponencial C	1, e <sup>x</sup> , e <sup>2x</sup> , ... , e <sup>9x</sup>
5. exponencial D	1, e <sup>-x</sup> , e <sup>-2x</sup> , ... , e <sup>-9x</sup>
6. Fourier A	1, senx, cos x, sen2x, cos2x, ... , sen5x
7. Fourier B	1, senx cosx, sen2x cos2x, ... , sen9x cos9x

**Implementación del modelo**

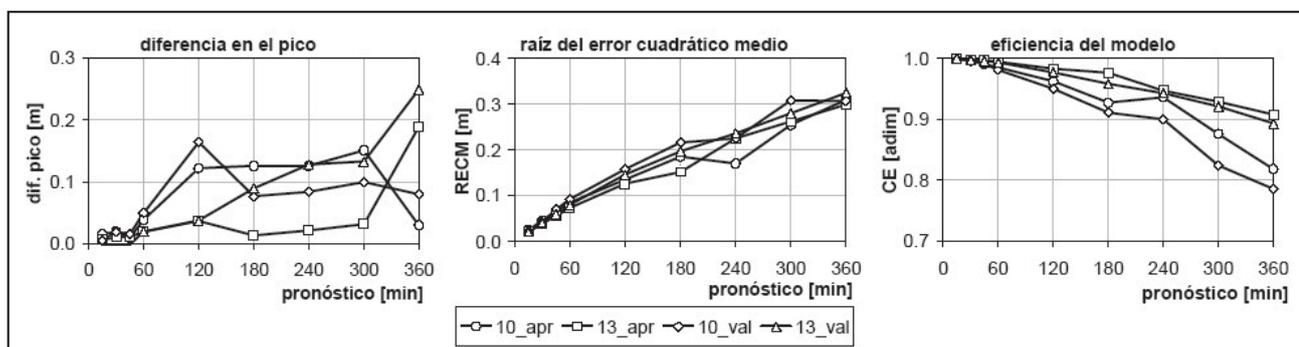
En este tipo de modelos los datos de entrada son de fundamental importancia (*Dawson y Wilby, 1998*), por esta razón se calculó para cada estación limnimétrica la totalidad de combinaciones de tormentas en función de los eventos válidos. Cada combinación se divide a su vez en dos grupos complementarios: uno para aprendizaje y otro para validación. Posteriormente se propone una restricción a la cantidad de muestras a emplear, consistente en descartar aquellas donde la cantidad de tormentas utilizadas en aprendizaje y en validación sea muy dispar. El criterio es quitar las muestras donde el número de tormentas para aprendizaje o validación es inferior al 50% de la cantidad de tormentas del grupo complementario; si tomamos

como ejemplo 10 tormentas se descartan las muestras que utilizan solamente 1, 2 o 3 tormentas en alguno de los grupos. Una vez generadas las muestras, según el limnómetro considerado, se aplicaron los siete modelos de redes funcionales. Se debe tener en cuenta que en cada uno de estos modelos de redes fueron considerados 9 grados de aproximación diferentes (Tabla 1); siendo planteados para nueve horizontes temporales diferentes: 15, 30 y 45 minutos y 1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas.

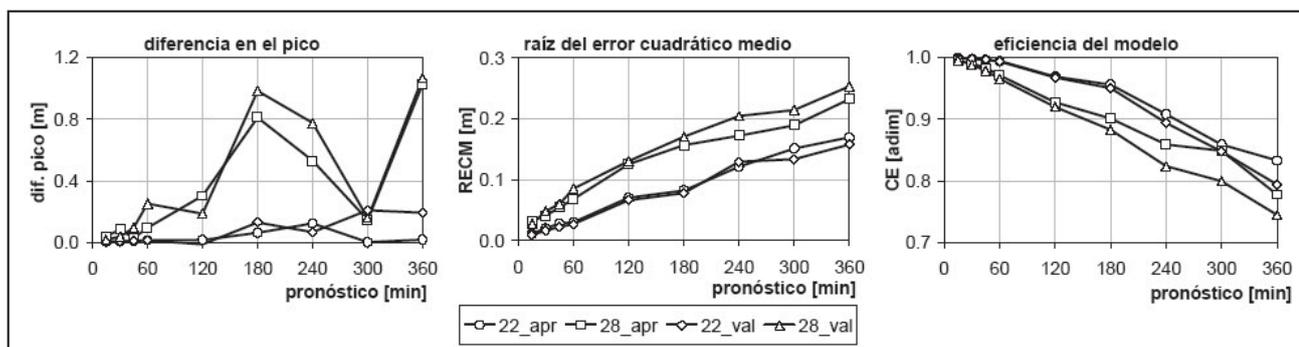
**RESULTADOS**

Debido a la elevada cantidad de muestras, los resultados fueron evaluados a través de diferentes estadísticos; en este sentido existe una falta de acuerdo entre los investigadores respecto a un criterio único para la evaluación de modelos. Por esta razón, se calcularon 12 estadísticos, entre ellos la diferencia máxima en el nivel pico [m], la raíz del error cuadrático medio [m], el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (que son los tres indicadores que se presentan a continuación), diferencias máximas y mínimas en el limnograma completo, diferentes coeficientes de correlación, desvío medio y los coeficientes a y b de la recta de regresión.

A continuación, se presentan algunos resultados correspondientes a dos sensores limnimétricos por cuenca, seleccionados por ser los que registraron mayor cantidad de tormentas. Para la cuenca Saladillo, se muestran los sensores 10 y 13, el primero con 11 tormentas y el segundo con 10 (Figura 5); mientras que para la cuenca Ludueña, se exhiben los sensores 22 y 28, ambos con 15 tormentas (Figura 6). En dichas figuras se representan en negro los estadísticos correspondientes a la etapa de aprendizaje y en azul a la de validación, en función del tiempo de pronóstico. Cada una de estas gráficas fue confeccionada con el mejor resultado producto de la aplicación de las siete familias funcionales con sus 9 grados de aproximación.



**Figura 5. Cuenca Saladillo, sensores 10 y 13: (izq) Dif\_P, (centro) RECM, (der) eficiencia NS.**



**Figura 6. Cuenca Ludueña, sensores 22 y 28: (izq) Dif\_P, (centro) RECM, (der) eficiencia NS.**

De la Figura 5 se observa que, en promedio, para el sensor 10 se obtiene una diferencia en el pico de +0,07 m tanto en aprendizaje como en validación; mientras que para el sensor 13 se tiene una diferencia en el pico de +0,04 m en aprendizaje y de +0,07 m en validación. Respecto a la raíz del error cuadrático medio se observan valores para aprendizaje y validación de 0,14 m y de 0,16 m para el sensor 10 y de 0,14 m y de 0,15 m para el sensor 13, respectivamente. En cuanto a la eficiencia del modelo NS los valores obtenidos para aprendizaje y validación fueron, para el sensor 10 de 0,94 y de 0,93 y para el sensor 13 de 0,97 y de 0,96, respectivamente.

Analizando la Figura 6 se verifica que en promedio, para el sensor 22 se obtiene una diferencia en el pico de +0,03 m en aprendizaje y de +0,07 m en validación; mientras que para el sensor 28 se observa una diferencia en el pico de +0,34 m en aprendizaje y de +0,40 m en validación. Respecto a la raíz del error cuadrático medio se tienen valores de 0,08 m para calibración y de 0,07 m para validación (sensor 22) y de 0,12 m para calibración y de 0,13 m para validación (sensor 28). En cuanto a la eficiencia del modelo NS, los resultados verificados fueron, para el sensor 22, 0,95 y 0,94 para aprendizaje y validación, respectivamente. Mientras que para el sensor 28 se obtuvieron valores de NS de 0,92 y de 0,90 para aprendizaje y validación, respectivamente. Los resultados citados anteriormente se encuentran consignados en la Tabla 2.

Si ahora se consideran los 4 sensores en forma conjunta, respecto de la evolución temporal del parámetro RECM (Figuras 5 y 6) puede observarse que, para tiempos de pronóstico de hasta 1 hora los valores se encuentran por debajo de 0,10 m, para tiempos de antecedencia de hasta 4 horas ascienden a 0,25 m y para 6 horas de antelación trepan hasta 0,32 m. De la misma forma, si ahora se estudia la variación del parámetro de eficiencia NS se verifica que, para tiempos de pronóstico de hasta 1 hora los valores se encuentran por arriba de 0,97, para tiempos de antecedencia de hasta 4 horas son mayores a 0,82 y para 6 horas de antelación los valores superan 0,75. Finalmente, si ahora se analiza la diferencia en el pico, se observa que hasta 3 horas de pronóstico se produce el aumento sostenido de la misma hasta llegar a un valor de 0,98 m, mientras que curiosamente para 4 y 5 horas de antecedencia se obtienen diferencias sustancialmente menores (0,78 m y 0,21 m respectivamente). Para 6 horas de pronóstico las diferencias ascienden a 1,07 m.

En las Figuras 7 y 8, se presentan los resultados en niveles pronosticados para dos sensores. La Figura 7 muestra los niveles para aprendizaje y validación del sensor 10 para tiempos de pronóstico de 1 hora en la parte superior y de 6 horas en la parte inferior asociados a la muestra 1787 (7 tormentas para aprendizaje y 4 para validación). Mientras que la Figura 8 exhibe los mismos horizontes de pronóstico para el sensor 28, asociados con la muestra 29040 (10 tormentas para aprendizaje y 5 para validación). Las líneas verticales negras separan las diferentes tormentas.

Tabla 2. Resumen de indicadores estadísticos medios según sensor.

Sensor	Diff_apr[m]	RECM_apr [m]	NS_apr [adim]	Diff_val[m]	RECM_val [m]	NS_val [adim]
10 (Saladillo)	0,07	0,14	0,94	0,07	0,16	0,93
13 (Saladillo)	0,04	0,14	0,97	0,07	0,15	0,96
22 (Ludueña)	0,03	0,08	0,95	0,07	0,07	0,94
28 (Ludueña)	0,34	0,12	0,92	0,40	0,13	0,90

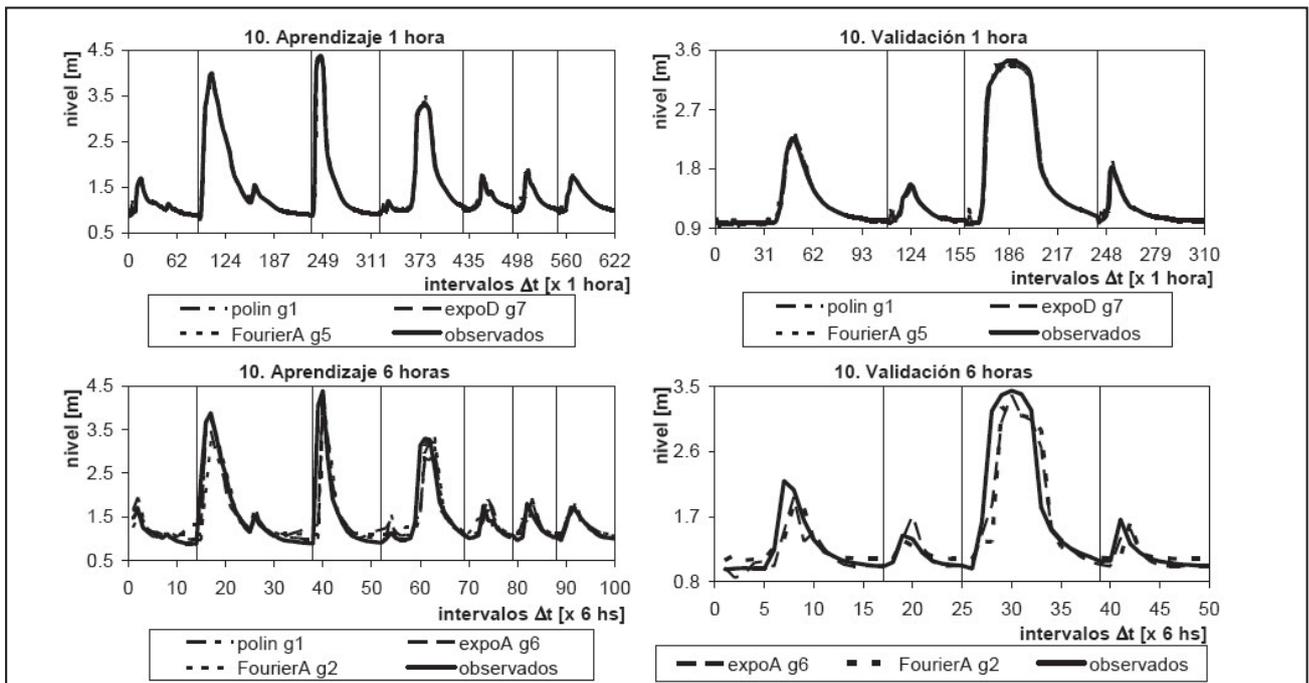


Figura 7. Cuenca Saladillo, sensor 10, muestra 1787: (izq) aprendizaje, (der) validación.

## CONCLUSIONES

Analizando los indicadores estadísticos presentados (Figuras 5 y 6 y Tabla 2) se verifica la tendencia general de que a medida que el horizonte temporal se incrementa, desmejoran los índices considerados. En el caso del parámetro RECM, se obtuvieron en promedio valores que fluctúan entre 0,03 m y 0,32 m; mientras que para la eficiencia NS, se verificaron en promedio valores que variaron entre 0,99 y 0,75; en tanto que respecto de la diferencia en el pico, se registraron valores entre 0,04 m y 1,07 m; para 15 minutos a 6 horas de tiempo de pronóstico respectivamente. Esto pone de manifiesto el hecho de que al ampliar el tiempo de pronóstico, aumentan las incertidumbres asociadas al proceso de transformación lluvia – escurrimiento superficial, con la consecuente desmejora de los pronósticos.

Contrastando las etapas de aprendizaje y de validación se observa que, en general, la mayoría de los estadísticos presentan resultados levemente mejores en la primera. Dado que los parámetros de la red son calculados a partir de los datos de entrada en la fase de aprendizaje, es lógico pensar que la red presentará un mejor comportamiento frente a dicho juego de datos de entrada antes que a un segundo juego de datos para el cual se deberá verificar su desempeño.

El empleo de medidas estructurales en conjunto con medidas no estructurales parece ser el método más eficaz en la lucha contra las inundaciones. Dentro de las segundas, el pronóstico de crecidas brinda una herramienta de ayuda en la toma de decisiones por parte de las autoridades.

La confiabilidad en el registro de datos es de vital importancia para el buen desempeño de los modelos analizados, ya que son altamente dependientes de los datos de entrada. Es importante tener una serie continua de datos para aumentar la robustez de los pronósticos, para lo cual se recomienda el seguimiento constante del funcionamiento de los sensores. Los modelos de caja negra no demandan gran variedad de datos para su puesta en funcionamiento; por lo que su aplicación resulta relativamente sencilla en otras cuencas, una vez programada la red funcional.

Aunque la cantidad de eventos registrados no es muy elevada, media de 10 tormentas por subcuenca, los resultados obtenidos son alentadores; evidenciando la capacidad de aprendizaje y reproducción de eventos de este tipo de modelo. En caso de incrementarse el número de eventos, su incorporación al modelo de pronóstico es sumamente sencilla dada la arquitectura planteada del software; permitiendo reajustar los parámetros del mismo.

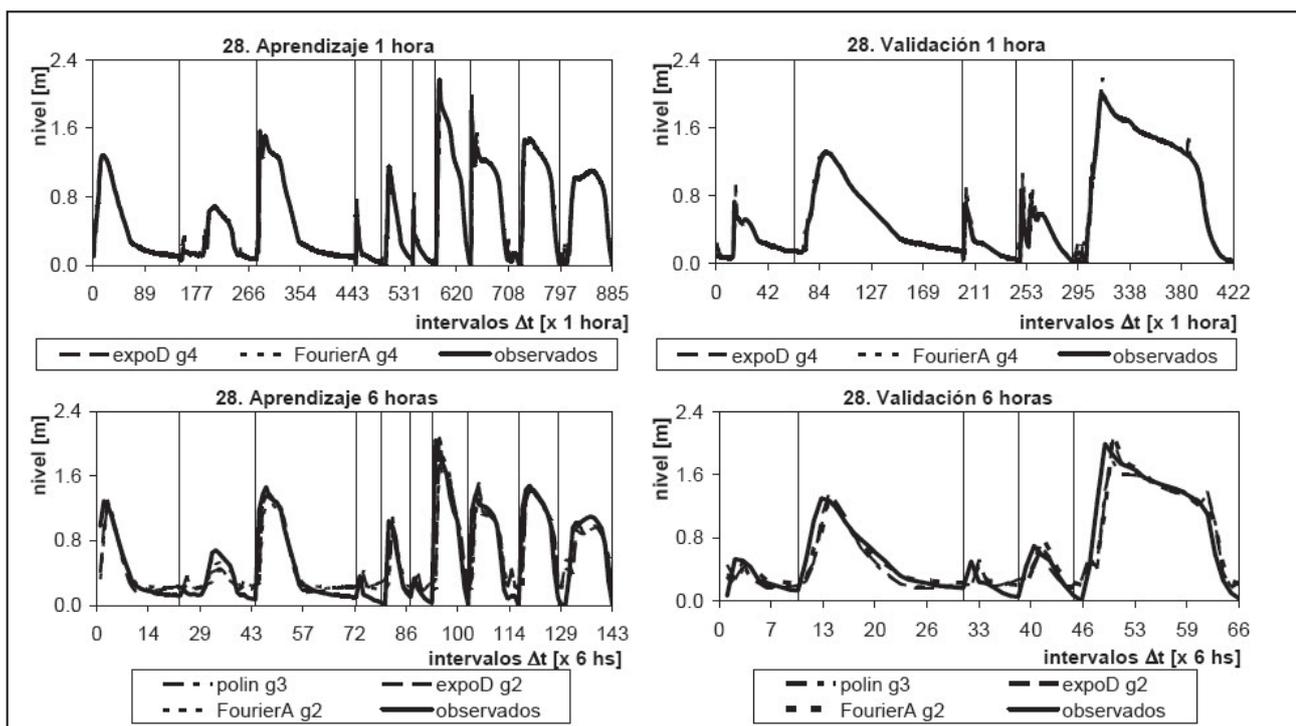


Figura 8. Cuenca Ludueña, sensor 28, muestra 29040: (izq) aprendizaje, (der) validación.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BERGA CASAFONT, L., 1990.

La problemática de las inundaciones. Actuaciones estructurales y no estructurales frente a las avenidas. *Revista de Obras Públicas*, diciembre 1990, p. 17-23.

BERGA CASAFONT, L., 1995.

Aplicación de los sistemas de previsión de avenidas. Experiencias y problemática. *Jornadas sobre el SAIH en la Gestión Hídrica*, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Ebro, Marzo de 1995.

- BRUEN, M. Y YANG, J., 2005.  
Functional networks in real-time flood forecasting - a novel application.  
*Advances in Water Resources*, 28: 899-909.
- CAMPOLO, M., ANDREUSSI, P. Y SOLDATI, A., 1999.  
River flood forecasting with a neural network model.  
*Water Resources Research*, 35(4):1191-1197.
- CASTILLO, E., 1998.  
Functional Networks.  
*Neural Processing Letters*, 7:151-159.
- CASTILLO, E. Y GUTIÉRREZ, J., 1998.  
Nonlinear time series modeling and prediction using functional networks.  
*Extracting information masked by chaos. Physics Letters A*, 244:71-84.
- DAWSON C. Y WILBY, R., 1998.  
An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling.  
*Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 43(1):47-66.
- DUEÑAS MOLINA, C., 1995.  
El SAIH y su aplicación a la Protección Civil. Jornadas sobre el SAIH en la Gestión Hídrica,  
*Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Ebro, Marzo de 1995.*
- GRUNTFEST, E., 1995.  
Long term social and economic impacts of extreme floods.  
*US-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods. Perugia (Italy). November 1995.*
- HSU, K., GUPTA, V. Y SOROOSHIAN, S., 1995.  
Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process.  
*Water Resources Research*, 31:2517-2530.
- INTA, 1983. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA.  
Cartas de Suelos de la República Argentina, Provincia de Santa Fe.  
*Cartas varias.*
- LEKKAS, D., MAXEY, R. Y WHEATER, H., 2004.  
Intercomparison of forecasting methods for flood warning in the river cam catchment.  
*Global Nest: the International Journal*, 5(2):89-97.
- MAIER, H. Y DANDY, G., 2000.  
Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications.  
*Environmental Modelling & Software*, 15:101-124.
- OGDEN, F., SHARIF, H., SENARATH, S., SMITH, J., BAECK, M. Y RICHARDSON, J., 2000.  
Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997.  
*Journal of Hydrology*, 228:82-100.
- RICCARDI, G., SCUDERI, C. Y STENTA, H., 2002.  
Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina.  
*XIX Congreso Nacional del Agua, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.*
- RICCARDI, G., ZIMMERMANN, E., BASILE, P., MANCINELLI, A., SCUDERI, C., RENTERÍA J. Y GARCÍA P., 2008.  
Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo.  
*Informes Técnicos. Convenio entre el Ministerio del Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de Santa Fe y la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de Rosario.*
- SCUDERI, C., RICCARDI, G. Y ZIMMERMANN, E., 2009.  
Sistema de alerta a tiempo real en la zona del Gran Rosario. Resultados Preliminares.  
*XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut, nov. de 2009, 11 p.*
- SCUDERI, C., RICCARDI, G. Y ZIMMERMANN, E., 2011.  
Redes funcionales aplicadas al pronóstico de niveles para un curso de llanura del Gran Rosario.  
*XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, 28 p.*
- SCUDERI, C., RICCARDI, G., Y ZIMMERMANN, E., 2012.  
Aplicación de Redes Funcionales al pronóstico de niveles en dos cursos de llanura del Gran Rosario.  
*1er. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Ezeiza, Buenos Aires, Junio 2012, 15 p.*
- SHRESTHA, R., THEOBALD, S. Y NESTMANN, F., 2005.  
Simulation of flood flow in river system using artificial neural networks.  
*Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4):313-321.

- THIRUMALAI AH, K. Y DEO, M. 1998.  
Real-Time Flood Forecasting Using Neural Networks.  
*Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13:101–111.
- TUCCI, C. Y BERTONI, C., 2003.  
Inundações Urbanas na América do Sul.  
*Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, 150 p.



## Nota Técnica

# Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

## Stabilization of loess subgrades using scraps from ornamental stones of a sawmill

Cruz, María P. ✉ - Martin Schmädke, Italo F.<sup>1</sup> - Arnaudo, Carlos E.<sup>1</sup> - Higa, José J.<sup>1</sup>

Recibido: 24 de octubre de 2014 • Aceptado: 26 de febrero de 2015

### Resumen

*El trabajo consiste en determinar el porcentaje óptimo de la dosificación del descarte proveniente de los telares de los aserraderos de rocas metamórficas e ígneas ornamentales cordobesas, mezclado con, los sedimentos inorgánicos de la planicie loésica erodable de la región mediterránea de la Argentina. Dicha dosificación, a punta a estabilizar química y mecánicamente, las subrasantes no pavimentadas en caminos terciarios con insuficiente bombeo transversal o drenaje lateral de cunetas. Generalmente, son vías de uso estacionales con un tránsito netamente agropecuario y, por ende presentan un escaso a nulo mantenimiento de la superficie de rodamiento; manifestandose, como consecuencia, una disminución paulatina de la resistencia al corte no drenada (Su) como, de la presión soporte (CBR<sub>2,5mm</sub>) en cada intercalación anual de precipitaciones y sequías. Por ende, la estabilización del loess erodable con el porcentaje óptimo del descarte a determinar, logra garantizar un incremento de los valores de Su y CBR<sub>2,5mm</sub> en las subrasantes no pavimentadas estudiadas; siendo así optimizado el manteamiento de la superficie de rodamiento en al menos un periodo de precipitaciones y sequías.*

*En general los ensayos geotécnicos realizados en el laboratorio de suelos y materiales de Universidad Católica de Córdoba (UCC) que garantizan dichos objetivos, son: contenido de humedad, lavado tamiz Nº 200, ensayos granulométricos, límites de Atterberg, doble hidrómetro, superficie específica, proctor estándar, compresión simple y California Bearing Ratio.*

**Palabras Clave:** loess, subrasante, estabilización, descarte de rocas.

### Abstract

*The work consists to determine the optimum dosage rate of the mix composed by the discarding from the looms of metamorphic and igneous ornamental rocks of the Córdoba mountains and the inorganic erodable loess sediments of this mediterranean region of Argentina. Such dosage stabilizes chemically and mechanically the natural subgrade of tertiary road with insufficient lateral transverse pumping. Generally, these roads are stationary use with agricultural traffic and therefore presenting low maintenance of the bearing surface at each annual rainfall period as droughts gradual; manifesting as a result, reduction in shear strength. undrained (Su) as pressure*

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba.

✉ mpcruz@ucc.edu.ar

support (CBR<sub>2,5mm</sub>). The stabilization of erodible loess with the optimal percentage of discarding of scrap stone from ornamental rock ensures an increase in the values of Su and CBR<sub>2,5mm</sub> of the natural subgrade of tertiary road.

In general the geotechnical tests performed in the laboratory of materials and soil Catholic University of Córdoba (UCC) are: moisture content, washed sieve N° 200, grain size determination, Atterberg limits, double hydrometer, specific surface area, standard proctor, simple compression and California Bearing Ratio.

**Keywords:** chemical - mechanic stabilization, loess, scrap of ornamental stone, subgrade.

## INTRODUCCIÓN

La red vial de caminos de tierra según Dirección Provincial de Vialidad (DPV), es de 55.900 km en la provincia de Córdoba (Argentina) a septiembre del 2014; constituyendo el 3% de la red vial primaria, el 18% de la red secundaria y el 79% de la red terciaria. Dichos caminos sin pavimentar implican que las capas de rodamiento vehicular la conforman directamente los suelos naturales de la región sin el sustrato orgánico, o sea la subrasante en un paquete estructural vial.

Las subrasantes sin pavimentar del centro-este de la provincia de Córdoba, yacen sobre una planicie de sedimentos finos del tipo loésicos - A4 o A6 según American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO.); manifestando, un variado comportamiento tenso-deformacional ante aumentos del contenido de humedad natural, grado de saturación, tensión de corte, tensión normal media y presión de poros (Zur y Wiseman, 1973). En esta región cuyo clima, tiene características de templado a semiárido y, el ciclo de precipitaciones importantes se manifiesta en la época de primavera-verano; se produce una gran acumulación del agua superficial sobre la misma subrasante y por ende, aparición de baches hasta carcavamientos (o sea subsidencias longitudinales) debido al insuficiente bombeo transversal como al drenaje lateral. Los caminos no pavimentados de subrasantes semisaturadas, quedan casi intransitables para el paso de vehículos pesados con o sin carga, y en muchos casos incluso los livianos. Justamente en esta época del año, es cuando existe un alto flujo vehicular con fines agropecuarios que demanda de un óptimo ciclo productivo de siembra y cosecha; siendo esto inviable en algunos consorcios camineros de la provincia Cordobesa. En contraposición, en la etapa de otoño-invierno (sequía), cuando se deben hacer los mantenimientos mínimos requeridos o sea escarificado con perfilado de cunetas, eliminación de huellas/baches o perfilado de bombeo transversal, no existe el tiempo operativo suficiente para dar respuesta satisfactoria a las demandas de cada consorcio. Por tal motivo, la sequedad ambiental en estos sustratos semisaturados (humedad natural ronda entre 12% y 15%), genera una alta presencia de polvo ambiental al rodar cualquier tipo de vehículo; siendo técnicamente, aminorado su peso unitario seco (1,1 tn/m<sup>3</sup> a 1,2 tn/m<sup>3</sup>) y agotada la resistencia al corte no drenado de estos sedimentos loésicos, o sea aquellos cuyo diámetro de partículas ronda entre 0,060 mm hasta 0,002 mm, de acuerdo con Rinaldi et al. (2011). Cabe recordar que los suelos de la planicie loésica Cordobesa que es objeto de estudio, está ligada a una formación geológica de sedimentos netamente eólicos; siendo muy sensible a subsidencias intergranular ante la presencia de cambio del contenido de humedad (incluido a bajos gradientes hidráulicos).

Por otro lado, el polvo del descarte de piedras ornamentales es un subproducto generado luego de labrar mecánicamente en aserraderos mesadas y pisos (principalmente) desde bloques de rocas cuyo Rock Mass Rating (RMR) varía de 81 a 100 (o sea muy buena calidad) según la escala de Bieniawski del año 1989. Las dimensiones comerciales del bloque en bruto, son de 2 metros por 2 metros (aproximadamente). Dicho polvo responde a un predominio de granos finos con una alta presencia de minerales propios de las rocas ígneas como de metamórficas de las sierras Cordobesas (o sea cuarzo, mica y feldspatos). En general, todos los aserraderos locales tienen casi el mismo proceso de manufacturación de bloque en bruto o sea: aserrar el bloque en telares generando planchuelas delgadas; fraccionar la misma según la geometría de venta final, y por último, pulir/lustrar las caras vistas; siendo generado todos el polvo de descarte sin reutilización en la línea manufacturación hasta el momento.

## METODOLOGÍA Y ANALISIS

La caracterización geotécnicamente de los sedimentos naturales erodables (loess) a estabilizar con el polvo del descarte de rocas ornamentales, implicó la planificación de dos etapas de ensayos en el laboratorio de suelos y materiales de la UCC.

En la primera etapa, se ejecutaron mayoritariamente los ensayos de identificación del loess erodables a estabilizar y luego, minoritariamente en el polvo del descarte de rocas ornamentales; siendo los ensayos realizados: contenido de humedad, lavado tamiz N° 200, ensayos granulométricos por tamices como por sedimentación, límites de Atterberg, doble hidrómetro, superficie específica, proctor estándar y California Bearing Ratio con medición de hinchamiento

En la segunda etapa, se realizó el estudio de la dosificación de mezclas con una baja relación agua/descarte para determinar esta relación óptima; siendo, los porcentajes del descarte estudiados del 10%, 20% y 50% (porcentajes en peso). Complementariamente a esta última etapa, se comparó y analizó para cada dosificación, los resultados de los ensayos de los límites de Atterberg (índice de plasticidad, IP), doble hidrómetro (es ó no es erodable), CBR (presión CBR<sub>2,5mm</sub>) y compresión simple (Su) obtenidos desde probetas remoldeadas compactadas a la humedad óptima ( $\omega_{opt}$ ) como densidad seca máxima ( $\gamma_{ssmax}$ ) de cada ensayo proctor estándar realizado previamente.

En la Tabla 1, se resumen las principales características geotécnicas de los sedimentos naturales erodables (loess) estudiados en la zona del gran Córdoba, del polvo de descarte de rocas ornamentales y por ende, los resultados de las respectivas mezclas al 10%, 20% como 50% (porcentajes en peso) del polvo del descarte con el loess.

Tabla 1. Principales características del suelo, descarte y mezclas analizadas.

Nombre del ensayo	PARÁMETRO RESULTANTE (unidades)	Estabilización química-mecánica vial de:		Mezcla Suelo natural + "x"% descarte (porcentajes en peso); siendo x:		
		Suelo natural	Descarte de piedras ornamentales	10%	20%	50%
	AASHTO :	A4 a A6	-			
Límites de Atterberg	$\omega_{LL}$ (%)	34,6	24,2	24,6	26,4	21,8
	$\omega_{LP}$ (%)	22,4	21,3	21,7	23,2	15,4
	IP (%)	12,2	2,9	2,9	3,2	6,4
Doble hidrómetro	Erodable	Si	No	No	No	No
Gravedad específica	Gs	2,86	2,70	NE	NE	NE
Proctor estándar	$\omega$ óptima (%)	16,3	NE	17,5	17	20
	$\gamma_{ss}$ máx (kg/m <sup>3</sup> )	1700	NE	1680	1680	1570
California Bearing Ratio	CBR <sub>2,5mm</sub> (MPa)	1,00	NE	1,22	0,33**	0,77
Compresión simple*	$S_u$ (MPa)	0,023	NE	0,118	0,116	0,115
	$E_{rotura}$ (MPa)	8,3	NE	9,0	7,4	3,5

Nota

NE: No Ensayado.

\*: Ensayo de compresión simple en probetas saturadas curadas 28 días desde su elaboración.

\*\* : Ensayo inconsistente y descartado.

## CONCLUSIONES

- El porcentaje óptimo del descarte proveniente de los telares de los aserraderos de rocas metamórficas e ígneas ornamentales cordobesas, mezclado con, los sedimentos inorgánicos de la planicie loésicas erodable, es de un 10% (porcentaje en peso).
- La mezcla óptima del loess erodable con el polvo del descarte de los telares de aserraderos de rocas ornamentales, garantiza un aumento de la resistencia al corte no

drenado del 500% como de la presión CBR<sub>2,5mm</sub> ante hinchamientos probables del 22%. Se comprobó que se elimina todo potencial de erodabilidad.

- Por ende, las principales consecuencias viales de utilizar dicha mezcla en subrasantes no pavimentadas erodables son: "eliminar" la vulnerabilidad a la erodabilidad, "eliminar" la cantidad de polvo ambiental como baches/acarcavamientos en la zona de ancho de camino y, "reducir" los costos de mantenimiento/rehabilitación anual.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

INGLES, O. G. Y METCALF, J. B., 1972.

Soil stabilization: principles and practice,  
Vol. VII, pp. 374. Butterworths, Sydney.

RINALDI, V. A.; CRUZ, M. P.; CAPDEVILA, J. A. Y CLARIA J. J., 2011.

Origen y caracterización de la estructuración de un loess pampeano.

Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. ISSN 1936-1483 (on line).

Disponible en <<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/336/347>>, último acceso 21 de octubre de 2014.

ZUR, A. Y WISEMAN, G., 1973.

A Study of Collapse Phenomena of an Undisturbed Loess.

8° International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2.2, Session 4/43, pp.265-268. Moscú, URSS.





# Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

## Construction of interdisciplinary and cross links from the social sciences for the treatment of water risk. City of Santa Fe

Córdoba, Anabella <sup>1</sup> ✉ - Chialvo, Patricia <sup>1</sup> - Morresi, María del Valle <sup>2</sup>

Recibido: 16 de diciembre de 2014 • Aceptado: 27 de febrero de 2015

### Resumen

*Esta ponencia reflexiona sobre la experiencia que se está desarrollando en la Academia, al articularse las prácticas de campo o territorio de la Licenciatura en Trabajo Social (FCJS) y el Proyecto de Extensión de Interés Social de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), ambas dependientes de la Universidad Nacional del Litoral (UNL). En este marco, nos posicionamos desde el espacio público de la educación superior como actores que posibiliten generar capacidades para vincularnos y consustanciarnos profundamente con el desarrollo nacional y local, aportando a mejorar las políticas del Estado.*

*Las acciones están dirigidas principalmente a establecimientos escolares, con los que se reflexiona sobre cuestiones socialmente relevantes como son la constitución del hábitat como contenidos de las prácticas de formación, extensión e investigación.*

*En este sentido damos cuenta de los resultados logrados en proceso, en lo que refiere a: vincular las Ciencias Hídricas con las Ciencias Sociales, (medidas no estructurales) en un territorio signado por el alto riesgo hídrico y socio-ambiental, procurando la no fragmentación del conocimiento, en el marco de una complejidad e incertidumbre nunca antes vivida, realizando aportes sobre la convivencia con el riesgo en la ciudad de Santa Fe.*

**Palabras clave:** Ciencias Sociales - Duras, Interdisciplina, hábitat, riesgo.

### Abstract

*This paper will attempt to reflect on the experience that is being developed at the Academy, to articulate the practice field or territory of the Bachelor of Social Work (FCJS) and Extension Project Social Interests of the Faculty of Engineering and Water Sciences (FICH), both dependent of the National University of the Litoral (UNL).*

1. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. Universidad Nacional del Litoral (UNL). Mariano Comas 2678. (3000) Santa Fe, Argentina.

✉ anabellacordoba2003@gmail.com

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

*In this framework, we are positioned from the public space of higher education as stakeholders that can build capacity to bond with and deeply linking national and local development, contributing to improve state policies.*

*The actions are aimed primarily at schools with which we reflect on socially relevant issues such as habitat creation as contained in training practice, research and extension.*

*In this sense, we will try to account for the results achieved in the process, as regards: linking Water Sciences to Social Sciences, (non-structural measures) in a territory characterized by high water risk and socio- environmental, trying the no fragmentation of knowledge, in the context of complexity and uncertainty never before experienced, making contributions on living with the risk in the city of Santa Fe*

**Keywords: Social Sciences - Duras, Interdisciplinarity, habitat, risk.**

## INTRODUCCIÓN

En un contexto de post modernidad, los actores sociales, académicos, institucionales en sus diversos niveles y ámbitos de actuación se encuentran interpelados ante la necesidad de construir estrategias de gestión asociativas en escenarios de gran incertidumbre, complejidad y dinamismo, signada por la conflictividad creciente en el territorio donde nos anclamos para desarrollar nuestra materialidad física y lo relacional simbólico.

En este sentido, al analizar nuestro anclaje en la Academia, nos situamos en un escenario de profundos cambios- a nivel Argentino y Latinoamericano- en sus estructuras sociopolítica-económica, cultural, social y relacional.

En la dimensión educativa universitaria, en este caso, es preciso hacer explícito el posicionamiento ético político desde donde pretendemos construir dado que, en su historia y en la contemporaneidad ha estado y está comprometida con la sociedad de pertenencia, a pesar de las profundas transformaciones que se han suscitado en los últimos treinta años.

Las mismas han impactado en la universidad generando diversos procesos de cambio en "... el sistema básico de creencias, de principios, de visiones generales sobre la realidad y sobre el conocimiento, que guían, condicionan, potencian el trabajo de los investigadores, de los intelectuales, de los políticos y de los prácticos, se ha subvertido de forma tan radical que no solo afecta al problema de la elección de métodos de producción, difusión del conocimiento, sino especialmente, y de forma clara, a la misma concepción del conocimiento (epistemología) y a la propia consideración de la realidad (ontología)". (Córdoba, 2010: 2)

El avance vertiginoso, pero también la rápida obsolescencia del conocimiento, la heterogeneidad del sujeto de aprendizaje, la incorporación de nuevas tecnologías de la información y la comunicación, son factores que definen e inciden en nuestro escenario. El mismo, se torna más complejo cuando analizamos los interjuegos de los actores en los espacios institucionales donde interjuegan modos de pensar, conocer y concebir la realidad como trama material y simbólica, modos de encuentro con la alteridad, de compromiso efectivo con las problemáticas sociales y de implicación en juegos de poder inherentes a las situaciones y relaciones que se enmarcan en lo público estatal fuertemente vinculadas a la identidad y autoridad construidas en trayectoria histórica.

Reconociendo la historicidad y singularidad de los procesos educativos enmarcados en las diversas Ciencias, no podemos ignorar que las Ciencias duras han tenido tránsitos diferentes a las Ciencias Sociales. Sin embargo, en los últimos

20 años este panorama ha cambiado de una manera concomitante con una convergencia interdisciplinaria (la segunda cibernética, la epistemología evolutiva, la termodinámica irreversible, las ciencias cognitivas, la neurociencia y el neodarwinismo entre otras), emergiendo una perspectiva de base totalmente diferente: la de las ciencias de la complejidad.

Tal como expresa el investigador *Carlos Maldonado (1999)*, retomado por *Córdoba (2010)*, existen tres líneas de trabajo y comprensión del tema:

- a) la complejidad como ciencia (el estudio de la dinámica no lineal en diversos sistemas concretos);
- b) la complejidad como método de pensamiento (la propuesta de un método de pensamiento que supere las dicotomías de los enfoques disciplinarios del saber y que consiste básicamente en el aprendizaje del pensamiento relacional);
- c) la complejidad como cosmovisión (la elaboración de una nueva mirada al mundo y al conocimiento que supere el reduccionismo a partir de las consideraciones holistas emergentes del pensamiento sistémico).

Son tres líneas de trabajo que se complementan y entrecruzan. De hecho, la complejidad como investigación de la dinámica no lineal está en la base del resto, pues constituye el sustento científico de las elaboraciones metodológicas y cosmovisivas"

La producción de prácticas académicas teniendo como principio ontológico la complejidad exige incorporar la interdisciplinaria para comprender estos procesos educativos como una praxis con sentido e interés emancipador y transformativo de los sujetos, lo que supone un movimiento dialéctico. Por ello se propicia la Inter - actuación permanentemente entre disciplinas, desde un programa amplio que le permita conocer, relacionar las diferentes lecturas del objeto de estudio, del sitio de trabajo, del contexto, etc.

Es de destacar que el prefijo inter hace alusión a relaciones recíprocas, actividades de cooperación, interdependencia, intercambio e interpenetración. De este modo podemos comprender que las referencias a las actividades inter o transdisciplinarias sugieren que son dinámicas interactivas que tienen como consecuencia una transformación recíproca de las disciplinas relacionadas con el campo/sujeto/objeto/ contexto determinado.

En este sentido Enrique Del Percio incorpora otro concepto: "la indisciplina como una aplicación de la transdisciplina a las ciencias sociales, tomando el prefijo in en un triple sentido: como "entrar" desde una disciplina en otra, como

“poner” otra disciplina en aquella desde la que se parte, y como negación de los paradigmas de cada disciplina cuando ello fue indispensable” “...palabra que connota una cierta disconformidad, una rebeldía frente al estado de cosas; es decir, hace referencia a esa cuestión del poder y alude a una suerte de resistencia frente a las visiones dominantes de la ciencia”. (Del Percio, 2009)

Desde esta perspectiva la interdisciplina es considerada un camino para no trabajar fragmentadamente y poder brindar soluciones integrales a las problemáticas planteadas, incorporando dinámicamente la mirada y visión del otro involucrado: estudiante, organización social, organización de producción pública, etc

Actualmente podemos afirmar que estamos construyendo un vínculo dinámico entre las "ciencias duras" y las ciencias sociales (como la psicología, la psicopatología, la sociología, la antropología, el Trabajo Social, comunicación social), situación impensada en el marco del proyecto moderno, Humberto Maturana expresa que las Ciencias Sociales tienen un atraso con relación a las primeras dado que no han desarrollado suficientemente los aspectos epistemológicos. Este ha puesto mucho énfasis en el lenguaje para la construcción de la experiencia relacional humana y el involucramiento del conocimiento en el ser desde la totalidad, lo cual desafía la dualidad tradicional entre mente y cuerpo históricamente estudiados por separado (lo biológico versus lo cultural, social, económico, político, etc).

Esta ponencia realiza algunas reflexiones fundamentadas desde marcos teóricos referenciales, basadas en la experiencia que venimos realizando, como así también intentar abrir nuevos e incipientes caminos teóricos metodológicos, instrumentales en los procesos de gestión académica, que permitan un mayor involucramiento de todos los actores institucionales y sociales, para la apropiación de saberes, conocimientos y tecnologías con un alto contenido participativo; y en definitiva un acercamiento e interrelación entre ambas ciencias: duras y sociales.

### CONCEPTOS TEÓRICOS ABORDADOS Y CONTEXTUALIZACIÓN

La educación ha sido entendida en su más amplia acepción como la transmisión de la cultura de una a otra generación, como el espacio en que el sujeto toma contacto con la experiencia humana y se la apropia, es decir, aprende. Cada sujeto va haciendo suya su cultura a partir de procesos de aprendizaje que le permiten el dominio progresivo de los objetos, de modos de pensar, sentir y actuar vigentes en cada contexto histórico.

Desde esta perspectiva el entorno socio-cultural no es una simple condición que favorece u obstaculiza el aprendizaje y desarrollo del sujeto, sino que es una parte intrínseca del propio proceso, define su esencia. Por lo dicho educación, aprendizaje y desarrollo humano son procesos que poseen una relativa singularidad, pero que se integran al mismo tiempo conformando una unidad dialéctica. (Córdoba, 2010: 2)

Es por ello que la Universidad se convierte en el contexto por excelencia para estimular el desarrollo integral del estudiante, en tanto se logren “... abordajes desde visiones totalizadoras capaces de alcanzar interpretaciones más profundas y anticipaciones más pertinentes, a partir del consenso logrado afirmar que “... las limitaciones personales y profesionales de la especialización solo pueden compensarse con las cualidades del trabajo en equipo de los

*practicantes de diversas disciplinas*”. Esto es posible a través de prácticas de enseñanza y aprendizaje interdisciplinarias, que al decir de Carballada (2002) “... se definen como la confrontación en el diálogo de distintas visiones de mundo traducidas en conocimiento”.

En este sentido, el contexto físico, social y cultural de nuestra Universidad es la ciudad de Santa Fe, territorio de llanura asentado en el punto de convergencia de dos ríos: Paraná y Salado, que en diversas oportunidades han intentado volver a su cauce natural y que han sido objeto de intervenciones antrópicas desde inicios del siglo XX, lo cual incide negativamente cuando se presentan fenómenos hidrometeorológicos que amenazan a la sociedad.

### GÉNESIS DEL CONCEPTO RIESGO

La idea de riesgo surge a partir de navegar en aguas desconocidas, concepto definido por los exploradores occidentales en el siglo XVI y XVII; referenciada siglos más tarde a las diferentes situaciones de incertidumbre ocurridas posteriormente.

El riesgo fue asociado a la idea de seguro como contingencia imprevista, por ejemplo: los primeros seguros eran para quienes realizaban el tráfico marítimo y luego las leyes Isabelinas en Inglaterra crean para los pobres un sistema de gestión de riesgo, en el marco de la Revolución Industrial, con el sentido de mitigar a su máxima expresión el mismo.

Con la crisis del proyecto moderno y la transformación de las sociedades, el riesgo se constituye en un efecto no deseado del desarrollo industrial que entra en crisis en la década del 70 y se agudiza en las últimas décadas. Según Giddens (1990), estamos atravesando un período de transición histórica, al respecto dice que nuestra época nació bajo el impacto de la ciencia, la tecnología y el pensamiento racional vigente desde el siglo XVII y XVIII. La cultura industrial occidental fue forjada por la ilustración en donde el mundo- por el desarrollo de la ciencia y la tecnología- sería más ordenado, estable, bajo el dominio de la racionalidad técnica calcularía el beneficio y la pérdida en un proceso continuo. Desde este planteo es entendible que las Ciencias Naturales e Ingenieriles fueran quienes realizaran avanzados desarrollos en este sentido, posteriormente se hacen eco las Ciencias Sociales, es decir se abre el discurso a los retos y desafíos de las crisis ecológicas, medioambientales, sociales, económicas, políticas, etc.

Sin embargo, los efectos contrarios producidos por estos procesos y el cambio climático global han generado un nuevo fenómeno de riesgos, los cuales no son solo fenómenos naturales, sino antrópicos que nos afectan a todos y nos obligan a reestructurar nuestros modos de vivir (sexualidad, familia, matrimonio) y de habitar, en la medida que pensamos en términos de riesgo estas múltiples relaciones.

Dice Beck (1993), que existen dos tipos de riesgo: a) externo que se experimenta a partir de las sujeciones de la tradición o de la naturaleza y b) manufacturado es decir, el riesgo es creado por el impacto mismo de nuestro conocimiento creciente sobre el mundo, ej. riesgos medioambientales vinculados al calentamiento global, hambruna, la pobreza, los producidos por la extensión de la informalidad de la economía, flexibilización del trabajo, desregulación legal de sectores económicos, relaciones laborales, deslegitimidad del Estado, crecimiento del desempleo y subempleo, etc.

El concepto de riesgo y sociedad de riesgo combina lo que en otros tiempos era naturalmente excluyente, sociedad y naturaleza, Ciencias Sociales y Ciencias de la Naturaleza, construcción discursiva del riesgo y materialidad de las amenazas. Existe simultáneamente la inmaterialidad de las definiciones mediadas del riesgo y la materialidad del riesgo en tanto fabricada por expertos e industrias y sujetos sociales con derechos vulnerados y fragilizados en su inserción laboral y relacional.

Las múltiples implicaciones señaladas requieren, por la complejidad de la cuestión, del análisis de enfoques interdisciplinarios e intersectoriales en donde las áreas de intervención y acción política cobran importancia, exigiendo una apertura del proceso de decisión, no solo del Estado sino de las corporaciones privadas, de las ciencias y de la sociedad civil.

### Diversas perspectivas sobre el riesgo

La problemática del riesgo se ha discutido teóricamente en dos niveles: a) se analiza las transformaciones recientes de la modernidad a través del concepto de riesgo y b) un enfoque específico que analiza las situaciones concretas de riesgo en el marco de las sociedades modernas.

Académicos contemporáneos plantean la relevancia que adquiere el concepto referido para comprender las transformaciones que están ocurriendo, tanto el riesgo como la incertidumbre se presentan en la fase actual de la post modernidad como componentes permanentes en las relaciones sociales que ese establecen en campos diversos, siendo estas más contingentes e inestables.

El segundo enfoque se basa en tres tipos dominantes para analizar las situaciones específicas de riesgo: 1) de caracteres cuantitativos centrados en el estudio de la racionalidad de los actores, 2) institucionales que aluden a los procesos de decisión y 3) las centradas en las relaciones laborales en la industria.

Al respecto *Walter y Pucci (2007)* plantean que el primer enfoque corre el riesgo de caer en posturas subjetivas en relación a los hechos; focalizar solo en el accidente dejando de lado el análisis de los procesos en el largo plazo. Que el segundo si bien se interesa por el sistema de actores no tiene en cuenta la población afectada por una parte y por otra, deja de lado el estudio de los procesos internos a través de los cuales una institución define su posición, construye su legitimidad y negocia con los otros actores presentes en el escenario de intervención; la misma crítica tiene el tercer enfoque.

Estos autores han demostrado la heterogeneidad y fragmentación de las prácticas de gestión del riesgo por la diversidad de principios de referencia, de los sistemas de acción que constituyen históricamente los campos de la prevención, la reparación y gestión de las crisis. Otros estudios han mostrado que las medidas de seguridad pueden ser contradictorias, en el sentido que, el Estado solo asume el compromiso que se traduce en inversión en infraestructuras de protección, genera en la población la percepción de una seguridad total y conduce a negar la convivencia con el riesgo.

Por lo dicho, se considera que resulta necesario integrar dialécticamente en las comunidades epistémicas, o sistemas expertos concretos, las teorías macrosociológicas sobre el riesgo, con las perspectivas microsociológicas centradas en el estudio de situaciones de riesgo concretas, las *actitudes y acciones específicas que implementan los actores cuando se enfrentan a las mismas*, sus estrategias y modos de enfrentar las crisis.

Los aprendizajes a generar, a partir de los procesos de gestión institucionales, deben tener en cuenta los componentes sociales presentes en toda organización, las experiencias de comunicación entre saberes, conocimientos, tránsitos y trayectos. Implica no solo desarrollar la racionalidad estratégica, sino también una racionalidad comunicativa que permita la creación de espacios de articulación, acuerdo y compromiso más allá de los objetivos e intereses en disputa de los actores involucrados.

### ACCIONES HACIA EL TERRITORIO

La temática Hábitat debe estar acompañada de la Gestión del Riesgo. Esta es entendida como un proceso social complejo por medio del cual se trabaja acerca del riesgo, se analizan sus causas y se diseñan las soluciones socialmente aceptables. Involucra a actores sociales claves y requiere de un proceso de negociación colaborativa, decisión política y asignación de recursos. En este sentido se pretende lograr una reducción de los niveles de riesgo en la sociedad y fomentar procesos de construcción de nuevas oportunidades de producción y asesoramiento en el territorio en condiciones de seguridad, sostenibilidad y sustentabilidad.

La problemática del riesgo se incorpora a la agenda pública provincial y local, en los últimos diez años, a partir de múltiples demandas sectoriales de intervenciones planificadas de los organismos de gobierno especialmente en barrios de mayor vulnerabilidad, desde la perspectiva de protección integral de derechos, es decir construir la mirada compleja, interdisciplinaria y un abordaje multiactoral, intersectorial que incluya a todos los actores involucrados estableciendo las prioridades en torno a las vulneraciones participativamente.

### CASO DE ESTUDIO. INUNDACIONES

La ciudad de Santa Fe está asentada en un territorio particular al estar ubicada entre los valles de inundación de los ríos Salado y Paraná. La mayor parte de sus límites son fluviales y más de un 70% del territorio de la ciudad está conformado por ríos, lagunas y bañados. El río constituye un patrimonio con enormes posibilidades que pueden ser aprovechadas. En este sentido, Santa Fe goza de una ubicación de privilegio, tanto en términos paisajísticos como ambientales, pero cada vez que el río crece, o se anuncian tormentas, muchos ciudadanos comienzan a preocuparse porque estos eventos han originado inundaciones urbanas.

En realidad, los ríos o las lluvias no son los verdaderos problemas de la ciudad, sino que ambos simplemente evidencian sus problemas de fondo, poniendo de manifiesto las mayores vulnerabilidades; por ejemplo, la permanente planificación "contra el territorio" y no "con el territorio". La ciudad fue avanzando sobre terrenos inundables y espejos de agua sin atender a los condicionamientos del suelo. (*Aguirre Madariaga, 2009*)

Desde el año 2010 la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) inició un Proyecto de Extensión de Interés Social dirigido a empoderar, a través de la capacitación a alumnos y docentes sobre temáticas hídricas, que se fortaleció con la incorporación de alumnas y Docentes de la carrera de Licenciatura en Trabajo Social de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, ambas de la Universidad Nacional del Litoral (UNL).

La interrelación entre los diferentes niveles educativos es una forma de extensión muy enriquecedora para todos los

actores participantes, como también lo es la integración de la sociedad en el ámbito educativo. La actividad de los centros de investigación y desarrollo del sistema científico-tecnológico, nacional y provincial ha permitido alcanzar un alto grado de conocimiento del medio regional, su problemática, desarrollar herramientas y técnicas adecuadas para enfrentar las amenazas del medioambiente (*Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2014*)

La intervención activa de la sociedad en estas acciones, su participación y compromiso es parte del sostenimiento de la cultura hídrica, la concienciación y el fortalecimiento de roles interinstitucionales.

Desde el punto de vista de la intervención es sustantivo descubrir, comprender y evaluar la relación de la situación de vulnerabilidad ante la amenaza y los grados de riesgo al que nos enfrentamos, considerando que los peligros no existen por sí mismos con independencia de nuestras percepciones. Solo se convierten en cuestiones políticas cuando los actores son conscientes de ellos y los constituyen en constructos sociales, es decir un evento físico de magnitud e intensidad que sea no puede causar daños si no hay elementos de la sociedad expuestos a sus efectos (existencia de vulnerabilidades o condiciones inseguras).

Las particularidades de la crecida del río Salado del año 2003 y sus efectos devastadores en la metrópolis santafesina tuvieron consecuencias estructurales y no estructurales que fueron objeto de estudios y de diseño de estrategias de acción posteriores al desastre (*DPOH, 2003*). Las crecidas ordinarias importantes que amenazaron a la ciudad no dejan de ser una preocupación para los tomadores de decisión. La magnitud del riesgo siempre está en función de la magnitud de los peligros y las vulnerabilidades, las cuales, de igual manera que el primero, constituyen condiciones latentes en la sociedad. Es decir, la peligrosidad o amenaza es la posibilidad de ocurrencia de un evento, no el evento en sí, y la vulnerabilidad es la propensión de sufrir daño, no el daño en sí. Todas las categorías se refieren a una potencialidad o condición futura, aunque su existencia es real como condición latente.

“La vulnerabilidad de la sociedad puede manifestarse a través de distintos componentes o dimensiones, cada uno resultado de un proceso social particular. Varios expertos han intentado descifrar las dimensiones de la vulnerabilidad para clasificarla, por ejemplo, en: ambiental, física, económica, social, educativa, política, institucional, social. Todas estas expresiones de la vulnerabilidad y otras, se interrelacionan para producir matrices de vulnerabilidad y riesgo global, según los escenarios, las coyunturas y los actores que interjuegan en él. (*Córdoba et al. 2009*).

En relación al riesgo y a su gestión, diferentes trabajos de investigación y extensión (capacitación y concientización), como los de (*Wolansky et al, 2002, 2003*); (*Bacolla et al, 2009*), trabajaron conceptos y acciones de prevención con los actores sociales: asociaciones civiles, docentes, entre otros. Considerar de manera aislada cualquiera de estas implicará cerrar el camino a la solución integral de una problemática compleja como ésta. Si solo se considera la peligrosidad o amenaza se puede caer en la divinización o naturalización del fenómeno y en consecuencia se cae en el inmovilizador fatalismo; si solo se considera la vulnerabilidad faltarán propuestas efectivas para resolver la situación e incluso al decir de *Natenzon (1995, 1998)* caer en la denuncia estéril. Si solo se tiene en cuenta la incertidumbre es posible adoptar soluciones oportunistas que pueden provocar el desconcierto y el descreimiento de los actores institucionales,

llegando en muchos casos a plantearse acciones desesperadas en medio de la crisis. Si solo se considera la exposición, las respuestas pueden ser meramente tecnocráticas y solo tener en cuenta las medidas estructurales ingenieriles.

### Medidas Estructurales

En el año 2006 el Gobierno de la provincia de Santa Fe, a través del actual Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASPyMA), implementó el Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del río Salado, que incluye una Red de Estaciones Telemétricas distribuidas en el centro-norte del territorio provincial y que monitorean diversas variables hidrometeorológicas (*Ferreira, 2006*).

En el año 2008 el Gobierno de la Ciudad de Santa Fe implementó el Sistema de Monitoreo y Alerta de Inundaciones (SISMAI), que se activa ante un evento meteorológico, de crecida de ríos o combinación de ambos. Se instalaron estaciones meteorológicas automáticas en establecimientos educativos y en organismos públicos municipales y desde las cuales se recibe la información pluvial, entre otras variables.

A su vez, la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) ha implementado una estación de recepción de información para el tratamiento y procesamiento de imágenes suministradas por el radar meteorológico de la estación INTA Paraná. El objetivo principal es la detección, identificación y monitoreo de sistemas nubosos y de tormentas severas en el área metropolitana que conforman las ciudades de Santa Fe y Paraná. Además de estas fuentes de información existen otras Instituciones que poseen estaciones meteorológicas automáticas como el Ministerio de la Producción, Ministerio de Seguridad - Subsecretaría de Protección Civil, que articuladas en el trabajo interinstitucional e interjurisdiccional contribuyen a integrar la información hídrica disponible.

### Medidas no Estructurales

En esta intervención, la Academia junto con los organismos públicos participantes de esta iniciativa trataron de realizar acciones conjuntas con otros actores sociales. En tal sentido se realizaron actividades integradoras con dinámica de taller de modo de problematizar las diversas situaciones existentes de riesgo hídrico. (*Morresi, et al. 2014*)

Pensar en un desarrollo interdisciplinario implica programar cuidadosamente la forma y las condiciones en que el mismo se desenvuelve. La construcción conceptual común de la situación problematizada implica un abordaje integral, supone un marco de representaciones común entre disciplinas y una cuidadosa delimitación de los distintos niveles de análisis del mismo y su interacción. El cómo se desarrolla este proceso es un debate permanente, e incluye los niveles de análisis siguientes: subjetivo y grupal (las disciplinas no existen sino por los sujetos que las portan, las reproducen, las transforman y son atravesados por ellas).

Por ello, resulta necesario resaltar que un equipo interdisciplinario es un grupo. Debe ser pensado en la intersección de lógicas convergentes y divergentes, entre lo subjetivo y lo intersubjetivo. Lo primero, y más evidente, es que un saber disciplinario es una forma de poder y, por ende, las cuestiones de poder aparecerán indefectiblemente. En lo individual, la participación en un equipo implica numerosas problematizaciones, por ejemplo: reconsiderar, resignificar esta idea disciplinar que el saber construido en el campo es suficiente para dar cuenta de las problemáticas complejas.

En este sentido, las actividades ejecutadas implicaron que se trabajaran los conceptos de hábitat, gestión del riesgo y participación ciudadana en distintos espacios de encuentro que pueden ser propuestos por los organismos del Estado o bien a pedido de actores locales. A saber:

- Brindar información sobre los marcos normativos que encuadran las intervenciones: Ley de Defensa Civil provincial, Ley Nro 11730: Definición de áreas de riesgo, Ley Principios Rectores del Agua, Ordenanza municipal Nro 11502 (creación de sistema de gestión de riesgo, etc)
- Informar qué hacer cuando se desencadena la amenaza por lluvia y por crecida de los ríos.
- Trabajo interdisciplinario en diferentes instituciones del barrio (Ing. Hídrico, Arquitecto, Trabajador Social, Psicólogo, etc)
- Toma de conciencia de los sujetos sociales a través de instancias participativas sobre la problemática hídrica, sistemas de alerta, ciclo de gestión de riesgo, etc
- Dar a conocer el nivel de riesgo en el que se encuentran distintos barrios de la ciudad, según cota, relacionándolo a las vulnerabilidades físicas, ambientales, sociales, económicas, etc.
- Vincular dinámicamente los saberes que se adquieren en la universidad con los saberes que tienen los vecinos acerca de su territorio y poder construir conjuntamente acciones de transferencia y capacitación.

## CONCLUSIÓN

La relación dinámica y creativa entre conocimientos, saberes y experiencias que se desarrollan vinculando las Ciencias Sociales con las Ciencias Duras es un camino que recién se inicia, pero que merece ser transitada en función de los resultados que se están logrando en torno a aportar a la construcción del riesgo en el marco de una sociedad en y de riesgo. La oportunidad de desarrollar procesos de extensión multiactorales en la académica, implica un proceso educativo de doble vía, en el que se aportan conocimientos y herramientas para la comprensión. Estos son socializados con la plasticidad de poder redefinir su contrato, fortalecer vínculos y amarrar lazos sólidos y constructivos para la construcción de lo posible. Este producto enriquece los procesos comunitarios, a la vez que optimiza la formación de profesionales críticos y propositivos de su realidad local, regional y nacional. La experiencia nos demuestra que las acciones interinstitucionales e interdisciplinarias son alentadoras para proseguir en esta línea de construcción social. Las interrelaciones entre los distintos actores sociales confirman que la participación es un medio para su empoderamiento y efectivo para el logro de los objetivos propuestos. Implica obligarnos a cruzar el puente que va desde el terreno crítico a la formulación de contornos propositivos y al asesoramiento de perspectivas pertinentes y viables, así como a la creación de nuevas cosmovisiones, la imaginación de alternativas nuevas para las viejas problemáticas.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AGUIRRE MADARIAGA, E., 2009.  
Riesgos, Construcción Histórica y Social.  
*Aula Ciudad, Santa Fe, la ciudad y El Río. Fascículo 5. Gobierno de la ciudad de Santa Fe. Santa Fe, Argentina.*
- BACOLLA, A.; PALUMBO, A; ROTH, A Y WOLANSKY, S., 2009.  
"Santa Fe y las Inundaciones. Hacia una gestión de riesgos".  
*Manual de actividades para el aula. . Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Gobierno de la Ciudad. Santa Fe.*
- BECK, U. 1993.,  
De la sociedad industrial a la sociedad de riesgo. Cuestiones de supervivencia, estructural social e ilustración ecológica.  
*Revista de Occidente, N° 150. México.*
- CARBALLEDA, A., 2002.  
La Intervención en Lo Social.  
*Editorial Paidós. Buenos Aires.*
- CÓRDOBA A. 2010.  
La planificación de las intervenciones públicas.  
*Editorial Lumen Humanitas. Bs As.*
- CORDOBA, A; GALLO, S Y VEGA, S. 2009.  
"Las intervenciones públicas en situaciones de emergencia y/o desastre".  
*Propuesta de participación en el operativo provincial de emergencia. (Inédito)*
- DEL PERCIO. 2009.  
"Complejidad e indisciplina".  
*Publicado en [www. cecies.org/articulo.asp?id=266](http://www.ceci.es.org/articulo.asp?id=266)*
- DIRECCIÓN PROVINCIAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (DPOH) 2003  
"Informe de las Áreas Técnicas de la Dirección Provincial de Obras Hidráulicas de Santa Fe sobre la crecida del río Salado del año 2003".  
*Informe Interno. 720 pp. Centro de Documentación MASPOMA. Santa Fe, Argentina.*
- FERREIRA, C. 2006.  
"Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del Río Salado, Provincia De Santa Fe, Argentina. Avances en su Implementación".  
*Proc. Fifth FRIEND World Conference - Water Resource Variability: Processes, Analyses and Impacts - IAHS. La Habana, Cuba. IAHS Red Book Series 308, 175-179.*

- GIDDENS, A. 1990.  
Consecuencias de la modernidad.  
*Madrid. Alianza Editorial.*
- MORRESI, M.; CHIALVO, P.; CRISTINA, I.; CÓRDOBA, A.; BRASIL, N. 2014.  
Fortalecimiento de roles para la gestión de la información hídrica.  
*Informe Final del Proyecto de Extensión e Interés Social. Secretaría de Extensión de la Universidad Nacional del Litoral.*
- NATENZON, C. 1995  
Catástrofes naturales, riesgo e incertidumbre.  
*Serie de Documentos e Informes de Investigación n° 197. PIRNA, FLACSO Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.*
- NATENZON, C. 1998.  
Riesgo, vulnerabilidad e incertidumbre. Desastres por inundaciones en Argentina.  
*Serie de Documentos e Informes de Investigación n°231. PIRNA, Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.*
- SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN.  
Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación-PAN.  
*Documento de Base. Capítulo 1. Disponible en <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=474>, último acceso Febrero de 2014.*
- WALTER, J., PUCCI, F. 2007.  
La gestión del riesgo y la crisis. Buenos Aires.  
*Editorial El Ateneo- Universidad de San Andrés - FONCSI.*
- WOLANSKY, S., CORZO, H.; MORBIDONI, N.; MASSERA, H.; VALSAGNA, A. Y SRAH, S., 2002.  
Terraplenes de defensa contra inundaciones. Aspectos físicos y constructivos. Mantenimiento y conservación.  
*Manual Vol 1. ISBA: 987-508-199-X. Centro de Publicaciones UNL.*
- WOLANSKY, S.; CORZO, H.; MORBIDONI, N.; VALSAGNA, A. 2003.  
La inundación en Santa Fe. Desastres Naturales y mitigación del riesgo.  
*Manual Vol 2. ISBA: 987-508-198-1. Centro de Publicaciones UNL.*





## Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

### Rain design estimation from multi-satellite freely available information

Catalini, Carlos G.<sup>1-2</sup> ✉ - García, Carlos M.<sup>3</sup> - García, Cesar <sup>1</sup> - Jovanovic, Nebo Z. <sup>4</sup> - Bugan, Richard DH <sup>4</sup>

Recibido: 9 de febrero de 2015 • Aceptado: 7 de abril de 2015

#### Resumen

*La amenaza hídrica se cuantifica mediante el empleo de la Creciente de Proyecto. Si ésta no se puede derivar mediante estadística de caudales o niveles históricos, se evalúa partiendo de las relaciones intensidad de lluvia-duración-Recurrencia (i-d-T). Esta metodología es más común pero necesita de extensos registros históricos de lluvias, que en general no están disponibles o son de difícil acceso. Una posible solución se puede entrever en las nuevas tecnologías satelitales que monitorean la atmósfera y sus procesos. En este trabajo se desarrolla una metodología para generar una serie histórica de lámina máxima diaria, mediante el empleo de información multisatelital de libre disponibilidad derivada por el algoritmo RFE. Se trabajó en la cuenca experimental del río Sandspruit, Sudáfrica, que cuenta con cuatro series pluviométricas de 25 años de registro en los alrededores y series más cortas (3 años) dentro de la cuenca. La técnica propuesta permitió calcular la i-d-T en la zona de estudio con una resolución de pixel de casi 1km. Los mapas de precipitación resultantes para distintas recurrencias permitirán mejorar la exactitud de los cálculos de proyectos y por consiguiente optimizar la inversión en una obra civil.*

**Palabras clave:** *Lluvias Máximas Diarias, Sistemas de Información Geográfica, Estimación Satelital, RFE.*

#### Abstract

*The risk for hydraulic structures is quantified by the Design Flood. In most cases when statistical or historical flow levels are not available, it can be estimated by rainfall intensity-duration-Frequency (i-d-F) relationship. This methodology is more common but requires historical records of rainfall, also a data generally unavailable or difficult to access. A possible solution may arise from the new satellite technologies that monitor the atmosphere. This paper presents a methodology to generate a time series of daily maximum rainfall using freely available satellite information derived by the RFE algorithm. The work was applied on the experimental basin of the river*

1. Universidad Católica de Córdoba - Grupo de Investigación de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (UCC-EHCPA)

✉ ccatalini@ina.gob.ar

2. Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA)

3. Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

4. Council for Scientific and Industrial Research (Natural Resources and the Environment) South Africa

*Sandspruit, in South Africa, which has four pluviometric time series with 25 years of record around the basin and shorter series (3 years) inside the basin. The proposed technique generated the i-d-F in the study area with a pixel resolution of nearly 1km. The resulting precipitation maps for different recurrence will improve the accuracy of project's calculations and therefore optimize investment in civil works.*

**Keywords:** *Maximum Daily Rainfall Depth, Geographical Information Systems, Satellite Rainfall Estimation, RFE*

## INTRODUCCIÓN

Al dimensionar obras hidráulicas, planificar el uso del suelo y gestionar los recursos hídricos, la amenaza hídrica se cuantifica mediante el empleo de la Creciente de Proyecto. Si ésta no se puede derivar mediante estadística de caudales o niveles históricos, se evalúa partiendo de las relaciones intensidad de lluvia-duración-Recurrencia (i-d-T). Esta metodología requiere datos de lluvias máximas diarias, que deben ser extraídos de extensos registros históricos, en general no disponibles o de difícil acceso. Un problema común en los estudios hidrológicos de zonas semiáridas del mundo es la disponibilidad de datos.

Una posible solución se puede entrever en las nuevas tecnologías satelitales que monitorean la atmósfera y sus procesos. La medición de precipitación desde el espacio está basada en la interpretación de la radiación electromagnética (EM) que es dispersada o emitida por las nubes, la lluvia y la superficie planetaria, y es monitoreada por instrumentos a bordo de satélites en regiones discretas del espectro. Varios estudios se han focalizado en el uso de las porciones visibles (VIS) e infrarrojas (IR) del espectro EM (entre 10.5 - 12.5 $\mu$ m). El principal problema de las técnicas basadas en VIS/IR es que la observación solo representa las características del tope nuboso más que las de la lluvia que llega a la superficie. En cambio en frecuencias de microondas (MW), las partículas de precipitación son la principal causa de la atenuación de la radiación reflejada. Las técnicas que utilizan MW son físicamente más directas que las basadas en radiación VIS/IR.

El algoritmo RFE (Rainfall Estimation v 2.0) fue implementado a partir del 1 de enero de 2001 por el Centro de Predicciones Climáticas del NOAA. El RFE pretende mediante la utilización de múltiples satélites e instrumentos (MeteoSAT 7, SSM/I y AMSU) combinar ambas técnicas VIS/IR y MW para lograr una estimación de precipitaciones más realista.

En el presente artículo se evalúa una metodología cuyo objeto es generar una serie histórica de lámina máxima diaria, mediante el empleo de información satelital derivada por el algoritmo RFE, en una cuenca experimental del río Sandspruit, Provincia de Western Cape, Sudáfrica. Para ello, se procesaron las imágenes diarias y los resultados obtenidos fueron contrastados contra cuatro estaciones pluviométricas que poseen 25 años de registro, generando además grillas digitales georeferenciadas de distribución de lluvia máxima diaria con recurrencia asociada y series en puntos particulares de interés.

## ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Sandspruit se encuentra emplazada en la Provincia de Western Cape en Sudáfrica, aproximadamente a 80 km al nordeste de Ciudad del Cabo, es considerada como

una cuenca de tamaño mediano, con flujo estacional durante los meses de junio y noviembre, con una superficie de aproximadamente 152 km<sup>2</sup>. La cuenca experimenta un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos e inviernos fríos y húmedos producto de eventos frontales que se aproximan desde el noroeste debido a la influencia marítima. Las precipitaciones anuales exhiben rangos que varían entre los 300 a 400 mm anuales, siendo dominados por eventos de larga duración y baja intensidad durante los meses de abril a octubre (De Clercq et al., 2010).

La topografía del área es relativamente plana, exhibiendo una superficie ondulada, con rangos de elevación comprendidos entre los 40 msnm (noroeste) a 900 msnm (sur). La pendiente media a lo largo de la cuenca es de 0,013. Siendo el uso del suelo predominantemente agrícola, al este de la cuenca se encuentra un macizo rocoso con elevaciones de más de 1700 msnm.

## DATOS DISPONIBLES

Se dispone de dos tipos de fuentes de información, a saber: estaciones pluviométricas tradicionales e información satelital proveniente del satélite MeteoSAT 7 y procesadas mediante el algoritmo RFE (Rainfall Estimation v 2.0), el cual fue implementado a partir del 1 de enero de 2001 por el Centro de Predicciones Climáticas del NOAA, el mismo se encuentra disponible hasta la actualidad.

La primera fuente de información fue empleada como patrón de comparación lo que permite contrastar los resultados obtenidos mediante el empleo de la segunda fuente de información. El carácter espacial de las mismas permite generar grillas digitales georeferenciadas de distribución de lluvia máxima diaria con recurrencia asociada y series en localizaciones particulares de interés.

## Pluviometría

En el área de estudio hay 7 estaciones pluviométricas tradicionales distribuidas en proximidades de la cuenca (a unos 30 km de distancia entre sí), de las cuales 4 poseen 25 años de registros.

De estas, 3 (tres) se encuentran emplazadas en su interior, presentando la menor longitud de registro, por lo cual en el presente se centra la atención en la obtención de la lámina máxima diaria con recurrencia asociada sobre estos emplazamientos.

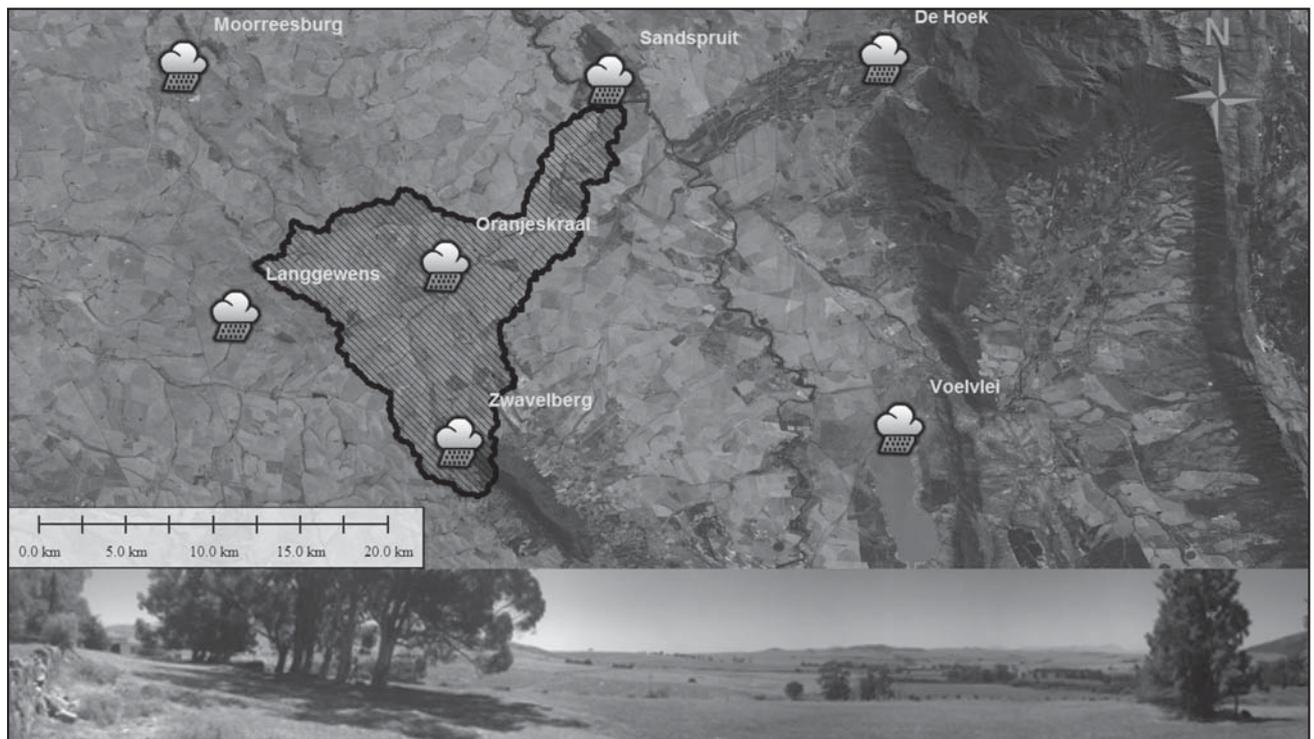
La Tabla 1 y Figura 1, presentan la ubicación y longitud de serie de estas estaciones, los emplazamientos de estas contemplan los diferentes rangos de elevación, pudiendo catalogarlos en cuenca baja, media y alta.

**Tabla 1. Estaciones pluviométricas, emplazamiento y longitud de serie.**

Nombre	Elevación [m snm]	Periodo de Serie	Longitud	Latitud
De Hoek	126	1986-2011	19,03 E	33,15 S
Langgewens	191	1986-2011	18,69 E	33,28 S
Moorreesburg	199	1986-2011	18,67 E	33,15 S
Voelvrei	72	1986-2011	19,04 E	33,34 S
Zwavelberg	278	2009-2013	18,81 E	33,35 S
Oranjeskraal	118	2009-2013	18,80 E	33,26 S
Sandspruit	40	2009-2011	18,89 E	33,16 S

Sobre cada una de las estaciones, en base a la longitud de las serie de registros, se realizó la verificación de las hipótesis estadísticas básicas (independencia, estacionalidad y homogeneidad), para lo cual se emplearon las pruebas de Wald-Wolfowitz, Kendall y Wilcoxon. En todos los casos estas estaciones superaron dichas pruebas validando así su empleo. Además, los análisis entre este tipo de información y la proveniente de sensores remotos se realizaron sobre la misma ventana temporal, dejando un periodo de 11 años de solapamiento entre la información satelital y pluviométrica disponible.

La Tabla 2, presenta un resumen de los principales estadísticos de aquellas estaciones con mayor longitud de registro, apto para su determinación.



**Figura 1. Emplazamiento de la Cuenca Sandspruit (superior), y vista de la cuenca desde la zona más elevada (estación Zwavelberg). Provincia de Western Cape, Sudáfrica.**

**Tabla 2. Estaciones pluviométricas, principales parámetros estadísticos de la serie de máximos diarios, serie completa (25 años) serie ventana temporal (11 años, 2001-2012).**

Nombre	De Hoek	Langgewens	Moorreesburg	Voelvrei
Mínimo	30,5	20,4	18,4	25,8
Máximo	77,5	61,2	133,0	76,2
Promedio	43,8	32,3	37,9	45,3
Desviación estándar	11,2	8,96	21,6	14,7
Mediana	41,1	30,9	33,6	39,3
Coefficiente de variación (Cv)	0,256	0,278	0,568	0,325
Coefficiente de asimetría (Cs)	1,32	1,58	3,77	0,754
Coefficiente de curtosis (Ck)	4,13	5,32	14,9	2,09
Número de Observaciones	25	25	25	25

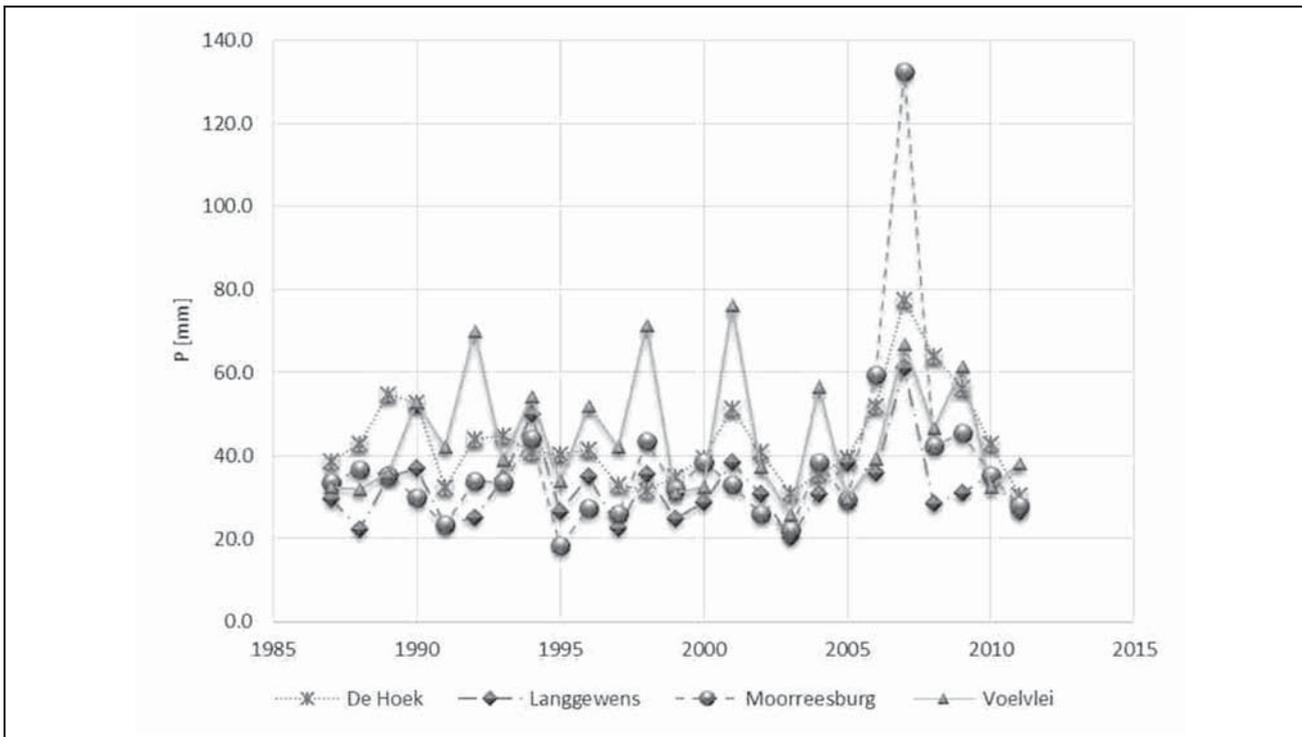


Figura 2. Precipitaciones Máximas Diarias Anuales en las estaciones de mayor longitud de registro.

Una vez realizados los análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados se procedió al ajuste de la función de distribución de frecuencia, seleccionándose, dependiendo el caso, la función Lognormal o exponencial mediante el método de ajuste de la Máxima Verosimilitud. Además se evaluó

la bondad de ajuste mediante las pruebas Chi-cuadrado y Shapiro-Wilk determinándose así los valores de láminas de lluvias máximas diarias de distintos periodos de retorno y los intervalos de confianza asociados a su estimación (con una confianza del 95%).

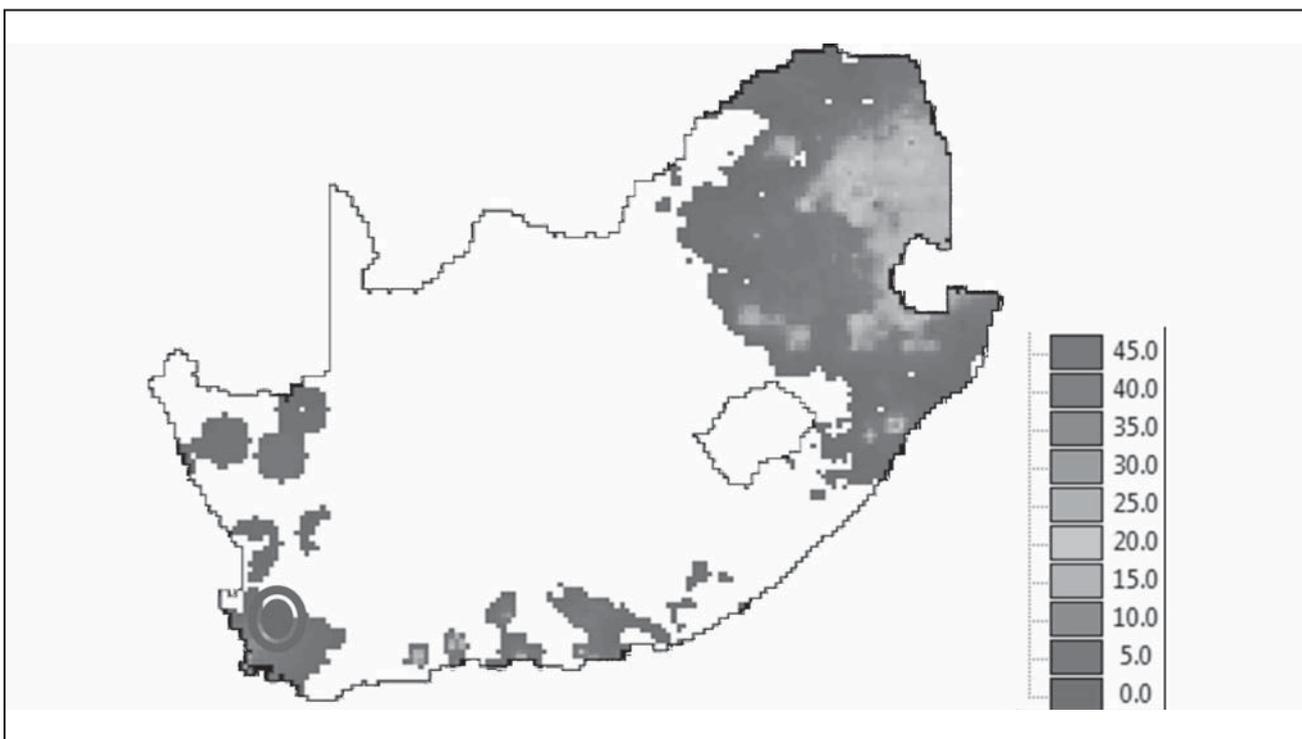


Figura 3. Precipitaciones Diaria Estimada RFE v 2.0 [mm], Sudáfrica, 30 de Octubre de 2012. (El círculo indica el área de estudio).

### Información Satelital

Se contó con información satelital RFE (Rainfall Estimation v 2.0), la cual se encuentra disponible desde 2001 hasta la actualidad. Este algoritmo emplea técnicas de combinación de sensores activos y pasivos para mejorar la estimación de precipitación. Utilizando para tal fin, el satélite Geostacionario Meteosat 7, se adquieren imágenes infrarrojas cada 30 minutos y emplea áreas que presentan temperaturas de toques nubosos menores a 235°K para estimar la precipitación, además de complementar el ajuste con información terrena (proveniente de 1000 estaciones) se emplean 2 sensores de estimación de precipitación montados en otros satélites, ellos son: Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) y el Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU).

En el caso del presente artículo se desarrolló un algoritmo en el paquete computacional ILWIS, capaz de extraer la información para Sudáfrica, y particularmente para la región de interés mediante la adquisición del valor de píxeles (0,1° de resolución) sobre cada una de las 7 estaciones emplazadas en la cuenca de Sandspruit. De esta manera se calculó el valor de lámina diaria entre el 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2013 (Figura 3). Estas fueron empleadas para generar una serie histórica de máximos diarios anuales sobre las estaciones pluviométricas y con ellas realizar el análisis estadístico y ajuste de una distribución de frecuencia, el cual es contrastado con los resultados obtenidos en las 4 estaciones de longitud de serie apta para aplicar dicho análisis mediante las técnicas usuales de la hidrología.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó, una vez realizados los análisis de estadística inferencial sobre las series de lluvias máximas diarias registradas en los puestos pluviométricos seleccionados se procedió al ajuste de la función de distribución de frecuencia. Dependiendo el caso se seleccionó la función Lognormal o Exponencial mediante el método de Máxima Verosimilitud. Este ajuste se hizo tanto sobre la serie completa como sobre el periodo ventana entre las dos fuentes de información, es decir 2001-2011.

La Tabla 3 permite apreciar los resultados del ajuste de la función de distribución Lognormal, sobre los datos pluviométricos en la estación Voelvlei. Cabe mencionar que las diferencias relativas en todas las estaciones estuvieron comprendidas para una recurrencia de 100 años entre un 10 y un 25%, mientras que para recurrencias de 2 años el rango queda comprendido entre 1,4 y 14%, siempre en detrimento de la serie de menor longitud.

Una vez procesadas las RFE se cuenta con una serie de máximos diarios anuales, a la cual se puede aplicar un proceso estadístico similar al de las series pluviométricas. La Tabla 4 presenta un ejemplo del contraste de la función de distribución de probabilidades ajustada, tanto para la serie pluviométrica, periodo 2001-2011, como para la serie generada a partir de imágenes satelitales pudiéndose apreciar una tendencia general observada de una menor diferencia relativa para recurrencias esporádicas y una mayor diferencia en eventos frecuentes. Del análisis de la información surge que las informaciones RFE presentan una adecuada estimación para eventos severos; no así para eventos de mayor frecuencia, observándose diferencias de más 40 % en recurrencias de 2 años decreciendo a medida que aumenta la recurrencia. De todas maneras, es de destacar que las estimaciones RFE caen dentro del intervalo de confianza ajustado sobre datos pluviométricos, lo cual permitiría considerarlos como válidos en lugares en donde se carezca de otra fuente de información, como ser las tres estaciones de interés dentro de la cuenca del río Sandspruit, a saber: Zwavelberg, Oranjeskraal y Sandspruit.

### GENERACIÓN DE MAPAS DIGITALES DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS CON DISTINTAS RECURRENCIAS ASOCIADAS

Mediante el empleo del paquete computacional IDRISI Andes<sup>®</sup>, fue posible generar un archivo vectorial georeferenciado, el cual contiene los valores de precipitación máxima diaria y los respectivos intervalos de confianza para la función de distribución correspondiente a cada estación y recurrencias de 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

**Tabla 3. Estación Voelvlei, Contraste de precipitaciones máximas diarias con recurrencia asociada ajuste lognormal sobre serie completa y periodo ventana.**

T [años]	Periodo 1987-2011			Periodo 2001-2011			Diferencia Relativa
	P [mm]	Intervalo de confianza (95%)		P [mm]	Intervalo de confianza (95%)		
100	89,0	67,8	110,0	99,6	58,2	141,0	-10,6%
50	81,8	63,9	99,6	90,4	56,1	125,0	-9,5%
25	74,4	59,8	89,0	81,3	53,5	109,0	-8,5%
20	72,0	58,4	85,6	78,3	52,6	104,0	-8,0%
10	64,3	53,6	75,0	68,9	49,1	88,7	-6,7%
5	56,1	48,1	64,1	59,0	44,5	73,5	-4,9%
3	49,3	43,1	55,6	51,0	39,9	62,2	-3,3%
2	43,2	37,9	48,4	43,8	34,7	53,0	-1,4%

**Tabla 4. Estación Voelvrei, Contraste de precipitaciones máximas diarias con recurrencia asociada ajuste lognormal sobre el periodo ventana, entre información pluviométrica [terrena] y estimaciones satelitales.**

T [años]	Terrena			Satelital			Diferencia Relativa
	P [mm]	Intervalo de confianza (95%)		P [mm]	Intervalo de confianza (95%)		
100	99,6	58,2	141,0	82,2	45,3	119,0	21,2%
50	90,4	56,1	125,0	73,1	41,8	104,0	23,7%
25	81,3	53,5	109,0	64,0	38,3	89,6	27,0%
20	78,3	52,6	104,0	61,0	37,1	84,9	28,4%
10	68,9	49,1	88,7	51,9	33,6	70,1	32,8%
5	59,0	44,5	73,5	42,7	30,1	55,4	38,2%
3	51,0	39,9	62,2	36,0	27,4	44,6	41,7%
2	43,8	34,7	53,0	30,6	25,2	36,1	43,1%

En base a esta información puntual, el paquete computacional utilizado en el presente artículo permite implementar diversas metodologías para extrapolar regionalmente la información contenida en forma puntual. Así se obtuvieron mapas temáticos de tipo Raster los cuales, basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos.

Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos puntuales en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (denominadas pixel) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático.

En los fenómenos que varían continuamente, como es el caso de la lluvia, es más probable que los lugares que se encuentran más próximos entre sí, tengan valores similares en vez de que aquellos que se encuentran alejados. Esto se denomina autocorrelación espacial.

La primera tarea al usar las técnicas geoestadísticas para crear superficies es describir, de manera tan completa como sea posible, la naturaleza de la variabilidad espacial presente en los datos de muestra. Esta variabilidad espacial es determinada en términos de distancia y dirección. El análisis se realiza en pares de puntos muestrales, donde cada punto de datos es colocado en pares con cada uno de los otros puntos de datos. Cada par puede ser caracterizado por su distancia de separación (la distancia euclidiana entre los dos puntos) y su dirección de separación (el azimut en grados de la dirección de un punto al otro).

La técnica de Kriging presenta como ventaja fundamental la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre la autocorrelación espacial existente entre los propios datos, la cual queda reflejada en el denominado variograma muestral. Además, esta técnica es capaz de representar los cambios en la dependencia espacial dentro del área de estudio. Es de destacar que con esta técnica los mapas temáticos que se obtienen presentan marcadas crestas o "células", las cuales denotan el origen puntual de la información de base.

Es por ello, que en trabajos previos (por ejemplo *Catalini et al, 2011 y 2012*) se propone una metodología de generación de superficies tendenciales, a partir de la regionalización de valores de lámina de lluvia máxima diaria para las distintas recurrencias. Debido a que la superficie resultante mediante el empleo del análisis tendencia es un modelo matemático ideal, muy suave y está libre de detalles locales (células). La técnica propuesta es de interpolación global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, para todo el grupo de datos conocidos. Sin embargo los datos tendenciales son un interpolador inexacto (*Catalini et al, 2010*).

La hipótesis que se emplea en este trabajo es aceptar como válidos desde el punto de vista estadístico a la superficie tendencial, que se encuentren contenidos dentro del intervalo de confianza (rango esperable de posibles valores) de la variable de interés.

Así la superficie tendencial óptima es aquella que presenta valores de lluvia máxima diaria dentro del intervalo de confianza obtenido en el análisis de estadística inferencial, lo cual validara estadísticamente su adopción. La Figura 4, permite observar el mapa que se generaría solo al emplear información puntual y externa a la cuenca de interés. Al incorporar la información satelital, el mismo cambia sustancialmente, no tanto sobre sus valores máximos sino sobre su distribución espacial, permitiendo corroborar lo observado en campo, en donde, los eventos más severos se registran en la zona de Sandspruit, influenciados por la orografía y los de menor severidad en el extremo sur de Zwavelberg

Una vez, que se han obtenido los mapas tendenciales en base a la información satelital, es posible generar curvas de frecuencia de lámina máxima diaria para las estaciones de interés que ya no solo consideran el dato puntual estimado mediante RFE, sino la información obtenida sobre otras estaciones, en el caso particular del presente estudio fue posible cuantificar las estaciones internas a la cuenca, generando así información de base para eventos severos dentro de la misma. (Figura 4)

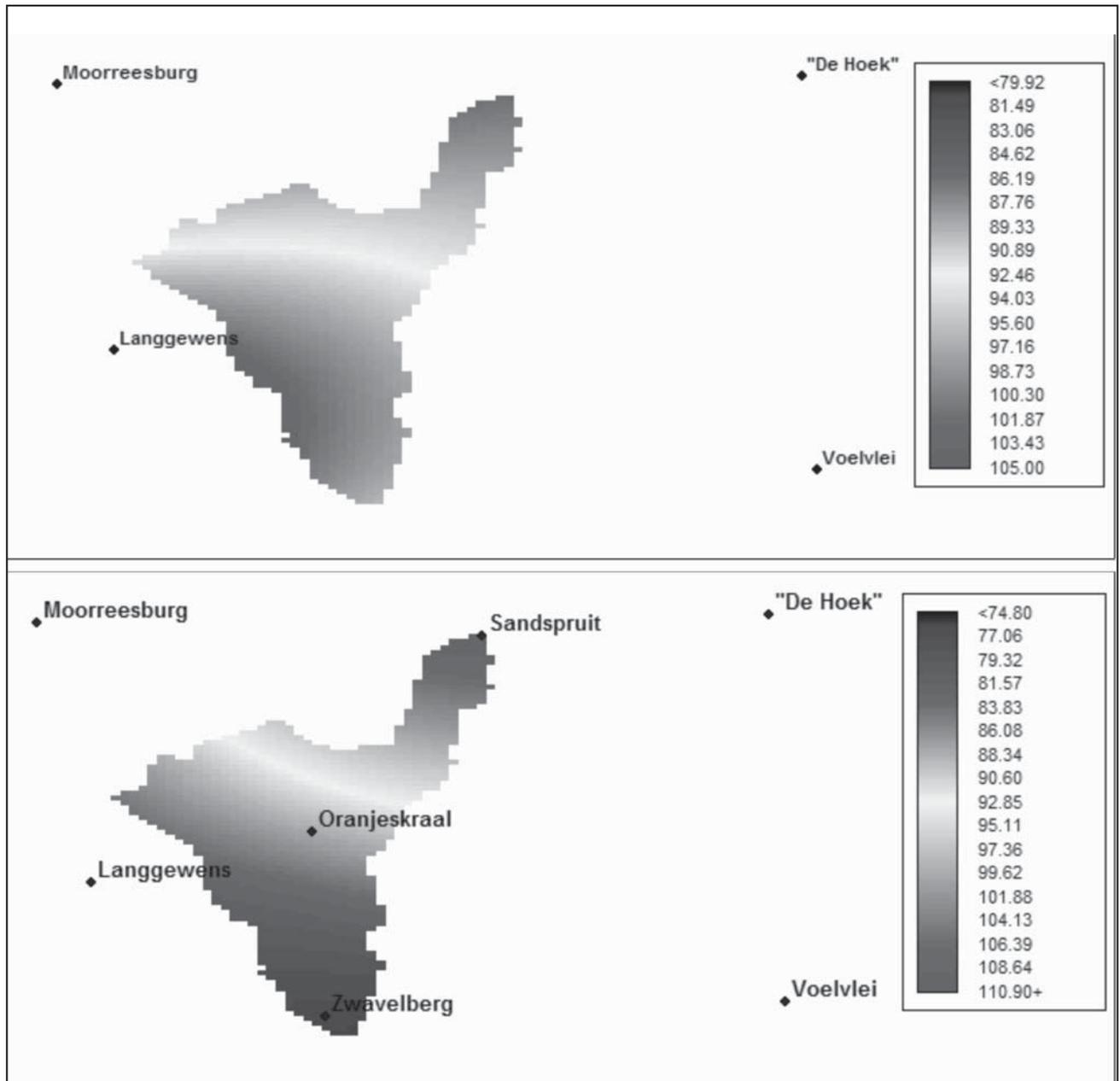


Figura 4. Superficie tendencial. Regresión Cubica. Valores de lámina de lluvia máxima diaria [mm]. Recurrencia 50 años [mm] (Superior en base a datos terrenos, inferior en base a estimaciones satelitales).

## CONCLUSIONES

### Sobre la Metodología Empleada

Los datos disponibles de series anuales de máximos de lluvia diaria, permiten realizar el análisis estadístico para 4 de las 7 estaciones, las cuales no se encuentran dentro de la cuenca de interés. Al poder realizarse sobre ellas la verificación de las hipótesis básicas, tanto de longitud de serie como mediante las pruebas de independencia (Wald-Wolfowitz), estacionalidad (Kendall) y homogeneidad a escala anual (Wilcoxon) donde la hipótesis de contraste  $H_0$  se acepta a un nivel de significado del 1% o 5%, permite definir la red pluviométrica como válida para contrastar valores proveniente de estimaciones de lluvia RFE.

Tanto la función Lognormal como Exponencial, fueron las que mejor representaron el fenómeno, tanto en base a información satelital como terrena, verificándose que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico seleccionado. De esta manera se obtiene los valores esperados de la precipitación diaria para recurrencias de 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años con sus correspondientes intervalos de confianza. En este trabajo se determinaron además los intervalos de confianza asociados a la estimación de lluvias máximas diarias con un intervalo de confianza del 95%. La estimación de los valores de precipitación por estación, para recurrencias preestablecidas, se traduce en una cobertura continua.

### **Sobre los Campos de lluvias máximas en la región de estudio**

Los mapas de lluvias máximas diarias para las recurrentes analizadas, presentan una configuración semejante en cuanto a la disposición de las curvas. Se observa que las isohietas corren en general de Sur a Norte, en igual sentido creciente.

### **Sobre la utilidad de los resultados en ingeniería**

Este trabajo provee una evaluación sobre la posibilidad de generar información en base a sensores remotos, en cuencas en donde no existan suficientes registros pluviométricos que permitan estimar los patrones de diseño de manera local, por ende es una herramienta válida y de base imprescindible para la planificación territorial y para el diseño y operación de obras de infraestructura relacionadas con los recursos hídricos, ya que para cualquier dimensionado de estructuras hidráulicas, resulta necesario cuantificar el tipo de evento hidrológico que la obra deberá soportar y el correspondiente riesgo asociado.

Utilizar estos mapas de precipitación para distintas recurrencias implica mejorar la exactitud de los cálculos y, por consiguiente, optimizar la inversión en una obra. Lamentablemente la fuente de información satelital empleada en el presente trabajo dentro de un convenio de colaboración DST con el CSIR (Council for Scientific and Industrial Research) no se encuentra aún disponible para América Latina aunque de todas maneras se está trabajando y avanzando en un algoritmo de hidroestimación en base a información satelital que permitiría evaluar estas técnicas en la región.

### **AGRADECIMIENTOS**

A las Universidades y sus respectivos equipos de investigación que han formado y forman parte del presente proyecto de cooperación internacional financiado por el MINCYT – DTS código SA1109, al Dr. Nebo Jovanovic y Dr. Richard Bugan por el interés de trabajar en manera conjunta.

### **TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- CATALINI, C.G., MAIDAH, A., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G., 2010.  
Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul Provincia de Buenos Aires. Argentina.*
- CATALINI, C.G., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G.; LÉRIDA, G., SANCHEZ, E., 2011.  
Implementación y validación de una técnica de regionalización de curvas i-d-T en la Provincia de Córdoba.  
*CÓNAGUA 2011, Tucumán, Rep. Argentina.*
- CATALINI, C. G., GARCÍA, C.M., CAAMAÑO NELLI, G.E; ZIMMERMAN, E., BELLI, V., BIANCHIOTI, B., CUETO, A., LÉRIDA, G., LOVERA, D., PINASCO, G., SÁNCHEZ, E., MIGUEZ RUIZ, M., 2012.  
Implementación de una técnica de regionalización de láminas máximas diarias y curvas i-d-T en las Provincias de Córdoba y Santa Fe.  
*III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas. E-Book ISBN 978-950-673-953-9, pp. 267.*  
*Editores: G. Riccardi et al.. UNR Editora. Rosario, RA.*
- DE CLERCQ W.P., JOVANOVIĆ, N.Z., FEY M.V., 2010.  
Land use impacts on salinity in Berg River wáter.  
*WRC Report No. K5/1503. Water Research Commission, Pretoria. South Africa.*



# Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

## Groundwater flow model in the planned industrial sector (Tornquist, province of Buenos Aires)

Albouy, René <sup>1</sup> ✉ - Lafont, Daniela <sup>1</sup> - Lexow, Claudio <sup>1,2</sup> - Carrica, Jorge <sup>1</sup>

Recibido: 4 de noviembre de 2014 • Aceptado: 21 de abril de 2015

### Resumen

*Este trabajo tiene por objetivo el diseño de un modelo numérico de flujo subterráneo, con el programa MODFLOW, con miras a analizar el transporte y migración de sustancias contaminantes en el acuífero freático. El mismo se formuló en una porción de la cuenca superior del río Sauce Chico (provincia de Buenos Aires, Argentina) que incluye el denominado Sector Industrial Planificado (SIP) de Tornquist. El funcionamiento hidrológico del acuífero se plantea con una recarga a partir del agua de lluvia y una descarga en el río que drena la cuenca. El modelo numérico de flujo corrobora el esquema conceptual de funcionamiento del sistema y reproduce en forma aceptable la configuración local de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Los niveles calculados y observados presentan un buen ajuste (coeficiente de correlación de 0,99) y el balance de masas resulta consistente con los datos de campo. El modelo construido es una herramienta interpretativa para analizar el transporte de sustancia en el agua subterránea, diagramar puntos de monitoreo y gestionar medidas tendientes a la preservación del recurso hídrico subterráneo.*

**Palabras clave:** modelo de flujo, acuífero libre, SIP Tornquist.

### Abstract

*A numerical groundwater flow model with MODFLOW program in order to analyze the transport and migration of pollutants into groundwater is formulated. An area of the unconfined aquifer in the upper basin of the Sauce Chico River (Province of Buenos Aires, Argentina) was modeled. The Planned Industrial Sector (near Tornquist town) is located in this area. Hydrologically the aquifer recharges from rainfall and discharge in the river that drains the watershed. Numerical flow model is consistent with the hydrological conceptual scheme. The model reproduces the configuration of the water table and the main flow directions in the aquifer. Calculated and observed piezometric levels show a good fit (correlation coefficient = 0.99)*

*and the mass balance is consistent with the field data. The flow model is an interpretive tool to evaluate the mass transport in groundwater in order to design monitoring networks-programs for groundwater resource protection.*

**Keywords:** flow model, unconfined aquifer, SIP Tornquist.

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

✉ albouy@uns.edu.ar

2. PAID Comisión de Investigaciones Científicas (CIC),  
Provincia de Buenos Aires, Argentina.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente artículo tiene por objetivo implementar un modelo de flujo subterráneo utilizando el programa MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) con el propósito de representar numéricamente el sistema hídrico subterráneo del Sector Industrial Planificado (SIP) en inmediaciones de la localidad de Tornquist (Provincia de Buenos Aires, Argentina), con miras a simular su comportamiento ante diferentes escenarios hipotéticos de transporte de solutos. El modelo numérico formulado permite validar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y simular, en una próxima etapa, diferentes escenarios hipotéticos de transporte de solutos en el sistema subterráneo.

## ÁREA DE ESTUDIO: UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO

El área de estudio se inserta en la vertiente suroccidental de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, dentro de la cuenca alta del río Sauce Chico. El sector de interés abarca la margen izquierda del curso, entre la desembocadura del arroyo Ventana, hasta el cierre de la cuenca superior en la ex estación de aforos Paso Bower. El Sector Industrial Planificado

está proyectado construirlo en inmediaciones de la localidad de Tornquist, en una parcela de 12 Has situada a unos 3 km al NO de esta ciudad, cabecera del distrito homónimo (Figura 1). Desde un punto de vista geomorfológico, se trata de una llanura periserrana, cuyo desarrollo areal está limitado hacia el NE por los afloramientos cuarcíticos de las Sierras Australes. Se eleva entre los 300 msnm (en el NE) hasta 240 msnm (hacia el SO) y presenta una pendiente topográfica menor al 5%. El clima del lugar es subhúmedo, transicional hacia los áridos y de tipo mesotermal, con temperatura y precipitación media anual de 14,7°C y 781,5 mm respectivamente (Albouy, 1997). Los suelos han evolucionado a partir de sedimentos eólicos, limosos, con arena y arcilla; son medianamente profundos, de texturas francas y buena permeabilidad (Albouy, 1997). En el área del estudio y cubriendo el sustrato paleozoico de las sierras, aparece un conjunto de sedimentos limo-arenosos del Plioceno-Pleistoceno inferior denominados informalmente “sedimentos pampeanos” (Fidalgo et al., 1975) o Formación La Norma (De Francesco, 1992). Se trata de depósitos limo arenosos y hasta arcillosos, color castaño rojizo, compactos, sin estratificación, con cemento de carbonato de calcio y que culminan con un manto de tosca, discontinuo, de 1 a 3 m de espesor.

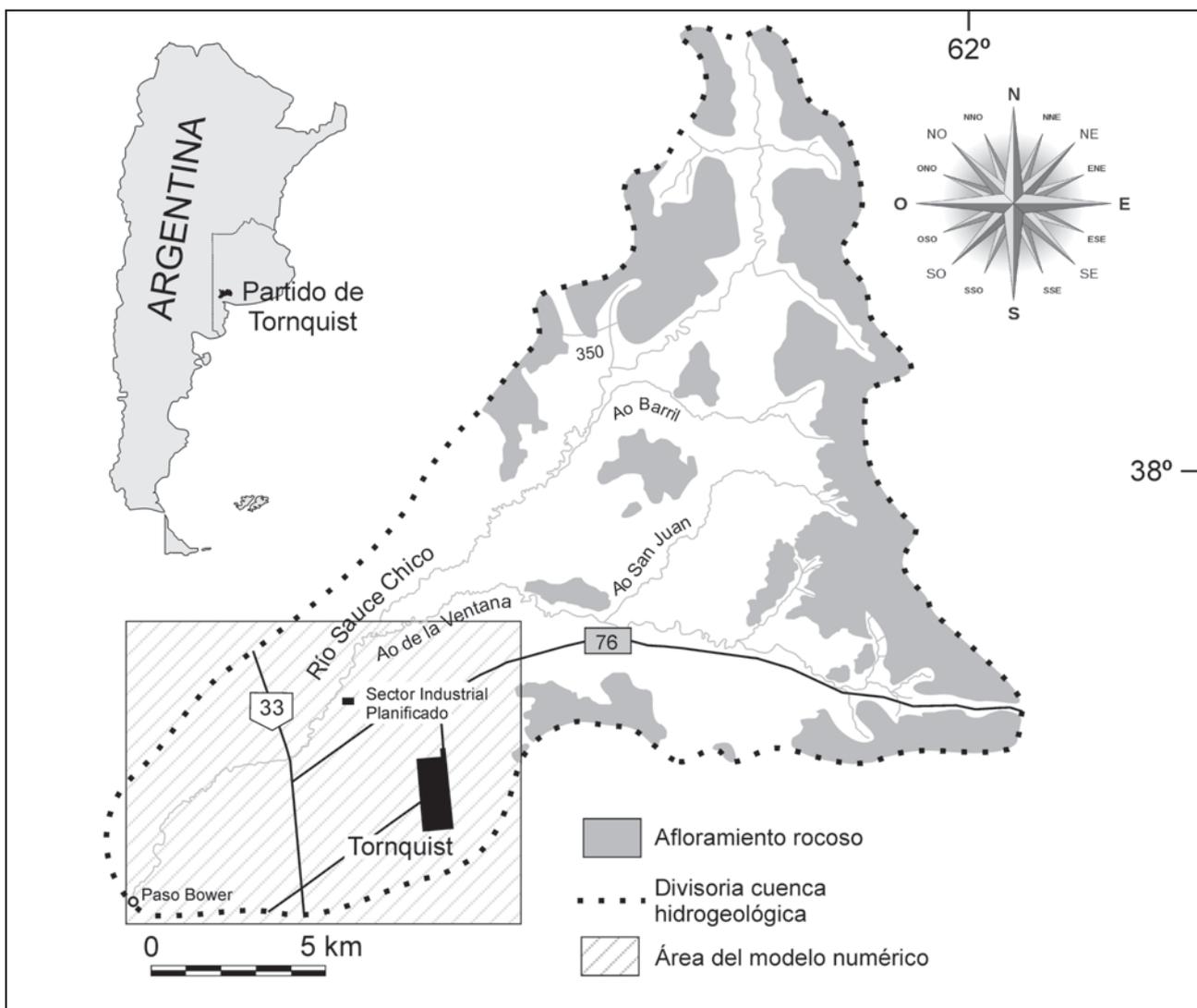


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la cuenca superior del río Sauce Chico.

## Hidrogeología

De acuerdo al esquema hidroestratigráfico que propuso la Dymas (1974e) en el subsuelo de la cuenca superior del río Sauce Chico se reconocen el “basamento hidrogeológico” (o impermeable) y la Sección Epiparaneana. El basamento está compuesto por las rocas paleozoicas predominantemente cuarcíticas, primariamente acuífugas, sobre las cuales, en inmediaciones de las sierras, aparece un paquete de sedimentos, que abarca desde el Plioceno a la actualidad y que conforman la Sección Epiparaneana (Hernández et al., 1979). A efectos del presente trabajo, es la de mayor interés hidrogeológico ya que está en contacto con las fases superficial y atmosférica del ciclo hidrológico y es portadora del acuífero libre. La capa freática está contenida en los “sedimentos pampeanos” ampliamente distribuidos en toda la llanura Chaco-Pampeana del país. Desde un punto de vista hidrogeológico, los “sedimentos pampeanos” tienen un comportamiento acuífero-acuitado, producto de las variaciones litológicas que presentan. Hidráulicamente han sido caracterizados como un medio multicapa que funciona como un sistema único de transmisión del agua.

## Geometría del cuerpo sedimentario acuífero

El registro de perforaciones de poco más de 100 m de profundidad, en el ámbito de las cuencas superiores del río Sauce Grande y Arroyo Napostá Grande (Harrington, 1947; CFI, 1991) indican que los sedimentos pampeanos, en inmediaciones de los afloramientos serranos, se apoyan directamente sobre las rocas paleozoicas cuarcíticas o “basamento hidrogeológico”. El mismo, se profundiza hacia el sudoeste (CFI, 1991; Albouy, 1994) determinado un acuñamiento hacia el sector serrano de la cubierta sedimentaria. La interpretación de nueva información geoelectrónica (Figura 2) relevada en el área de estudio complementada con la anterior (CFI, 1991) ha permitido identificar lo que puede considerarse el hidroapoyo del acuífero freático del área. Los valores de resistividad indican por un lado la zona no saturada parcialmente calcárea ( $> 100$  y entre 50 a 100 ohm.m) y luego la porción acuífera loésica representada por los valores de entre 10 a 20 ohm.m, aunque también se detectan variaciones de resistividades superiores. El hidroapoyo o nivel de baja permeabilidad (limo arcilloso) está representado por la capa de resistividades  $< 10$  ohm.m. Su profundidad es muy variable en el área, encontrándose entre los 100 m, al sur del perfil B-B', hasta los 22 a 26 metros en proximidades al río.

## Acuífero libre: modelo conceptual de funcionamiento

La recarga (R) areal o difusa se verifica en toda la superficie de la cuenca superior del río Sauce Chico, por infiltración directa del agua de lluvia y en forma preferencial en los sedimentos permeables, modernos del piedemonte. Su valor, en base a los balances hídrico a nivel de cuenca y de masas del ión cloruro, se estimó en torno al 15% de la lluvia (Albouy, 1997). Estudios recientes (Lexow et al., 2013) formulan el balance diario de agua en el suelo, para un período de 16 años (1997-2012) a partir de registros pluviométricos continuos de la localidad de Tornquist. Dicho balance se adaptó a las condiciones físicas representativas del área del modelo numérico (tipo, profundidad y textura de suelo, cobertura vegetal, etc.) obteniéndose valores anualizados promedio de un 7,2 % de la lluvia equivalente a 51,9 mm.

Desde un punto de vista hidrodinámico, el sentido general de circulación del flujo subterráneo es NE-SO convergiendo hacia el curso principal del río Sauce Chico y tributarios, lugar donde se produce la descarga natural del flujo local del acuífero.

## Modelo numérico de flujo subterráneo

Utilizando el programa Modflow (McDonald y Harbaugh 1988) en el entorno Visual Modflow Pro 3.1.0, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea por medio del método de diferencias finitas, se diseñó el modelo numérico en una porción del acuífero freático que incluye el denominado Sector Industrial Planificado. El objetivo de la simulación ha sido integrar la información hidrogeológica del acuífero y cuantificar los procesos físicos actuantes. Además, el modelo sirve de base para simular el transporte subterráneo de solutos que permitirá evaluar y establecer el alcance de una eventual contaminación en un intervalo de tiempo determinado. Para la calibración en régimen estacionario se tomó como base el mapa de isopiezas relevado por Albouy (1997) y actualizado durante el estudio del CFI (2011) asumiendo que el mismo representa una condición media temporal de los niveles freáticos (Figura 3).

El área del modelo (Figura 1) abarca una superficie de unos 100 km<sup>2</sup> que se discretizó en 56 filas (desde 0 hasta 8750 m) y 72 columnas (desde 0 hasta 11.250 m) (4032 celdas). Cada celda activa regular, cuadrada, posee una superficie de 0,0244 km<sup>2</sup> (156,25 m de lado) y está limitada, arriba, por el nivel de terreno y abajo por una capa limo-arcillosa que constituye el hidroapoyo del acuífero. La base topográfica se construyó a partir de las Hojas Topográficas del IGM en escala 1:50.000 3963-5-2 (Tornquist) y 3963-5-1 (Estancia Los Cerritos). El área modelada tiene una altura entre 300 msnm (hacia el noreste) y 230 msnm hacia el suroeste. Verticalmente se discretizó el modelo en una sola capa, de espesor variable desde 25 y hasta 100 m. Las condiciones de contorno asignadas

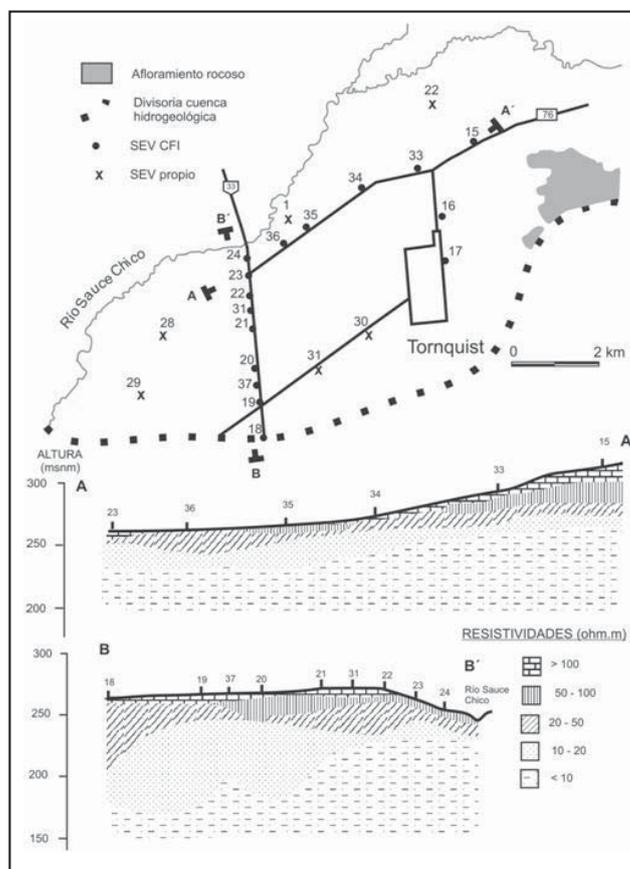


Figura 2. Distribución de sondeos eléctricos verticales y secciones geoelectricas [Modificado de CFI, 1991].

en los límites de la zona de estudio son: a) condición tipo río en coincidencia con el tramo del río Sauce Chico en el área del modelo; b) por el NE y siguiendo la isopieza de 270 m se introdujeron 30 pozos de inyección para simular los caudales de ingreso de agua subterránea y c) hacia el S se impuso una condición de caudal nulo siguiendo una línea de flujo (Figura 4). La relación espacial entre el espesor del acuífero libre y su extensión espacial permiten considerar la dirección del flujo subterráneo, como esencialmente horizontal. El principal ingreso de agua al sistema modelado lo constituye la recarga a partir del agua de lluvia. En base al modelo conceptual descrito en párrafos anteriores, la misma está en el orden al 7% de la precipitación, es decir unos 50 mm/año. El otro ingreso de agua lo constituye el flujo subterráneo proveniente de la porción más alta de la cuenta y que atraviesa la isopieza de 270 m. El único egreso de agua del sistema acuífero lo constituye la descarga al

río como caudal básico. La explotación actual de agua subterránea en la localidad de Tornquist no ha sido considerada debido a que los caudales erogados no impactan sobre el recurso disponible.

### Calibración

La calibración se realizó mediante el método de prueba y error. Los parámetros utilizados en el proceso fueron la conductividad hidráulica del acuífero, la conductancia del río y los caudales subterráneos ingresantes por el borde norte del modelo. La conductividad hidráulica asignada a la capa durante la etapa de calibración fue de 1,5 m/d correspondiente a un valor coherente con los que constan en los trabajos documentados y consultados (Albouy, 1994 y 1997; Bonorino et al., 2000; Albouy et al., 2005; Albouy et al., 2010; Bonorino et al., 2010). La conductancia hidráulica del río se estableció en 1000 m<sup>2</sup>/d valor que arroja una descarga subterránea al curso, consistente con los valores de caudal básico aforados (Albouy, 1994). La conductancia hidráulica (C) se asignó de acuerdo a la conductividad hidráulica de los materiales del fondo (K<sub>o</sub>), la longitud del río en cada celda (L), el ancho del río (W) y el espesor del material del lecho (M) y de acuerdo a la siguiente relación:

$$C = \frac{K_o LW}{M}$$

Para estimar el caudal subterráneo que ingresa al modelo, en principio se impuso, en el borde correspondiente, una condición de nivel fijo. El valor que arrojó el modelo, se ajustó durante la calibración y se contrastó con el que se estimó mediante cálculos basados en el conocimiento hidrogeológico (información freaticométrica, geoelectrica e hidráulica antecedente). El total del flujo que ingresa por este borde norte se cuantificó en unos 1200 m<sup>3</sup>/d. El valor de la recarga introducido, corresponde a un valor medio para el área modelada, por lo que se lo asignó de manera uniforme sobre todas las celdas activas y no se modificó en todo el proceso.

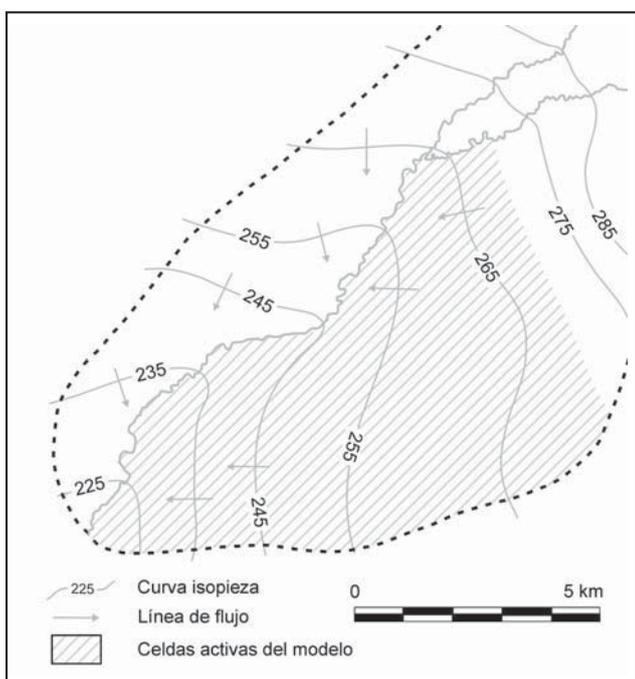


Figura 3. Mapa de isopiezas relevado en campo.

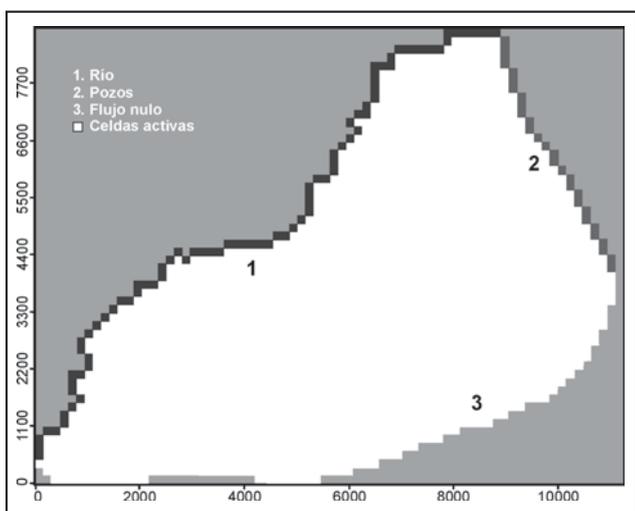


Figura 4. Área modelada: discretización espacial y condiciones de borde.

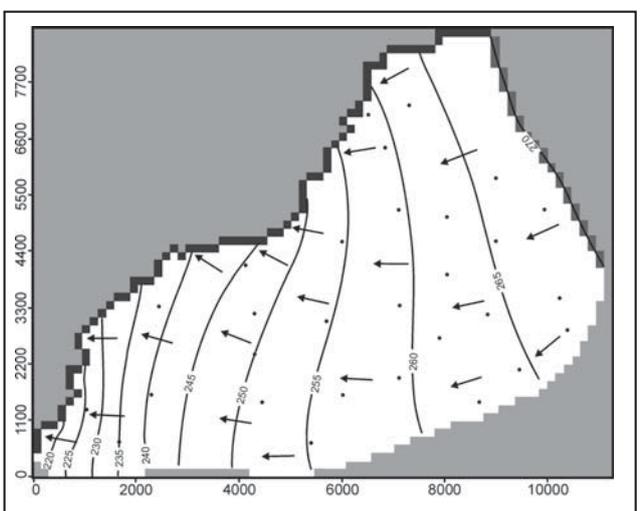


Figura 5. Mapa de isopiezas simulado.

**RESULTADOS**

El ajuste obtenido se evaluó comparando los niveles piezométricos medidos y calculados en 29 pozos de la red de registro del área. El mapa de isopiezas resultado de la calibración en régimen de flujo estacionario, se aprecia en la Figura 5.

El mapa piezométrico simulado reproduce la configuración local de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Además, muestra la relación hidráulica entre el arroyo y el acuífero observándose un comportamiento efluente del curso en todo el tramo del modelo, consistente con las evidencias de campo. El ajuste obtenido indica un coeficiente de correlación ( $r$ ) entre valores medidos y simulados de

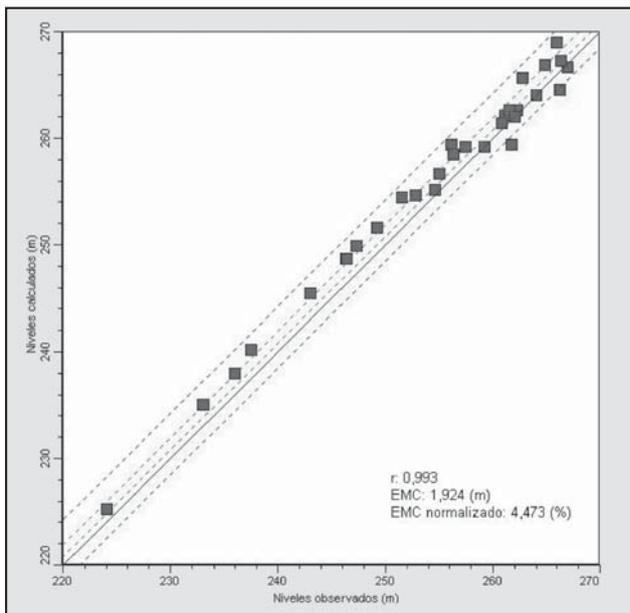


Figura 6. Niveles simulados versus niveles observados.

$r = 0,993$  (Figura 6); el error medio de las estimaciones es de 0,25 m, el medio absoluto de 1,35 y el medio cuadrático (EMC) de 1,90 m (error cuadrático medio normalizado de 4%). Si bien estos errores reflejan cierto grado de incertidumbre entre los valores medidos y simulados, el ajuste se considera satisfactorio y dentro del orden de magnitud de las fluctuaciones temporales de los niveles de agua en el área.

En la Figura 7 puede verse un balance de ingresos y egresos de agua al modelo que totaliza unos 9000 m<sup>3</sup>/d. Las entradas de agua al sistema corresponden a la recarga por agua de lluvia (85%) y flujo subterráneo (13%) que ingresa por la isopieza de 270 m. La única salida de agua del modelo (9000 m<sup>3</sup>/d) lo constituye la descarga al río, equivalente a unos 0,10 m<sup>3</sup>/s semejante a la que puede aproximarse mediante aforos directos con molinete hidrométrico (Albouy, 1994). El balance arroja un ingreso no significativo de agua (2%) a través del curso superficial.

El análisis de sensibilidad en base a la desviación del Error Medio Cuadrático indica que el modelo es sensible a todos los parámetros pero en mayor medida al cambio en los caudales subterráneos impuestos como condición de borde.

**CONCLUSIONES**

El modelo numérico permitió corroborar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero cuantificando los términos del balance agua convirtiéndose en un instrumento para analizar, en el futuro, el transporte de sustancia en el medio acuífero. La modelación numérica constituye una importante herramienta interpretativa que será de suma importancia para diagramar puntos de monitoreo y gestionar eventuales medidas tendientes a la preservación del recurso hídrico subterráneo, fuente de abastecimiento de agua para los usos doméstico e industrial del lugar.

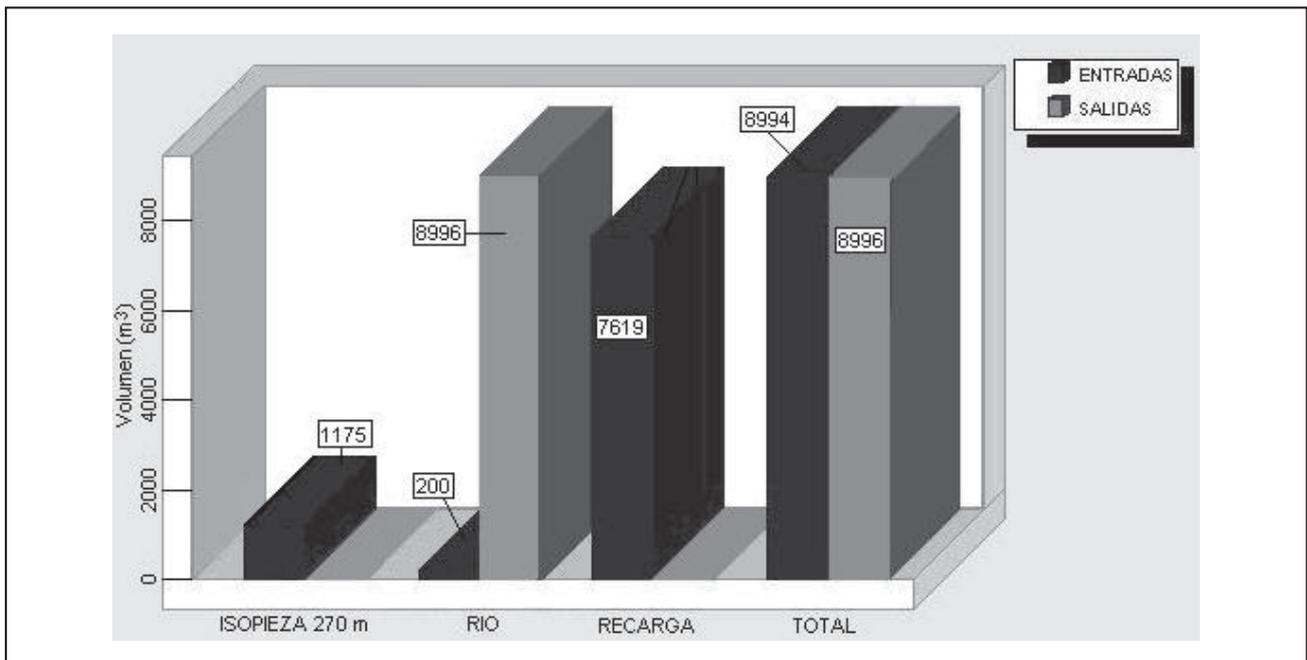


Figura 7. Balance de masas para condiciones estacionarias.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALBOUY, R., 1994.  
Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires.  
*Tesis Doctoral. Biblioteca Central UNS. Bahía Blanca. 140 p. y anexos. (Inédita).*
- ALBOUY, R., 1997.  
Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina. 52 (1): 81-92.*
- ALBOUY, R., CARRICA, J. Y BONORINO, G., 2005.  
Identificación y análisis del fenómeno de drenaje diferido en sedimentos pampeanos. Cuenca del Ao Napostá Chico, provincia de Buenos Aires.  
*IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas (I): 259-268. Río Cuarto, Córdoba.*
- ALBOUY, R., J. CARRICA Y D. LAFONT, 2010.  
Crisis hídrica de la ciudad de Bahía Blanca: sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras, Tomo II: 449-456. Varni, Entraigas y Vives Editores.*
- BONORINO, G., J. CARRICA, R. ALBOUY Y C. LEXOW, 2000.  
Estudio hidrogeológico de la cuenca del Arroyo Napostá Chico. Etapas I, II y III.  
*Convenio AZURIX S.A. - FUNSA. 109 pp. y anexos (Inédito).*
- BONORINO, G., J. CARRICA, R. ALBOUY Y C. LEXOW, 2010.  
Ubicación de la batería de pozos de explotación de agua subterránea para abastecimiento humano en las cercanías de la localidad de Cabildo, partido de Bahía Blanca. Etapa II.  
*Convenio FUNSA-ABSA (Aguas Bonaerenses S.A.). 65 p. y anexos (Inédito).*
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI), 1991.  
Prospección geoelectrica en las cuencas superiores de los arroyos Napostá Grande, Chasicó y río Sauce Chico.  
*Convenio CFI-AGOSBA-UNS (Inédito).*
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI) (CFI), 2011.  
Prefactibilidad de sistematización y aprovechamiento de la cuenca del río Sauce Chico.  
*Fundación de la Universidad Nacional del Sur. Informe Final. Hidrogeología Tomo II: 1-74. (Inédito).*
- DE FRANCESCO, F.O., 1992.  
Estratigrafía del cenozoico en el flanco occidental de las sierras de Curamalal, Sierras Australes bonaerenses.  
*Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas: 3-12. La Plata.*
- DYMAS, 1974E.  
Contribución al mapa hidrogeológico de la provincia de Buenos Aires. Zonas de Bahía Blanca y Norpatagónica.  
*Ex Dirección de Yacimientos, Minería y Aguas Subterráneas. La Plata (inédito).*
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F. Y PASCUAL, R., 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 103-108. Buenos Aires.*
- HARRINGTON, H., 1947.  
Hojas geológicas 33m y 34m: Sierras de Curamalal y de la Ventana, provincia de Buenos Aires.  
*Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín (61), 43 p. Buenos Aires.*
- HERNÁNDEZ, M., FILI, M., AUGE, M. Y CECI, J. H., 1979.  
Geohidrología de los acuíferos profundos de la provincia de Buenos Aires.  
*6º Congreso Geológico Argentino. Actas: 479-500. Bahía Blanca.*
- LEXOW, C., ALBOUY, R., CARRICA, J. Y LAFONT, D., 2013.  
Funcionamiento del sistema hidrogeológico en el área del Sector Industrial Planificado de la localidad de Tornquist (Buenos Aires, Argentina).  
*Agua subterránea recurso estratégico (Eds. N. González, E. Kruse, M.M. Trovatto y P. Laurencena) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp) (1): 58-65.*
- MCDONALD, G. AND HARBAUGH, A., 1988.  
A modular three-dimensional finite-difference Groundwater flow model.  
*US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.*



## Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

### Flooding susceptibility mapping/cartography for Parana river delta

Sepulcri, M.G.<sup>1</sup> ✉ - Flamenco, E.A.<sup>2</sup> - Pizarro, M.J.<sup>3</sup> - Herrera, M.G.<sup>2</sup> - Borus, J.<sup>4</sup> - Giordano L.<sup>4</sup>

Recibido: 18 de marzo de 2015 • Aceptado: 26 de abril de 2015

#### Resumen

*El delta del río Paraná es un ecosistema de alta fragilidad ambiental y susceptible a las inundaciones. La cartografía de susceptibilidad hídrica constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en los sectores agropecuario y forestal. Es importante contar con una estimación de la distribución espacial de los derrames, dependiendo esta del pronóstico de caudales en el mediano plazo. De esta manera se permitirá definir el escenario hídrico que puede fluctuar entre muy seco y muy húmedo. Mediante el procesamiento y clasificación de imágenes satelitales del período 1980-2010 se generaron mapas de susceptibilidad hídrica en un tramo del delta Paranaense. Esta metodología fue aplicada para dos períodos pronosticados: abril-septiembre de 2011 y abril-septiembre de 2013 comparando la cartografía hídrica seleccionada de acuerdo al pronóstico con las imágenes de agua observadas. Se muestra la concordancia entre las imágenes seleccionadas y las observadas. El número de píxeles con agua observado estuvo dentro del rango de número de píxeles con agua de la cartografía seleccionada. El empleo de esta información superpuesta con imágenes de Google Earth permitirá al productor agropecuario, de acuerdo a la ubicación geográfica de su área productiva, tener conocimiento del grado de afectación espacial del agua de acuerdo al pronóstico estacional.*

**Palabras clave:** imágenes satelitales, escenarios hídricos, distribución espacial, pronóstico.

#### Abstract

*Paraná River delta is a high environmental fragility and very susceptible to flooding ecosystem. Water susceptibility cartography is a very useful tool for decision making in the agriculture and forestry fields. It's important to have estimations of the spatial distribution of flooding areas, which is strongly dependent on the midterm seasonal flow forecast. Thus, a hydrological scenario that ranges between very low water and very high water could be defined. High resolution satellite images from 1980-2010 period were processed and classified to obtain water susceptibility maps for one portion of*

1. AE Luján, EEA AMBA (Área Metropolitana de Buenos Aires)-INTA. Dr Negri s/n (6700) Luján, Argentina

✉ sepulcri.maria@inta.gob.ar

2. Instituto de Clima y Agua, CIRN-INTA. Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712) Castelar, Argentina

3. Instituto de Suelos, CIRN-INTA. Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712) Castelar, Argentina

4. Instituto Nacional del Agua. AU Ezeiza-Cañuelas, Tramo J. Newbery Km 1,620 (1804) Ezeiza, Argentina

*Parana River delta. This methodology was applied for two forecasted periods April-September 2011 and April-September 2013 comparing the selected hydrological cartographies according to flow forecast with observed water masks. Good concordance in pixel number was found between selected and observed water maps. This type of information overlapped with Google Earth images and depending on the geographical location of productive areas would allow field producers knowing the degree of damage by water that a certain area could suffer according to seasonal flow forecast.*

**Keywords:** *satellite images, hydrological scenario, spatial distribution, forecast.*

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Plata juega un rol relevante en la economía, recursos hídricos y agricultura de la región (Su et al., 2008). El valle aluvial del río Paraná, en sus tramos medio e inferior, con frecuencia es afectado por inundaciones con daños considerables tanto a nivel social como económico y productivo (Anderson et al., 1993; Camilloni, 2005). Para realizar un manejo eficiente de las cuencas hidrológicas es necesario conocer primero la dinámica hídrica de estos sistemas. La descarga, o caudal del río, ha sido siempre la variable más discutida (Berbery y Barros, 2002) y depende de varios factores como la variabilidad climática (precipitación, evapotranspiración), la topografía, el tipo de suelo, el uso del suelo y las actividades del hombre.

Debido a la compleja génesis de esta llanura podemos encontrar, además de los cauces principales, cauces secundarios, temporarios, diferentes tipos de lagunas y albardones que permiten generar ambientes lóticos, lénticos y terrestres que le confieren al valle una gran heterogeneidad ambiental (Iriando, 1972; Francheschi et al., 1979) y edáfica (Passeggi, 2000). El régimen hídrico de estas islas está condicionado por el régimen del río y por el de las precipitaciones locales. El patrón pulsátil de inundación (Neiff, 1996; Aceñolaza et al., 2003) produce impacto sobre las características geomorfológicas y biológicas de las islas, sumándole temporalidad ecológica a la heterogeneidad geomorfológica, lo cual se refleja en la vegetación.

Existen pronósticos estacionales de caudales en el corto y mediano plazo (5-10 días y 6 meses, respectivamente) que ayudan a la toma de decisiones por parte de los productores y funcionarios públicos, como así también a los habitantes de la zona. Es importante tener pronósticos confiables y asimismo es menester brindar información sobre la distribución espacial de las aguas bajo distintos escenarios hidrológicos, los que conforme al pronóstico hidrológico estacional (Flamenco, 1998) pueden clasificarse como de aguas muy altas, altas, normal, bajas y muy bajas. Para llegar a obtener mapas de áreas afectadas por agua se requiere, indefectiblemente, disponer de pronósticos estacionales de caudales en la zona de estudio, a modo de poder evaluar la susceptibilidad hidrológica del área. El concepto de susceptibilidad está referido a la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico. Las áreas que más rápidamente quedan bajo agua ante la ocurrencia de un evento son las de mayor susceptibilidad hídrica. La susceptibilidad a inundaciones es la probabilidad que una inundación ocurra en un área en base a las condiciones locales del terreno (Soldano, 2009). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue producir una cartografía de susceptibilidad hídrica para un sector del delta Paranaense utilizando imágenes satelitales de alta resolución y contribuir con información de utilidad para el sector agropecuario y forestal, debido a la importancia de estos sectores en la región. Esta cartografía

constituirá una herramienta para el productor agropecuario, que será de fácil acceso. Asimismo contribuirá en la toma de decisiones ante la ocurrencia de eventos importantes como sequía o inundación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área y período de estudio

En la porción inferior de la cuenca del Río Paraná se extiende la Región del Delta, situada entre las latitudes 32° 5' S, al sur de la ciudad de Diamante (Entre Ríos) y 34° 29' S, próxima a la ciudad de Buenos Aires (Figura 1). Con una longitud de aproximadamente 320 km, la superficie cubre una cifra cercana a los 17.500 km<sup>2</sup> (Bonfils, 1962; Canevari et al., 1999). Dentro de la misma se hallan zonas situadas al sur de la provincia de Entre Ríos (Malvárez, 1999) actualmente sujetas a procesos fluviales y áreas anegables sin influencia fluvial.

Varios autores han subdividido a esta región basándose en distintos criterios, como es el caso de Iriando (2004) quien bajo la denominación de "Complejo Litoral" subdividió al área en 10 unidades geomorfológicas. Otro ejemplo es el de Malvárez (1999) quien se basó en el análisis conjunto de patrones de paisaje, régimen hidrológico y tipo de vegetación. Considerando que esta última zonificación es más acorde a los fines de este estudio, en la Figura 1 se encuentran demarcadas las 11 unidades de paisaje resultantes del trabajo mencionado.

El área de estudio definida para este trabajo (Figura 1), abarca la totalidad de algunas unidades de paisaje (B, C1, D, E, G) y fracciones en el caso de otras (A, C2, C3, F, H e I). En general, la mayoría de estas áreas comprenden distintos tipos de bosques, praderas, sabanas de litoral, arbustales, isletas de bosques y lagunas de llanura. Para mayor detalle sobre estas áreas se recomienda la lectura del trabajo mencionado.

La información de caudales mensuales y alturas hidrométricas del río Paraná fue provista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. En la etapa inicial de esta investigación se definieron los escenarios hídricos y posteriormente para cada uno de ellos se seleccionaron las fechas posibles a analizar. Para tal fin, se trabajó con la serie histórica de caudales medios mensuales del río Paraná en Corrientes, período 1904/05 - 2008/09, información hidrológica amplia y confiable (serie de caudales medios mensuales de más de 100 años). La estación hidrométrica ubicada en la localidad de Corrientes presenta la mayor historia de aforos líquidos en el río Paraná desde Posadas hasta su desembocadura. Asimismo, uno de los coautores afirma sobre la confiabilidad de estos datos debido a que se ha revisado la curva de descarga de dicha sección en el marco del Proyecto Paraná Medio de Agua y Energía Eléctrica, Sociedad del Estado (AyEE, SE). Por otra parte, dentro del mismo Proyecto se ha evaluado la curva de doble masa o acumulación de volúmenes anuales (período 1905-2002) pertenecientes

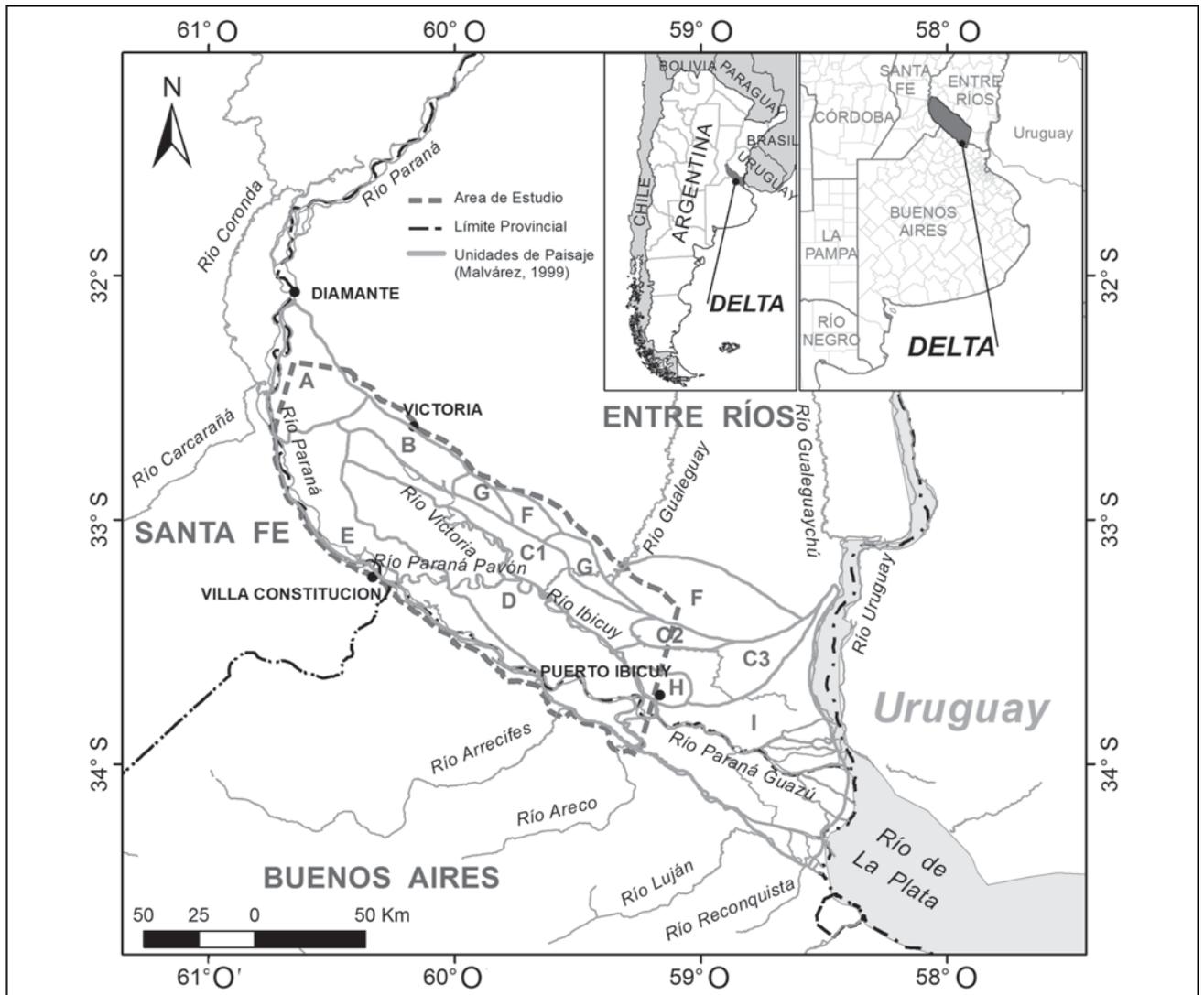


Figura 1. Delta del Río Paraná [Argentina]. Delimitación del área de estudio. Unidades de paisaje modificadas a partir de Malvárez, 1999.

a la estación Timbúes, ubicada aguas arriba de Rosario. En este caso se demostró una diferencia negativa de aproximadamente un 10 % con respecto a los datos de Corrientes, lo que convierte a esta serie de datos como poco consistente. Por lo tanto, para la caracterización del régimen hídrico fue conveniente entonces utilizar los datos de caudales anuales provenientes de la estación Corrientes, que asimismo es la única sección donde se han desarrollado los dos modelos estacionales (semestrales) de pronóstico que son el insumo principal para luego proceder a la elección de la cartografía de susceptibilidad hídrica. Del mismo modo, en función del análisis en Corrientes, se identificaron en el puerto de San Pedro (situado en el delta del río Paraná) períodos correspondientes a cada año hidrológico más acotados, considerando en este caso alturas hidrométricas, con el objetivo de ajustar los períodos o fechas para la búsqueda de imágenes satelitales.

Para cada año se calculó el caudal medio del año hidrológico (Setiembre-Agosto) y se aplicaron sobre dicha serie temporal funciones de distribución (Pearson, Log-Pearson y Gumbel). La función de mejor ajuste fue la de Gumbel. Sobre la base de estos resultados, se establecieron los umbrales para la clasificación del régimen hídrico del río Paraná cuyos valores y

categorías se detallan en la Tabla 1. A partir de la caracterización del régimen hídrico se seleccionaron años hidrológicos para cada categoría desde el año 1980, donde se comienza a disponer de imágenes satelitales.

Por otra parte, el año hidrológico se dividió en dos períodos (abril-septiembre y octubre-marzo) en base al régimen de lluvias y la probabilidad de ocurrencia de un evento inundación. En términos generales, durante la temporada de primavera-verano el régimen de lluvias es más importante y en consecuencia las crecidas ocurren frecuentemente durante este período. Durante la temporada otoño-invierno el estado de aguas suele ser de estiaje. No obstante, existe la probabilidad que ocurran situaciones atípicas donde las lluvias se produzcan durante el invierno y como consecuencia ocurran inundaciones, tal como sucedió en los años 1983 y 1992. Otro aspecto importante a mencionar es que debido a que la serie de datos de caudales seleccionada corresponde al puerto de Corrientes y que éste no se halla dentro del área de estudio, se debe tener en cuenta la existencia de un retraso de entre 30 y 60 días entre la ocurrencia de una onda de crecida registrada en dicho puerto y el puerto de Rosario.

**Tabla 1. Régimen hídrico del caudal medio anual [m<sup>3</sup>/s] del río Paraná en Corrientes.**

Probabilidad excedencia (%)	Caudal medio anual (año hidrológico) 1904/05-2008/9	Régimen hídrico
20	20100	Muy húmedo
40	17400	Húmedo
60	15500	Normal
80	13600	Seco
Mediana	16400	
Media	17000	

**Información satelital**

Sobre la base de los períodos hidrológicos correspondientes al puerto de San Pedro se seleccionaron las imágenes satelitales para el área de estudio, que en total fueron 56. Las imágenes empleadas para este análisis fueron adquiridas por el sensor Thematic Mapper (TM 5) del satélite Landsat 5 y posterior al año 2013 por el sensor Operational Land Imager (OLI) del satélite Landsat 8. Las mismas fueron provistas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CONAE), el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) y el U. S. Geological Survey (USGS). La elección de la fuente de imágenes estuvo basada en la resolución espacial y espectral de las mismas, siendo la primera de 30 metros, lo cual permite tener una visualización a nivel de lote. Con respecto a la resolución espectral, estas imágenes están compuestas por 6 bandas que dentro del espectro electromagnético se hallan en el rango del visible (3 bandas), infrarrojo cercano (una banda) e infrarrojo medio (dos bandas). La resolución temporal de estas imágenes es de 16 días. De las pasadas del satélite Landsat se tomó la correspondiente al path/row 226-083, que captura principalmente el tramo medio del delta (desde Villa Constitución hasta el puerto de Ibicuy). Cada path/row cubre una superficie de 185 x 185 km. Del registro total de imágenes disponibles se seleccionaron aquellas que no presentaran nubes o su porcentaje fuera mínimo. Asimismo, hubo fechas para las cuales no se dispuso de imágenes. Las fechas de las imágenes disponibles se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Cantidad y fechas de imágenes disponibles para cada subperíodo (Abril-Septiembre); (Octubre-Marzo) y para cada escenario hidrológico.**

Escenario	Fechas de imágenes	
	Abril-Septiembre	Octubre-Marzo
Húmedo	17/04/1992	12/01/2010
	23/08/1992	
	02/04/1998	
	05/06/1998	
	09/09/1998	
	29/05/2007	
Normal	26/05/2003	27/03/1996
	05/04/2005	23/02/2003
		04/03/2005
Seco	02/05/2009	26/01/2000
		10/01/2009

A cada una de las imágenes satelitales se le realizó una corrección geométrica para darles proyección geográfica. En este caso se utilizó Transversal Mercator Faja 5 con Datum WGS84. Por otra parte, se realizó una calibración radiométrica y corrección atmosférica. En cuanto a ésta última, se utilizó la técnica "Dark Object Substraction" (DOS), la cual asigna al valor mínimo de cada banda la propiedad de cuerpo negro igualando su reflectividad a cero. Posteriormente, este valor se resta a cada píxel de cada banda. Para realizar este procedimiento se utilizó el software ENVI® y de éste la función Dark Subtract. A continuación, para cada una de las imágenes coincidentes con las fechas seleccionadas se calcularon índices normalizados de vegetación (NSVI), suelo (NDSI) y agua (NDWI) utilizando información espectral en las longitudes de onda del visible (VIS): rojo (R) y verde (V), infrarrojo cercano (IR) e infrarrojo medio (SWIR) (Tabla 3). A partir del cálculo de estos índices se realizó un compuesto de tres bandas en falso color compuesto, filtrando por el rojo al NDSI, por el verde al NDVI y finalmente por el azul al NDWI, según lo propuesto por Takeuchi y Yasuoka (2005). Estos autores denominaron al compuesto como NDXI, obteniéndose como resultado un mapa temático donde las superficies con agua aparecen con predominio de color azul, la vegetación con predominio de color verde, mientras que el suelo desnudo, la vegetación seca y las áreas urbanas oscilan entre el rojo y amarillo generando tonalidades anaranjadas. Esta misma metodología fue aplicada por *Rodríguez et al., 2009* para evaluar coberturas de suelo, por *Rodríguez et al., 2010* para evaluar zonas inundadas en la Pampa húmeda y por *Edrosa et al., 2009* para generar una cartografía de susceptibilidad a inundaciones en las islas del delta superior y medio del río Paraná. Cada imagen resultante se obtuvo bajo dos formatos: byte y punto flotante. La primera para ser posteriormente clasificada y la segunda para ayudar en la separación de clases a partir de la interpretación de los histogramas. Cada imagen en formato byte fue clasificada según la metodología ISODATA estableciendo un criterio de 30 clases como máximo. Los algoritmos de clasificación permiten agrupar píxeles en base a sus similitudes espectrales, las cuales permiten encontrar un correlato entre las características de la región y alguno de los elementos de paisaje a identificar.

**Tabla 3. Fórmulas y bandas espectrales correspondientes a las imágenes Landsat 5 y 8 utilizadas para el cálculo de los índices de vegetación (NDVI), suelo (NDSI) y agua (NDWI).**

Índice	Fórmula	Bandas Landsat 5	Bandas Landsat 8
NDVI	(IR-R)/(IR+R)	3 (VIS,R); 4 (IR)	4 (VIS,R); 5 (IR)
NDSI	(SWIR-IR)/(SWIR+IR)	5 (SWIR); 4 (IR)	6 (SWIR); 5 (IR)
NDWI	(VIS-SWIR)/(VIS+SWIR)	2 (VIS,V); 7 (SWIR)	3 (VIS,V); 7 (SWIR)

Los algoritmos no supervisados permiten encontrar clases sin conocimiento previo de su existencia. Una vez corrida la clasificación no supervisada, se procedió a clasificar cada píxel de cada imagen en dos posibles categorías: agua y no agua, asignando valores de 1 y 0 respectivamente, basándose en los valores de los índices (NDVI, NDSI y NDWI) y en sus distribuciones de frecuencias.

Posteriormente, cada una de las imágenes se transformó a máscara de agua con el objetivo de visualizar independientemente cada escenario hídrico en un sistema de información geográfico (SIG). Por otra parte, con el conjunto de imágenes procesadas se estableció la frecuencia con que cada píxel estuvo ocupado por agua en todos los períodos evaluados (seco,

normal y húmedo). Para ello se agruparon las imágenes según el escenario hídrico, siendo un total de 7 imágenes para el período húmedo, 5 para el normal y 3 para el seco. A continuación, se sumaron las tres imágenes obteniendo la frecuencia (de 0 a 1) con que cada píxel estuvo ocupado por agua. Los píxeles con una frecuencia cercana a 1 indican que esas zonas, independientemente del escenario, estuvieron ocupadas por agua. Por lo tanto corresponden a cursos de agua permanentes. A continuación, se establecieron rangos para clasificar las frecuencias con que cada píxel estuvo ocupado por agua en muy seco, seco, normal, húmedo y muy húmedo.

## RESULTADOS

A partir de la clasificación no supervisada de las imágenes se determinaron las clases agua y no agua y se asignaron valores de 1 y 0, respectivamente, en base a los criterios citados a continuación. En general, para la clase agua el valor medio de NDWI es de 0,22. Sin embargo, los cursos de agua permanentes presentan valores de este índice que oscilan entre 0,6 y 0,8 (Rodríguez et al., 2009). En general, los valores de NDSI

aportan muy poco a la diferenciación de clases ya que son generalmente negativos y próximos a cero. El índice de vegetación (NDVI) presenta un valor medio de 0,4 para la vegetación, mientras que para la clase agua suelen ser negativos o muy bajos próximos a cero. En este caso suelen presentar un correlato negativo con el NDWI. Por lo tanto se puede considerar que aquellas clases cuyas distribuciones de frecuencia de NDWI caracterizadas por valores en su mayoría positivos y distribuciones de NDVI fuertemente negativas son agua. Sin embargo, en el caso de las zonas ribereñas los valores de NDVI aumentan como consecuencia de la vegetación presente. En este caso, si la distribución de valores de NDWI muestra valores positivos en un 60% ó más sumado a valores de NDVI positivos y bajos esta clase es considerada como agua.

Como resultado se obtuvieron máscaras de agua para cada una de las escenas analizadas. De esta manera fue posible visualizar la superficie ocupada por agua en las distintas fechas. A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra dos escenarios hídricos opuestos: muy húmedo y muy seco y la distribución espacial de las áreas con agua en cada uno.

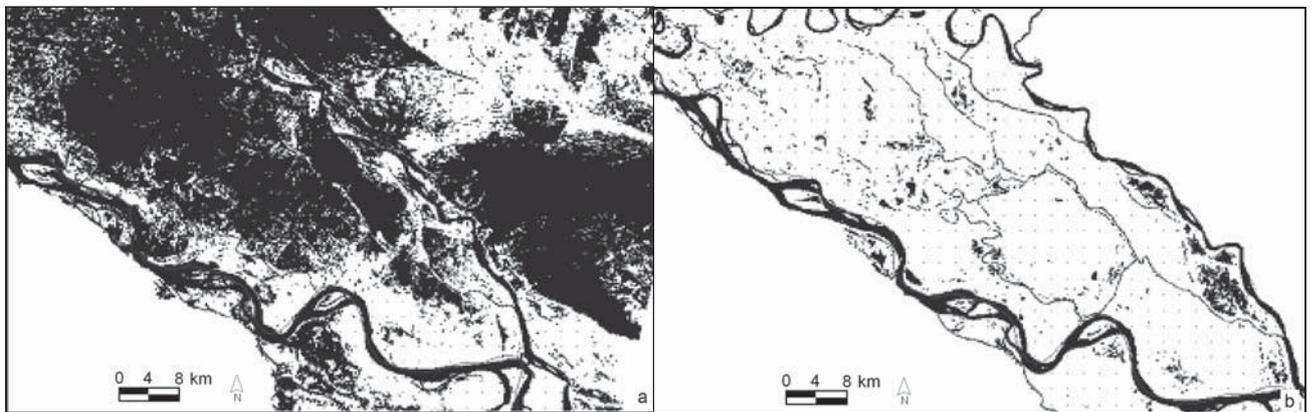


Figura 2. Máscaras de agua correspondientes a dos escenarios hídricos opuestos: a. 29 de mayo de 2007 (clasificado como muy húmedo) y b. 10 de enero de 2009 (clasificado como muy seco).

Por otra parte, se estableció la frecuencia con que cada píxel estuvo ocupado por agua durante todo el período de estudio. Como resultado se obtuvo una imagen cuyos valores por píxel fluctuaron entre 0 y 1. Para visualizarlo en un mapa con la distribución espacial del agua según cada escenario hidrológico, se clasificaron las frecuencias en rangos que variaron desde el estado muy seco hasta el muy húmedo en una escala colorimétrica, obteniendo el mapa de susceptibilidad hídrica (Figura 3). Para ello se empleó la metodología estadística conocida como "natural breaks" o algoritmo de Jenks, que calcula las diferencias entre los valores de los píxeles ordenados de forma creciente proponiendo un límite o punto de quiebre para separar en rangos de modo que las diferencias entre grupos se maximicen y se minimicen dentro de cada grupo (Jenks, 1967). Este algoritmo trabaja con cinco clases, de manera que coincide con la cantidad de rangos de frecuencias o escenarios que se definieron en este trabajo (muy seco, seco, normal, húmedo y muy húmedo). Los límites, en número de píxeles ocupados por agua dentro de cada rango, a partir de los cuales se definió cada escenario figuran en la Tabla 4.

Nótese que en la Figura 3 se aprecia el estado de aguas para cada uno de los escenarios hidrológicos, los cuales a medida que avanzan en el estado hacia mayor humedad se van

sumando a las superficies ocupadas por agua. En el caso del período muy seco, por ejemplo, se observa que solamente están ocupados por agua los píxeles correspondientes a los cursos de agua permanente (color rojo). De esta manera, cada color nuevo que aparece en la figura incluye la superficie ocupada por agua del estado anterior.

Tabla 4. Cantidad de píxeles con agua, superficie representada y porcentaje del total. Obtenidos de aplicar el algoritmo "Natural Breaks" para definir los escenarios hidrológicos posibles.

Escenario	Nº píxeles con agua	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
Muy Seco	0 a 939803	< 845,82	< 7
Seco	939804 a 1848900	845,83 a 1664,01	7,1 a 14
Normal	1848901 a 3244315	1664,02 a 2919,88	14,1 a 24
Húmedo	3244316 a 7063083	2919,88 a 6356,77	24,1 a 53
Muy Húmedo	7063084 a 11564581	> 6356,77	> 53,1

Asimismo, este mapa de susceptibilidad se superpuso con imágenes satelitales de Google Earth en un sitio web de libre acceso conocido como GeoINTA (<http://geointa.inta.gov.ar/visor/>). Allí se pueden visualizar los escenarios individualmente

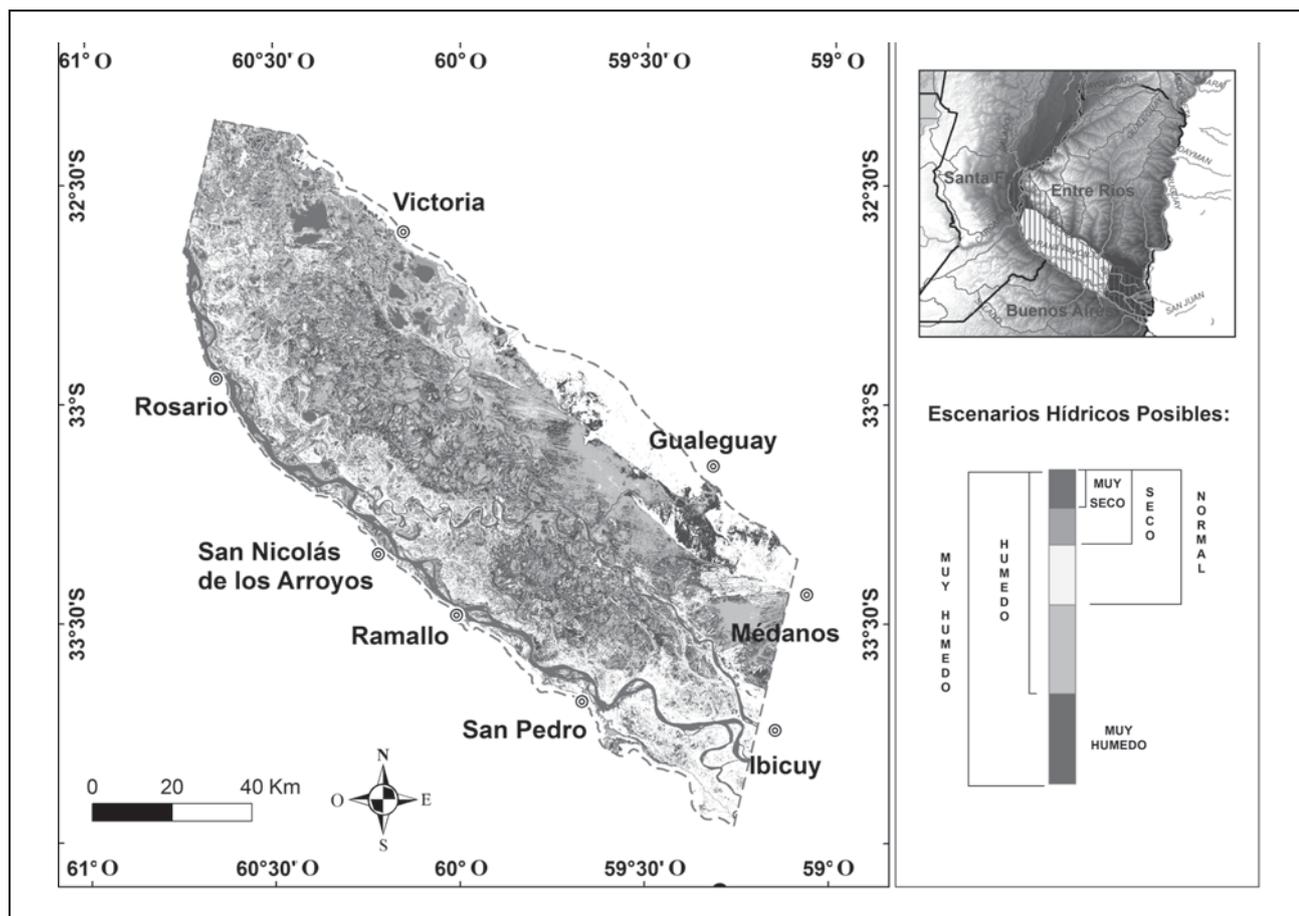


Figura 3. Cartografía de susceptibilidad a inundación y sequía del delta del Río Paraná. Escenarios Hídricos Probables: Muy Seco, Seco, Normal, Húmedo y Muy Húmedo.

al ingresar a la opción “Delta del río Paraná dentro de la pestaña “Proyectos” (Figura 4). Inmediatamente aparecen las opciones de los cinco escenarios hidrológicos para seleccionar y en la imagen se puede ver demarcada la región de estudio de este trabajo. De esta manera, se brinda una herramienta pública que permite localizar establecimientos en particular por sus coordenadas geográficas de latitud y longitud y observar simultáneamente el predio sobre imágenes de Google Earth y el mapa de susceptibilidad hídrica. De esta forma es posible visualizar el nivel de riesgo presente en un establecimiento determinado, ante la presencia o pronóstico de cualquiera de los escenarios descriptos.

**Aplicación de la metodología sobre dos periodos observados**

***Abril - Septiembre de 2011***

El pronóstico del volumen estacional acumulado para el semestre Abril-Septiembre de 2011 fue de 264000 hm<sup>3</sup> (valor más probable). Considerando una banda de confianza del 50 % los límites superior e inferior corresponden a los 229000 hm<sup>3</sup> y 299000 hm<sup>3</sup>. En situaciones normales el volumen acumulado en el río Paraná en el puerto de Corrientes en este período varía entre 227000 y 264000 hm<sup>3</sup> (análisis estadístico de la serie histórica 1905-2008 para el volumen acumulado entre Abril-Septiembre). Por lo tanto, durante la temporada otoño-invierno

2011 se esperó una temporada normal según el volumen pronosticado. Es decir con caudales medios mensuales normales o ligeramente por encima de lo normal, con tendencia a húmedo. En base a esto se seleccionó como posible cartografía de susceptibilidad hídrica el escenario análogo al pronóstico (Figura 5.a). Asimismo, para constatar la correcta elección del escenario pronosticado se obtuvieron dos imágenes correspondientes al final del período Abril-Septiembre 2011. Se encontraron dos imágenes disponibles: una del 28 de agosto y otra del 29 de septiembre, las cuales fueron procesadas y clasificadas para obtener las máscaras de agua siguiendo la metodología planteada en este trabajo. Como resultado, se obtuvieron las imágenes que se muestran en la Figura 5.b y c. Como consecuencia, se observa que el escenario seleccionado de acuerdo al pronóstico tuvo concordancia con los datos observados y, a su vez, que el pronóstico de caudales normal con tendencia a húmedo fue válido. La imagen de fines de agosto de 2011 muestra un panorama normal, mientras que la de fines de septiembre del mismo año ya se encuadra en un escenario húmedo. Asimismo, se calculó el porcentaje de píxeles ocupados por agua para cada una de las imágenes. En el caso del 28 de agosto se obtuvo un valor de 23 % y para el 29 de septiembre el valor fue de 34 %. Esto concuerda con lo observado en las imágenes y si se compara con los datos que muestra la Tabla 4, los porcentajes se hallan dentro del rango de un escenario normal en el primer caso y de un húmedo en la segunda fecha.

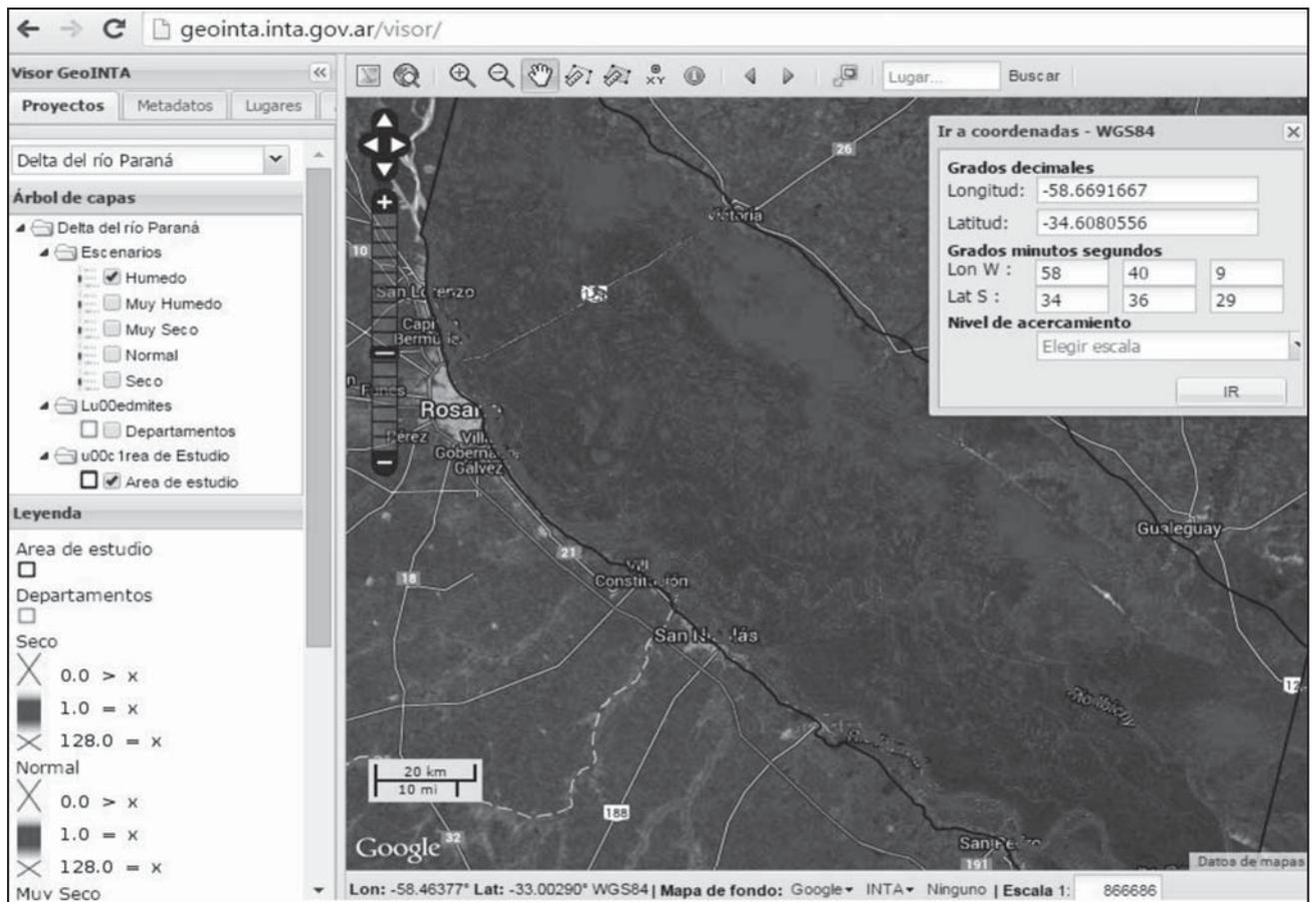


Figura 4. Visor GeoINTA, Cartografía de susceptibilidad hídrica del Delta del río Paraná. Escenario húmedo sobre imagen Google Earth.

### *Abril - Septiembre de 2013*

En esta oportunidad se procesó la imagen observada hacia el final del período, precisamente el día 17 de agosto de 2013. La máscara de agua obtenida corresponde con un escenario clasificado como húmedo. Por otra parte el volumen observado en el puerto de Corrientes fue de 301.200 hm<sup>3</sup>, que se corresponde con el escenario mencionado. En este caso se procedió a comparar la imagen observada con la cartografía de susceptibilidad hídrica análoga a dicho escenario (Figura 6). Asimismo se calculó el porcentaje de píxeles ocupados por agua en la imagen observada (49%) y se comparó con el rango de píxeles que posee un escenario húmedo (24,1% a 53%), encontrando concordancia entre los mismos.

### DISCUSIÓN

El mapa de susceptibilidad hídrica resultante permite dar una idea de la distribución espacial de píxeles ocupados por agua para cada escenario hidrológico, que a su vez depende de los pronósticos estacionales de derrames para el río Paraná en la estación hidrométrica del puerto de Corrientes. Estos pronósticos surgen como resultado de la corrida de un modelo que utiliza como herramienta las Redes Neuronales Artificiales y son publicados semestralmente por el Instituto de Clima y Agua del INTA. El primero en Setiembre [año i] para el período Octubre [año i] - Marzo [año i+1] y el segundo en Abril [año i+1]

para el período Abril - Setiembre [año i+1] y en función de éstos se selecciona la cartografía correspondiente. La superposición del mapa de susceptibilidad hídrica con las imágenes de Google Earth brinda la posibilidad de estimar para cada período estacional el grado de susceptibilidad a inundación y/o sequía probable para cualquier localización geográfica dentro del sector estudiado. Por otra parte, es importante destacar que la cantidad de imágenes disponibles para el período seco fue muy baja y consecuentemente su bondad para representar la cartografía de susceptibilidad hídrica. A esto se suma que el escenario hídrico seco es el más difícil de analizar, ya que es muy dependiente de la situación antecedente y muy sensible a las lluvias locales. Asimismo, dentro del escenario húmedo correspondiente con el sub período Octubre-Marzo se dispuso de una sola imagen (Tabla 2). Esto indica que habría que continuar con la investigación incluyendo imágenes actuales para ampliar la serie histórica y obtener una mejor representación de la cartografía de susceptibilidad hídrica. A su vez, las imágenes que se vayan incorporando permitirán realizar a futuro una validación de la cartografía producida. Esta investigación no incluyó en su metodología la validación propiamente dicha de la cartografía de susceptibilidad generada debido a que sobre los 19 años analizados, fue posible utilizar sólo 15 imágenes, que abarcaron solamente 8 eventos. De esta manera no resultó conveniente separar un grupo de imágenes para la etapa de validación. No obstante, se seleccionaron imágenes correspondientes al

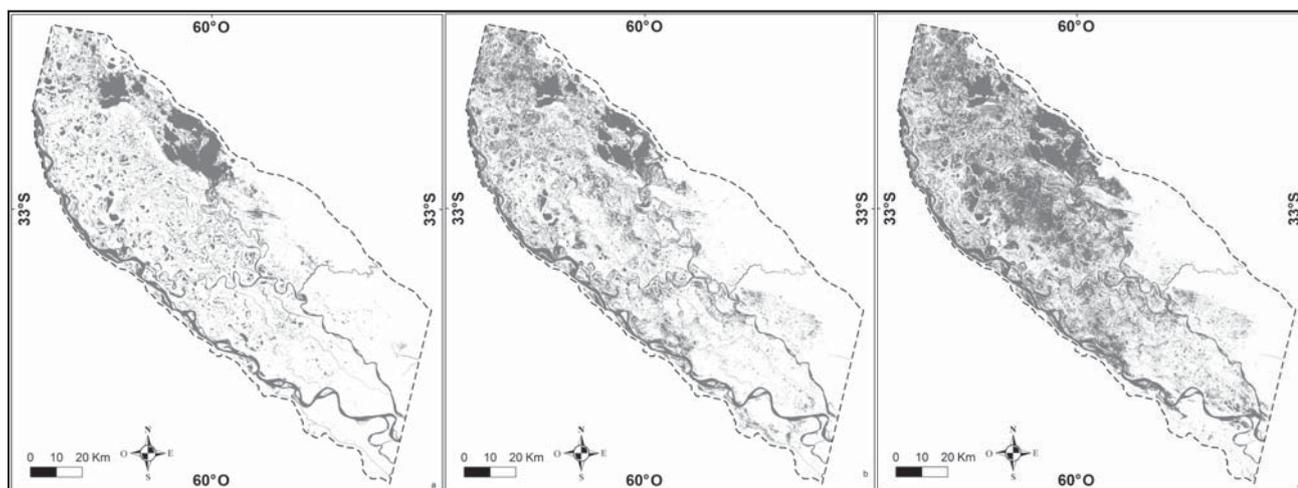


Figura 5. Superficie ocupada por agua en a. escenario hídrico normal y en dos fechas observadas b. 28 de agosto de 2011 y c. 29 de septiembre de 2011.

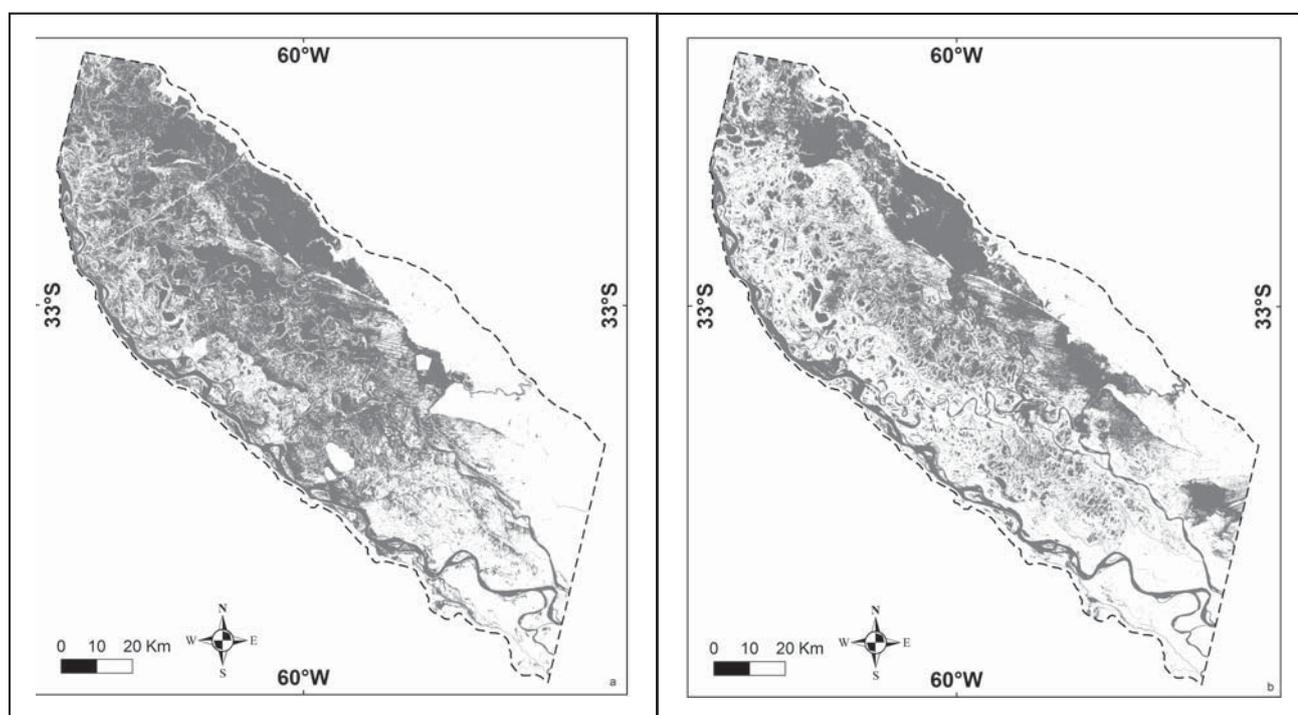


Figura 6. Escenario hídrico húmedo (a) y observado el 17 de agosto de 2013 (b).

período que fue pronosticado durante la realización del trabajo (Abril-Septiembre de 2011), pudiendo acceder a una validación informal de la cartografía resultante. En este caso, se demostró que los datos observados hacia fines del período estacional pronosticado estuvieron dentro de los rangos del pronóstico y la cartografía seleccionada. Posteriormente, se pudo constatar una imagen observada a fines del período Abril-Septiembre de 2013 donde se pudo comparar un escenario observado como húmedo con la cartografía de susceptibilidad hídrica homóloga. De aquí en adelante para los escenarios hídricos planteados se seleccionarán imágenes a intervalos regulares que ayudarán a evaluar la confiabilidad de esta cartografía hídrica junto con los resultados de los pronósticos estacionales, para

cada uno de los semestres. Finalmente se menciona que durante el año 2014 INTA inició la ejecución de proyectos relacionados a la temática agua, en el marco del recientemente aprobado Programa Nacional Agua. Un producto comprometido en uno de estos proyectos (PNAGUA-1133024) es la validación a campo de la cartografía generada para el Delta del río Paraná. Como actividad principal se están realizando gestiones ante productores agropecuarios con establecimientos ubicados en el área en estudio con la finalidad que éstos informen en cada período (Abril-Setiembre y Octubre-Marzo) si su área ha sido, o no, ocupada por agua, con el objetivo de verificar "in situ" la confiabilidad del producto obtenido con imágenes satelitales.

## CONCLUSIONES

Por medio de esta sencilla herramienta el productor puede combinar la información de imágenes de Google Earth con los mapas de susceptibilidad hídrica a través de las coordenadas geográficas del campo en una página web de libre acceso. De esta manera podrá conocer en forma directa en qué medida su

campo podría ser afectado por agua según el escenario hidrológico elegido de acuerdo al pronóstico estacional, también publicado por INTA en una página web de acceso libre. Esta información es de gran utilidad para la toma de decisiones ya sea para realizar un ordenamiento territorial, planificar el ecoturismo y las prácticas agrícolas, ganaderas y forestales.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ACEÑOLAZA, P.H.; POVEDANO, A.; MANZANO, J.; DE DIOS MUÑOZ, J.; ARETA Y RONCHI VIRGOLINI, A.L., 2003. Biodiversidad del Parque Nacional Pre-Delta. *Serie Miscelánea. INSUGEO*, 12: 169-184.
- ANDERSON, R.J.; RIBEIRO DOS SANTOS, N.D. AND DIAZ, H.F., 1993. An analysis of flooding in the Paraná/Paraguay River basin. *World Bank, Latin America Tech. Dept., Environment Division, LATEN Dissemination, Note 5, 19 pp.*
- BERBERY, E.H. AND BARROS, V.R., 2002. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 3 (6): 630-645.
- BONFILS, C.G., 1962. Los suelos del Delta del río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso. *Revista de Investigaciones Agrícolas*, XVI (3): 257-370.
- CAMILLONI, I.A., 2005. Extreme flood events in the Uruguay River of South America. *VAMOS Newsletter, No. 2, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, pp 23-25.*
- CANEVARI, P.; BLANCO, D.E.; BUCHER, E.; CASTRO, G.; DAVIDSON, I., 1999. Los humedales de la Argentina. Clasificación, situación actual, conservación y legislación. *Wetlands International, Publicación N° 46.*
- EDROSA, R.; SOLDANO, A.; SERAFINI, M.C., 2009. Generación de cartografía sobre susceptibilidad a inundaciones en las Islas del Delta Superior y Medio del río Paraná. *Mapping: Map and Sig consulting*, 131: 75-78.
- FLAMENCO, E.A., 1998. Pronóstico de inundaciones en el río Paraná en Corrientes, basado en el fenómeno ENSO. *Bulletin de l' Institut Français d' Études Andines*, 27 (3): 807-818.
- FRANCHESCHI, E. A. Y LEWIS J. P., 1979. Notas sobre la vegetación del valle santafecino del Río Paraná (R. Argentina). *ECOSUR*, 6: 55-82.
- IRIONDO, M., 1972. Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás, República Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 27: 155-160.
- IRIONDO, M., 2004. The littoral complex at the Paraná mouth. *Quaternary International*, 114: 143-154.
- JENKS, G.F., 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7: 186-190.
- MALVÁREZ, A.I., 1999. El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En A.I. Malvárez (ed.). *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Oficina Regional de Ciencia y Técnica para América Latina y el Caribe (ORCyT) MAB/UNESCO. Montevideo, Uruguay, pp 35-54.*
- NEIFF, J.J., 1996. Large rivers of South América: toward the new approach. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 26: 167-180.
- PASSEGGI, E., 2000. Caracterización sedimentológica del material parental de los suelos asociados a los depósitos de cauce del tramo medio del Río Paraná. *Tesis doctoral. Universidad Católica de Santa Fe, 216 pp.*

- RODRÍGUEZ, D.M.; BOLZI, S.C.; VELASCO, I., 2010.  
Evaluación de zonas inundadas en la Pampa húmeda con datos del sensor MODIS/Terra.  
*XIV Simposio Internacional Selper. 8-12 de noviembre de 2010. Guanajuato, México.*
- RODRÍGUEZ, D.M.; VELASCO, I.; MARINO, M., 2009.  
Clasificación de coberturas de suelo mediante el uso de índices e imágenes satelitales de distintos sensores.  
*X Congreso Argentino de Meteorología - CONGREGMET X. 5-9 de octubre. Bs. As., Argentina.*
- SOLDANO, A., 2009.  
Inundaciones: ¿Qué es susceptibilidad? Conceptos sobre riesgo.  
*Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones. 16 al 20 de marzo, Falda del Carmen, Córdoba, Argentina.*
- SU, F.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D.P., 2008.  
Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin.  
*Journal of Hydrometeorology, 9: 622-640.*
- TAKEUCHI, W. Y YASUOKA, Y., 2005.  
Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data.  
*Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 43 (6): 7-19.*



## Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

### Processes modelling cliff evolution at Las Grutas, Río Negro province

Fucks, Enrique Eduardo <sup>1</sup> ✉ - Schnack, Enrique Jorge <sup>2</sup> - Scalise, Armando <sup>3</sup> - Ahrendt, Kai <sup>4</sup> - Vafeidis, Nassos <sup>4</sup> - Sterr, Horst <sup>4</sup>

Recibido: 18 de octubre de 2014 • Aceptado: 19 de mayo de 2015

#### Resumen

*Los acantilados desarrollados en la localidad de Las Grutas, al N del golfo San Matías, representan uno de los ambientes más particulares del litoral argentino. Los factores que han condicionado su particular evolución están relacionados con los procesos litorales, la meteorización, la litología, cambios del nivel del mar, escurrimientos subterráneos y superficiales y remoción en masa, entre los más importantes. Si bien existe una percepción de parte de la población de que los mismos están retrocediendo de manera alarmante, no se han observado procesos erosivos importantes que sustenten estas apreciaciones. Se considera que las condiciones litológicas heterogéneas del frente acantilado, han condicionado el escurrimiento subterráneo, haciendo más propensos los sectores finamente estratificados a la erosión, encontrando el mar una situación más favorable para los procesos mecánicos e hidráulicos. Asimismo, se considera que el sector de los acantilados donde se desarrollan las cavernas más prominentes, constituye uno de los sectores costeros más estables, reflejado en la presencia no solo de las cavernas, sino también en la saliente que la costa forma en este lugar, el que se asocia a escasos procesos de agrietamiento de todo el sistema, producto de escasos cambios en la humectación y secado. Asimismo, la depresión topográfica que se manifiesta en el sector central, produce el accionar de las olas sobre los estratos más heterogéneos de manera recurrente, llevando a la formación de la gran cantidad de cavernas desarrolladas casi con exclusividad en este sector.*

**Palabras clave:** Acantilados, cavernas, procesos geomorfológicos, erosión, meteorización.

#### Abstract

*The cliffs developed in the town of Las Grutas, at the northern part of San Matías Gulf, represent one of the most unique environments of the Argentine coast. The factors that have conditioned their particular evolution are related to the littoral action, weathering, lithology, changes in sea level, underground and surface runoff and landslides, among the most important. There is a perception on the part of the population that they are receding alarmingly, it has not been found major erosion to sustain those opinions. It is considered that the heterogeneous*

1. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP - IAMRA, UNdeC.

✉ efucks@fcnym.unlp.edu.ar

2. Dto. Ciencias Básicas y Tec., IAMRA, UNdeC

3. Consultor Independiente

4. Geographisches Institut–Christian-Albrechts Universität zu Kiel, Alemania.

*geological characteristics of the cliff front have conditioned the underground runoff, making the areas finely stratified more prone to erosion, finding the sea a more favorable mechanical and hydraulic processes situation. It is also considered that the cliff sector, where the most prominent caves are developed, is one of the most stable coastal areas, evidenced by the presence not only of the caves, but also in the prominent exposure of the coastal forms here, which is associated with low cracking processes of the entire system as a result of little change in the wetting and drying. Also, a lower topographical situation determines the recurrence of wave action on heterogeneous strata, leading this cliff sector to the formation of the caves.*

**Keywords:** Cliffs, geomorphological processes, erosion, weathering, caverns.

## INTRODUCCIÓN

Aunque las costas acantiladas constituyen aproximadamente el 80% de las líneas de costa del mundo (*Emery and Kuhn 1982; Sunamura 1992*), han recibido relativamente poca atención en la literatura científica comparado con los otros ambientes costeros, fundamentalmente relacionadas a costas bajas (*Finkl 2004*). En términos generales, se puede definir una costa rocosa con acantilados, aquellas donde sus materiales componentes estén consolidados, con independencia de su dureza (*Sunamura 1992*). En este sentido, se incluyen en las costas rocosas a aquellas integradas por materiales que se extienden desde las rocas duras tales como granito y basalto a materiales relativamente sueltos pero cohesivos, tal como depósitos glaciales. En función de esto, las tipologías de los acantilados son muy variadas asociadas comúnmente a plataformas de diferentes características (*Griggs and Trenhaile 1994*).

Las costas rocosas operan como zonas de transferencia entre el continente y el mar, trasladándose los sedimentos directamente desde los acantilados hacia la playa y mar abierto a intervalos de tiempo intermitente. La erosión y transporte del material provoca grandes cambios físicos y expone a las comunidades costeras y la actividad humana a peligros con posibles daños a la propiedad, la infraestructura y la pérdida de vida (*Violante 2009*).

Asociados con la tasa de retroceso del acantilado, la aparición de una plataforma de abrasión actúa como disipador de la energía de las olas conforme se desarrolla, hasta un ancho de plataforma crítica, más allá de la cual, las olas son incapaces de erosionar o quitar los escombros que puedan servir para proteger el acantilado (*Violante 2009*). No obstante, el efecto disipador puede disminuir como resultado de la erosión de la plataforma, reduciendo su altura en relación con el nivel del mar, manteniendo así el retroceso de éste. La retracción del acantilado es el resultado acumulado de numerosas variables, actuando todas en conjunto. De la interacción entre los procesos y sus resultados, puede resultar un ambiente que tienda a la estabilización, desarrollando al pie del acantilado un talud que lo proteja, deteniéndose el retroceso. En estos casos, el acantilado puede ser degradado por procesos subaéreos o evolucionar a través de un proceso cíclico que implica la eliminación del talud y la redistribución por fuerzas hidrodinámicas (*Violante 2009*).

La erosión basal es un factor crítico para la inestabilidad del acantilado (*Richards and Lorrinan 1987; McGreal 1979*) debido a la precipitación, la infiltración y las aguas subterráneas, mientras que la acción de otros procesos en la parte superior del acantilado (acción fluvial, remoción en masa, meteorización), contribuyen significativamente a los cambios costeros (*Lawrence 1994*).

Una consecuencia del retiro del acantilado es la creación de plataformas de abrasión, que está relacionada principalmente con las actividades de extracción y abrasión marina, asociados a la bio-erosión y meteorización (*Sunamura 1992; Haslett 2000; Trenhaile 2002*). Estas estructuras son rara vez horizontales y a menudo tienen una suave pendiente mar adentro de hasta 3°, muchas veces cubiertos por una pequeña cantidad de sedimentos (*Trenhaile 2004*). Muchas son las denominaciones que éstas han tenido, variando entre las puramente descriptivas a las relacionadas a los procesos generadores. En algunas ocasiones, debido a que la génesis de la plataforma y los procesos formativos no son aclarados completamente, los términos puramente descriptivos son probablemente los más adecuados para denominarlos (*Bird 1976; Pethick 1984; Trenhaile 1987*). Cuando esto sucede, el término "plataforma costera" es considerado el más apropiado, distinguiendo dos tipos básicos en base a la pendiente: Tipo A (inclinada) y Tipo B (horizontal) (*Finkl 2004*). Las plataformas Tipo A son más comunes en los ambientes macromareales y las plataformas del Tipo B en las regiones del meso y micromareal (*Trenhaile 1987*).

El ascenso del nivel del mar postglacial iniciado en el Pleistoceno Tardío ha llevado a que el mar esté trabajando sobre las costas a partir del máximo transgresivo (6-5 ka) hasta la actualidad en forma casi permanente. En este mismo sentido, en lugares tectónicamente estables las intrusiones marinas del Pleistoceno Medio-Tardío (MIS 5 y 7) ya habían procedido a modelar estos ambientes, constituyéndose en costas policíclicas.

Las variaciones morfológicas que podemos observar en las costas rocosas están influenciadas por un conjunto de factores, dentro de los que podemos mencionar: factores litológicos (tipos de roca, estructuras sedimentarias, discontinuidades, fallas, diaclasas); meteorización (física y química); mareas; olas; formas heredadas de cambios anteriores del nivel del mar (*Allison 1989; Sunamura 1992; Bray and Hooke 1997*), a los que se le suman los producidos por las aguas superficiales y subterráneas, remoción en masa y los antrópicos.

## METODOLOGÍA

A fin de determinar el comportamiento morfodinámico de la costa y la mecánica del proceso de erosión en los acantilados del balneario Las Grutas, en los años 2008 y 2009 se llevaron adelante en una primera etapa diversas caracterizaciones del área, incluyendo las variables climático-oceanográficas, del sustrato geológico, la situación del sitio en el marco de su estatus de área protegida y factores socio-económicos. Simultáneamente se realizaron tareas de campo para establecer puntos geodésicos para control de los perfiles de playa perpendiculares y paralelos al frente acantilado. Posterior y simultáneamente se verificaron los diferentes rasgos y procesos a lo largo de la zona de estudio, realizándose el levantamiento detallando de

las diferentes unidades litológicas (espesor, litología, inclinación, estructura) y las mediciones de la altura de los acantilados y las cavernas (altura, profundidad, ancho, litología y espesor de unidades). Para estos estudios se utilizó una estación total, GPS geodésicos, distanciómetros, cintas métricas y fotografías históricas, consultándose al personal municipal y vecinos por los desmoronamientos más recientes. El análisis y tratamiento de fotografías aéreas de diferentes épocas (1962, 1977 y 1999 a escalas 1:30000, 1:21000 y 1:31000, con ampliaciones a escala 1:15000) e imágenes quickbird (2003, 2004, 2009), permitió comparar la posición y accidentes de la línea de costa a fin de establecer cambios a lo largo del tiempo. La información obtenida a lo largo del proceso de estudio permitió elaborar pautas para el manejo del frente costero, así como recomendaciones sobre monitoreos y aspectos comunicacionales.

### CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DEL ÁREA

El golfo San Matías se ubica en el sector costero del N patagónico entre las provincias de Río Negro y Chubut. Corresponde geomorfológicamente a una cuenca de deflación con un área aproximada de 17.000 km<sup>2</sup> y profundidades en torno de los 200 m (Figura 1) (Martínez et al., 2001; Zambrano, 1973). Debido a que su comunicación con el mar se encuentra a una profundidad del orden de los 70 m, durante los episodios glaciales del Cuaternario esta región estuvo sometida a procesos

subaéreos, como la mayor parte de la plataforma continental (Guilderson et al. 2000; Fucks et al., 2012).

El ámbito de estudio se encuentra ubicado al N del golfo San Matías, en la localidad de las Grutas (Figura 1). Las diferentes litologías presentes y las unidades geomorfológicas abarcan un importante periodo geológico, como así también unidades de génesis muy variadas, lo que motiva una evolución geomorfológica compleja (Fucks et al. 2011).

Las rocas más antiguas de sector corresponden a los granitos del Complejo Plutónico Paileman (Giacosa 1997) del Carbonífero Superior-Triásico Inferior cuyos afloramientos pueden observarse en la zona de Piedras Coloradas, al sur de Las Grutas. Las otras rocas que se encuentran en el área son areniscas marinas miocenas de la Fm Gran Bajo del Gualicho (Lizúain y Sepúlveda 1978) cubiertas en parte por los Rodados Patagónicos, unidades litorales del Pleistoceno y Holoceno y depósitos medanosos (Angulo et al. 1978; Martínez et al. 2001; Fucks et al. 2011; Fucks et al., 2012) (Figura 2).

### CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LOS ACANTILADOS

Los acantilados que se observan en la localidad de Las Grutas presentan alturas que varían entre los 4 y 12 metros. Forman un arco cóncavo hacia el sur a lo largo de unos 5 km desde el N de La Rinconada hacia el S. Están desarrollados



Figura 1. Mapa batimétrico del golfo San Matías y ubicación del área.

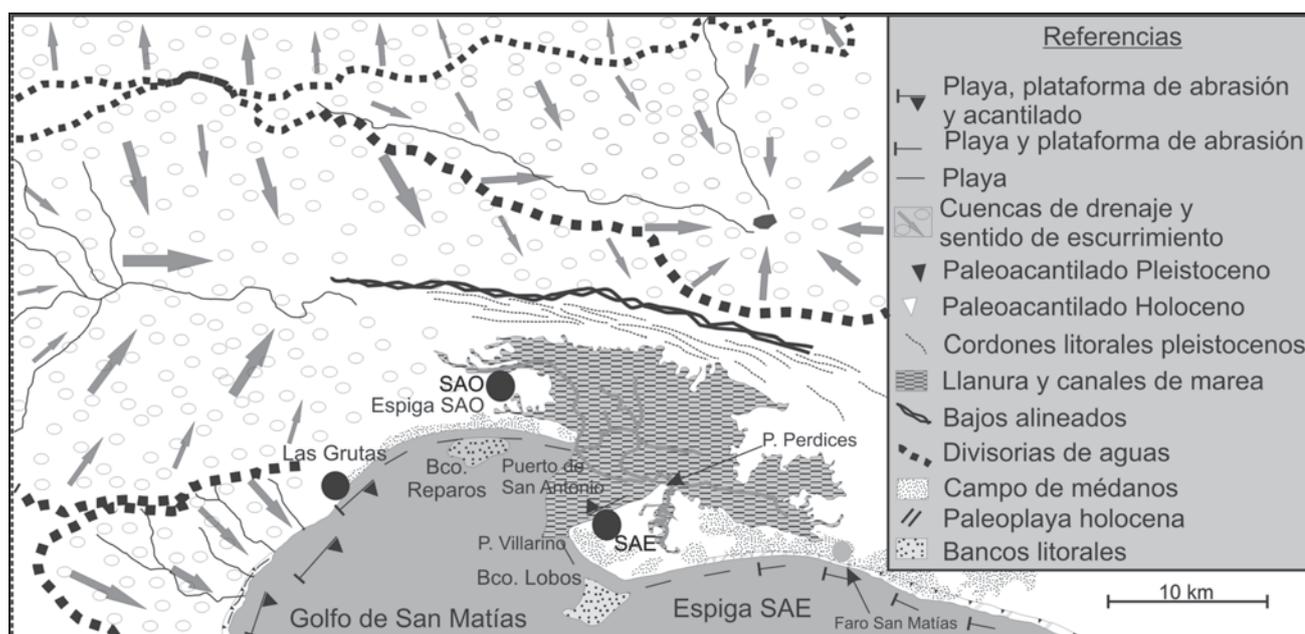


Figura 2. Mapa geomorfológico del sector de estudio [Fucks et al., 2012].

fundamentalmente en sedimentitas marinas de la Fm Bajo del Gualicho, observándose en la base de manera alternada amplias plataformas de abrasión, playas y remanentes de depósitos marinos pleistocenos (Gelos et al. 1992; Fucks y Schnack 2011; Fucks et al. 2011). Esta localidad constituye el centro turístico costero más importante de la Patagonia Argentina, no solo por la elevada temperatura que presentan sus aguas, sino también por las importantes cavernas o grutas que se han desarrollado en sus acantilados, las que le confieren al lugar un aspecto muy pintoresco, asociado claro está, a la existencia de playas de arena.

La litología que compone estos acantilados está representada fundamentalmente por las areniscas de la Fm Bajo del Gualicho (FBG), cubiertas de manera irregular por depósitos fluviales, eólicos y litorales. No solo las características litológicas de estas unidades son extremadamente variables, sino que la unidad principal (FBG) presenta importantes variaciones litológicas, las que influyen en su comportamiento frente a los procesos erosivos.

Litológicamente se compone casi exclusivamente de arcillas y arenas con colores que varían entre el pardo amarillento, pardo grisáceo y verde. Texturalmente se asocian a arcillitas, arcillitas areno margosas, calcoarenosas, areniscas de grano mediano a fino, areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas, presentándose en algunas oportunidades materiales tobáceos y niveles de yeso, ya sea cristalizado o en forma pulverulenta (Lizuiain y Sepúlveda 1978). En base a las características litológicas y de acuerdo a la importancia que estas variaciones presentan en su evolución, fue dividida en tres niveles principales (A, B y C) dividiéndose a su vez las dos últimas en B1/B2 y C1/C2 (Figura 3).

#### Sección A

Constituye un banco masivo, arcilloso, resistente, de color verde claro a verde amarillento, que en su mayor expresión tiene 1,5 m de espesor. Mineralógicamente este horizonte litológico está constituido por: Cuarzo 25%, material illítico

19%, Esmectita 10 %, Plagioclasa (Feldespatos Na-Ca) 40 % y Microclino (Feldespatos K) 6 %, presentando diaclasas verticales en gran medida cementadas por yeso.

#### Sección B

Este nivel presenta espesores medios de 4 m, apoyándose en discordancia sobre el Nivel A. En función de sus características litológicas se lo divide en las secciones B1 y B2.

La sección inferior (B1) está compuesta por un sedimento areno limoso a arcilloso, de color amarillento a castaño, con una fina estratificación lenticular y ondulítica con espesores medios de 2 a 3 metros. En sectores pueden presentar signos de bioturbación, ya sea con conductos vacíos o rellenos, que se disponen en general en forma transversal a la estructura. También se observan concreciones silíceas de forma cilíndrica de 5 a 6 cm de diámetro y alargadas de hasta 30 cm. En forma aislada se observan fragmentos de conchillas y concreciones de MnO milimétricas, gran cantidad de clastos muy irregulares de varios



Figura 3. Fotografía de los acantilados y las unidades litológicas que los integran. Entre bajada 2 y bajada 3.

centímetros de diámetro. Mineralógicamente está constituido por: Cuarzo 27%, material illítico 9%, Halita 12 %, Plagioclasa (Feldespatos Na-Ca) 20 % y Microclino (Feldespatos K) 8 %, Dolomita 9 % y Carbonatoapatita 15%.

De manera transicional pasa a la sección B2, caracterizado por un sedimento areno arcilloso, castaño amarillento a amarillento con una gran cantidad de bioturbaciones, tanto rellenas como vacías, verticales, horizontales e inclinadas, y de muy variadas dimensiones. Los procesos biológicos han producido un material totalmente alterado, muy removido, haciendo que la estructura original que caracteriza el nivel infrayacente esté prácticamente ausente. Mineralógicamente este horizonte litológico está constituido por: Cuarzo 30%, material illítico 18%, Caolinita 2 %, Esmectita 7%, Plagioclasa (Feldespatos Na-Ca) 37 % y Microclino (Feldespatos K) 6 %.

### Sección C

Sedimento groseramente estratificado, conformado por una arenisca fina a muy fina bien seleccionada, limpia, medianamente cementada, con desarrollo vertical que aumenta hacia el NE, con alrededor de 2 m en el sector S y Centro y más de 5 m en el sector N. Carece de estructuras sedimentarias mecánicas, de color amarillento, con restos de moluscos y con algunos clastos dispersos en su masa. El contacto basal posee, en gran parte de las exposiciones, gruesas concreciones diagenéticas de origen silíceo. Dichas concreciones se encuentran en relación con galerías de diámetros que superan los 5 cm. Este nivel presenta superficies groseramente ondulantes de precipitados evaporíticos laminares (yeso), de escasos mm de espesor, pero de varios metros de continuidad. Mineralógicamente está constituido por Cuarzo 26%, material illítico 15%, Esmectita 15%, Plagioclasa (Feldespatos Na-Ca) 34 %, Microclino (Feldespatos K) 7 % y Calcita 3%.

En algunos sectores este material presenta una estructuración marcada en bloques redondeados de hasta 2 m de espesor, más friable, produciéndose en la actualidad procesos de bioerosión y caída de detritos. En función de estas características separamos el Nivel C en dos subniveles (C1 y C2) diferenciadas principalmente por la masividad de la sección inferior y la mayor estructuración del horizonte superior.

### PROCESOS Y FACTORES INTERVINIENTES EN EL MODELAJE ACTUAL DE LOS ACANTILADOS

Los procesos geológicos que actúan en los acantilados en la localidad de Las Grutas, generando morfologías tan particulares como las cavernas, están caracterizados principalmente por la acción mecánica de las olas (abrasión y acción hidráulica), de remoción en masa (puntual y esporádica), escurrimientos subterráneos y meteorización. Otros factores de menor importancia general pero que pueden tener alto impacto local son la erosión por escorrentía en la parte superior durante tormentas, la erosión producida por desagües pluviales abiertos, y la bioerosión por aves. Asimismo, la heterogeneidad de las rocas, su resistencia, tipo de cementación, orientación y topografía de la costa, presencia o no de plataformas de abrasión, playas y afloramientos rocosos y los cambios del nivel del mar, juegan también un rol central en la evolución del mismo.

En general, el contacto basal de los acantilados con la plataforma de abrasión es recto, salvo en algunos sectores donde playas y médanos impiden el contacto directo, llegando solamente el mar en momentos de tormentas. La concavidad o convexidad del perfil de los acantilados es controlado por las tasas

relativas de erosión por procesos marinos y subaéreos, así como por las posiciones de los estratos más resistentes en los acantilados. Un ángulo agudo en la base del acantilado, indica erosión marina activa, mientras que una curva suave en la base significa que la erosión subaérea puede estar dominando (*Emery and Kuhn 1982*).

Distintos sectores de los acantilados presentan mayor o menor intensidad y predominancia de estos procesos erosivos. Mientras algunos sectores muestran una marcada tendencia a la formación de cavernas, otros muestran exclusivamente procesos erosivos por caída del frente del acantilado e inclusive hay sectores donde el mar llega en forma muy esporádica; otros sectores muestran combinaciones entre una forma erosiva y formas de acumulación, las que también varían a lo largo del año.

### Acción mecánica del mar (olas y mareas)

La energía mecánica de las olas es el principal elemento que afecta al retroceso de las costas acantiladas (*Sunamura 1992*). Este factor está influenciado por la aparición de sedimentos sueltos en las aguas costeras, que aumentan el impacto mecánico de abrasión. Sin embargo, a medida que aumenta la carga sólida a valores altos, la energía de las olas se disipa en el movimiento y la reelaboración de sedimentos, quedando en consecuencia los acantilados más protegidos (*Violante 2009*).

Las evidencias de este proceso son abundantes a lo largo de todo el frente costero activo de Las Grutas. Si bien los efectos que produce la abrasión en su acción diaria en la base de los acantilados produce cambios imperceptibles, los cambios a mediano y largo plazo son claramente observados, produciendo las olas generadas en las tormentas los cambios más bruscos.

Existen varios factores que influyen sobre los efectos que producen las olas sobre la costa: el tipo y dureza de las rocas, aspectos estructurales (diaclasamiento, fallamiento, estratificación), estabilidad tectónica de la costa, exposición a la acción de las olas, altura del agua sobre el acantilado, abundancia y tamaño de los materiales sueltos, presencia de plataforma de abrasión y playa, existencia y/o abundancia de tormentas, entre las más importantes.

La acción mecánica diaria produce abrasión de los niveles A y B1, evidenciados en molduras de rompientes (*Gelos et al., 1992*) en la base del acantilado y en los bloques esparcidos por la costa y en la base de las cavernas (Figura 4). Desde la base del acantilado y en forma discontinua, se desarrolla la plataforma de abrasión, la que evidencia también rasgos de erosión representados por marmitas y canales sinuosos perpendiculares a la costa. En una posición distal y funcional en mareas intermedias y bajas, puede observarse como la plataforma de abrasión presenta un escalón sometido a un importante proceso de erosión, quizás en mayor medida que el acantilado principal (Figura 4b).

Es común la erosión de las plataformas de abrasión fundamentalmente en las superficies más planas y de composición arcillosa, donde la desecación produce la contracción de éstas durante las mareas bajas y la inundación siguiente la expansión, haciendo que los bordes de los polígonos sean eliminados por las olas. La desecación es mayor en áreas bien drenadas y la erosión es más alta en periodos tormentosos, promediando los valores entre 0,0 y 0,9 cm en 1 año, aunque la profundidad de la playa y posiblemente el tamaño de grano influyan en la eficacia de la erosión (*Robinson 1977*).

Sin lugar a dudas, el mar por sí mismo tiene una gran capacidad de destrucción. El golpe de la ola, fundamentalmente en los sectores de cavernas, diaclasas y superficies de estratificación ejerce una gran presión. Estos procesos van produciendo el agrandamiento y unión de las cavidades hasta llegar a las cavernas existentes en la costa.

La erosión inducida por la onda está en función de la energía de las olas contra el acantilado, ya sea por la fuerza del impacto de agua y compresión del aire, como por las fuerzas que se generan por la expansión de éste (Trenhaile 1987; Sunamura 1992). Si las olas rompen directamente contra el acantilado, el impacto tiene su mayor energía. La enorme fuerza ejercida por las olas sobre los acantilados produce la compresión del aire repentinamente. Cuando éstas retroceden, se produce una expansión súbita del aire con una fuerza explosiva provocando el debilitamiento de la roca y el desprendimiento paulatino de las capas. Sin embargo, lo más normal es que las olas rompan fuera de la costa, alcanzando el acantilado con escasa energía, produciendo solamente erosión por la fuerza de tracción de la onda, especialmente si tiene sedimentos gruesos de la playa como materiales abrasivos (Robinson 1977; Kamphuis 1987; Nairn 1997). En este sentido, la fuerza de presión-expansión tendrá sus mayores efectos durante las tormentas, situación que normalmente produce los mayores retrocesos de los acantilados.

El patrón de desarrollo de cavernas y del socavamiento basal marca la importancia de la acción del oleaje en la erosión del acantilado. Por un lado es notorio que la mayoría de las cavernas se desarrollan a la altura del golpe de ola y en la franja de mareas altas. Esta relación positiva entre el tamaño de las cavernas y la cota de la base del acantilado respecto de las mareas altas, hace más efectiva la acción de la presión hidráulica del oleaje y expansión súbita del aire sobre las oquedades y discontinuidades del acantilado.

Las diaclasas constituyen superficies de debilidad bastante frecuentes en estos acantilados, muchas veces no claramente observables por los precipitados de yeso que cubren la mayor parte de la superficie. Sin embargo, pueden observarse diaclasas verticales que recorren todo el acantilado, pero solamente en la base, donde es embestido regularmente por las olas, éstas muestran un ensanchamiento que rápidamente desaparece, donde este proceso no se desarrolla o lo hace de manera menos regular (Figura 4d).

Un aspecto muy importante a considerar es el régimen mareal en el sector N del golfo San Matías. Es de tipo macromareal, produciéndose cambios diarios que van entre los 6 y 9 m de amplitud (Servicio de Hidrografía Naval 2010). No obstante este aspecto, los mayores efectos sobre los acantilados se producen durante las tormentas. Estas ondas modifican a la marea astronómica dando origen a alturas anormales del nivel de las aguas y su duración puede variar desde algunas horas hasta

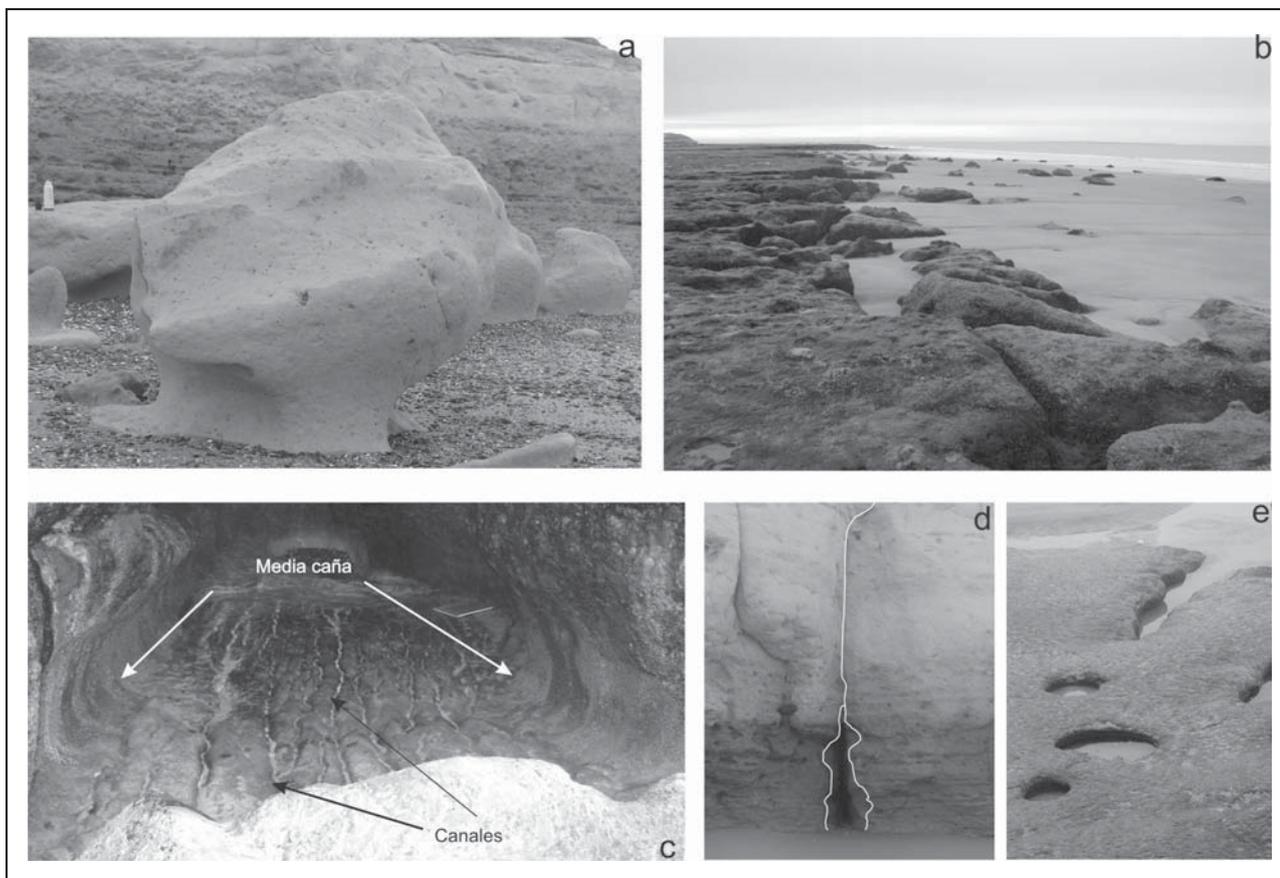


Figura 4. Fotografías indicando diferentes rasgos erosivos. a) pilar con media caña, B) borde distal de la plataforma costera sometido a erosión (microacantilado).c) caverna con canales en la base y erosión en media caña en la base. D) diaclasa ensanchada a la altura del golpe de la ola. E) marmitas y canales de marea sobre la plataforma costera.

dos o tres días. La coincidencia de alturas máximas de marea astronómica con perturbaciones excepcionales debidas a ondas de tormenta, da origen a valores extremos de marea, es decir a niveles muy altos o muy bajos respecto de los que se registran ordinariamente. Por otro lado, se observa que el oleaje más intenso proviene por lo general de la dirección SE, alcanzando períodos de hasta 7 s y alturas significativas de casi 2 m (Fucks et al 2011). En este sentido, puede observarse que las máximas velocidades medias del viento corresponden a los vientos provenientes del S y O (24 km/h), SO (22 km/h), SE (20 km/h) (Servicio Meteorológico Nacional, Estadísticas Climáticas, 2000).

### Meteorización

El análisis del aspecto que presentan las plataformas de abrasión y acantilados en zonas intermareales provee evidencia que los procesos de intemperismo están operando en los afloramientos rocosos costeros que no están protegidos por una cubierta de suelo, sedimentos o vegetación sobre el nivel medio de pleamares. La descomposición superficial de las superficies de las rocas expuestas resulta del mojado y secado repetitivo, acompañado por cristalización de sales. El intemperismo por el salpicado de sal es un proceso dominante en el desarrollo de la plataforma costera en la costa tropical de Brasil donde la ausencia de detritos gruesos impide la abrasión por las olas y la alta insolación seca rápidamente la superficie de las rocas mojadas por el salpicado salino. Es, sin embargo, difícil disociar los efectos físicos del mojado y secado de los efectos fisicoquímicos de cristalización de las salpicaduras que se secan (Tricart 1959).

Afloramientos de arenisca sujetos a mojaduras por salpicadura de agua de mar y lluvia y secado subsiguiente muestran agujeros y toman el aspecto de una colmena a medida que los granos de arena se aflojan por la descomposición del material que los mantenía unidos por cementación. Este tipo de intemperismo no es efectivo a niveles más bajos, donde las formaciones rocosas están permanentemente saturadas con agua de mar, y donde la acción de las olas lava al material de desintegración arriba de un cierto nivel, dejando gradualmente desnuda una plataforma que coincide con el nivel superior de saturación permanente. En la costa del sudeste de Australia, son los afloramientos rocosos de grano fino que muestran evidencia de agujereamiento y formación de cavidades indicando que la roca expuesta está siendo gradualmente desintegrada por procesos de meteorización y que tienen plataformas de abrasión desarrolladas en o ligeramente arriba del nivel medio de pleamares. Los charcos y canales en la superficie de la plataforma se agrandan e integran a medida que sus bordes suspendidos retroceden y gradualmente la superficie de la roca es descascarada o pelada hacia abajo hasta un nivel que permanece intacto debido a que está permanentemente saturado (Bird 1967).

Cuando el salpicado de sal es persistentemente sobre el acantilado, no son los efectos corrosivos los más importantes, pero sí la presión en los poros producto de esa cristalización y su expansión por calentamiento (Bryan and Stephens 1993; Johannssen et al. 1982; Wellman and Wilson 1965). Estas presiones (haloclastismo) pueden desintegrar mecánicamente el acantilado, produciendo una débil capa desmenuzada.

Los efectos de la cristalización y el calentamiento se han visto en areniscas con estratificación planar en los acantilados de la costa de Oregón, bajo clima templado. En ellos se observó como las superficies sometidas al salpicado presentaban superficies rugosas, contrastando con las suaves superficies intermareales y las superiores alejadas de este proceso. También se observó

como el retiro de los acantilados es mayor en los expuestos al sol, con respecto a aquellos protegidos de este. En sectores en que la sal es sacada del medio por aguas dulces, también el retroceso es menor (Johannssen et al. 1982). Se ha señalado que la plataforma costera del acantilado en la Bahía de Hanauma, Hawaii, es más amplia donde el acantilado recibe el más intenso calentamiento diario, experimentando la meteorización de sal más intensa (Bryan y Stephens 1993).

Asimismo, en los acantilados, es difícil separar si el material que se desprende en forma casi permanente es producto de procesos de hidroclastismo o haloclastismo, aunque en cualquiera de los dos casos su accionar se produce en la superficie de estos, produciendo una desintegración progresiva de las areniscas (Figura 5).

Se puede observar con mucha claridad la precipitación de sales (yeso fundamentalmente) en la pared de los acantilados. Esta precipitación en grietas y poros dan lugar a expansiones volumétricas con el consecuente desprendimiento de material (Figura 5). Existen una serie de factores que condicionan la mayor o menor influencia de este proceso, entre los que podemos citar: el clima (amplitud térmica y de humedad), viento (velocidad, temperatura y contenido de humedad), tipos de rocas (porosidad y permeabilidad), tipos de sales (las más comunes son los cloruros, sulfatos, carbonatos y nitratos), entre otros.

En los sectores donde hay afloramientos permanentes de agua (manantiales), se forma una capa continua, resistente, de 1 a 5 mm de espesor de sales (yeso), que le confiere al acantilado una resistencia y protección contra los demás procesos exógenos (Figura 6a). Estos precipitados se presentan de manera muy irregular y pueden apreciarse pequeños cristales con forma de roseta y otros con una forma mamelonar y combinada con musgos, que le dan un color verdoso. Estos sectores, en amplias zonas de los acantilados, dan lugar a procesos de biometeorización. Este proceso específico está asociado principalmente al afloramiento de agua subterránea sobre la pared del acantilado y de las cavernas. Los musgos tienen una doble acción. Durante el período en que se mantienen fijos a la roca reducen la acción abrasiva e hidráulica de las olas y del desprendimiento de materiales por desintegración. Sin embargo, el mismo proceso de fijación de "costras" de musgo altera el sustrato debilitándolo por acción de los subproductos del metabolismo. Gradualmente estas costras se desprenden arrastrando con ellas porciones de la roca y dejando parches desnudos que son más susceptibles a la acción abrasiva de las olas hasta que nuevamente vuelve a formarse otra capa.

En el Nivel A (base del acantilado), puede observarse la alternancia de septos y cavidades constituyendo morfologías que se asociarían a tafoni. Los septos responden a diaclasas donde hay fluencia de agua en forma constante, haciendo por un lado que no haya haloclastismo ni hidroclastismo, ya que al estar permanentemente saturado, las sales se lavan gradualmente, permitiendo también esta situación el arraigo de musgos, los que reducen sensiblemente los procesos de abrasión y acción mecánica de las olas (Figura 6b1). Entre estos septos, se desarrollan cavidades que se encuentran sujetos a mojado y secado periódico, y con ello a precipitados de sales (Figura 6b2), con el consecuente desprendimiento de partículas, produciendo la expansión de toda la cavidad. Estas morfologías son asignadas a la meteorización, asociadas a la acción del oleaje, ya que este último sería el causante del lavado de los materiales. Los procesos de disgregación granular o descamación diferencial

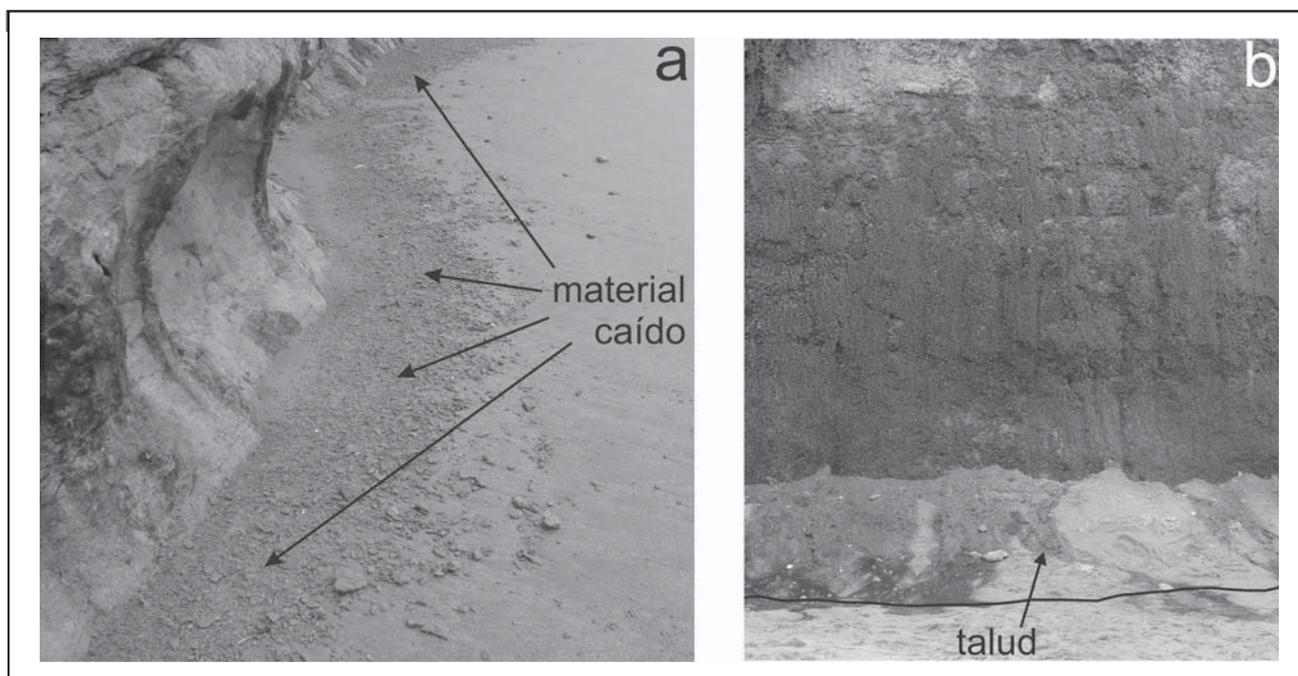


Figura 5. Desprendimientos de material desde el acantilado generados por meteorización. a) el material es sacado permanentemente durante las mareas altas (acantilado activo). b) el material se acumula en la base formando un talud (acantilado funcional en tormentas).

que dan lugar a este tipo de formas se han atribuido a varios procesos como hidratación, hidrólisis, crioclastia, y más frecuentemente por haloclastia, principalmente por el crecimiento de cristales de yeso y halita (Cook et al 1993; Vidal 1983; Twidale, 1982; Vidal y Twidale 1998), aunque la distribución global de los tafoni parece apoyar el papel del haloclastismo, ya que parecen ser más abundantes en zonas costeras o desérticas y semidesérticas (Mainguet 1972; Sunamura 1992; Cook et al. 1993; Vidal y Twidale 1998).

Además de estos dos precipitados, sobre los sectores no afectados ni por las aguas subterráneas, ni por la mojadura de las mareas normales, solamente aquellas de las tormentas (spray), se produce una precipitación de tipo pulverulenta asociado más que nada a las mojaduras ocasionales (agua salada y dulce) que evidentemente también participan como procesos haloclasticos (Figura 6c).

Aparte de los procesos de meteorización mencionados precedentemente, debemos agregar la acción física que producen las raíces de las plantas sobre las rocas del acantilado

aprovechando las diaclasas, contribuyendo a la separación de los bloques, sobretodo cuando estos están sobre la pared misma del acantilado, ya que puede observarse parte del sistema radicular acompañando las caras planas de los bloques del acantilado o apareciendo regularmente en el frente del mismo.

#### Gravitacionales

Si bien la acción gravitatoria constituye la fuerza por la que estos materiales se desplazan, la participación de la meteorización, diaclasamiento, pendientes abruptas, sobrecarga, escurrimientos subterráneo y vibraciones, entre otros, pueden ser los responsables en la desestabilización de los materiales, propiciando su desequilibrio y desplazamiento. En este sentido, los acantilados constituyen morfologías donde se asocian un conjunto de estos factores, propiciando el desencadenamiento de estos movimientos. En ellos se observan como una serie de procesos que precondicionan el acantilado para el movimiento, lo preparan para posteriormente desencadenarlo y sostener estos procesos en el tiempo.

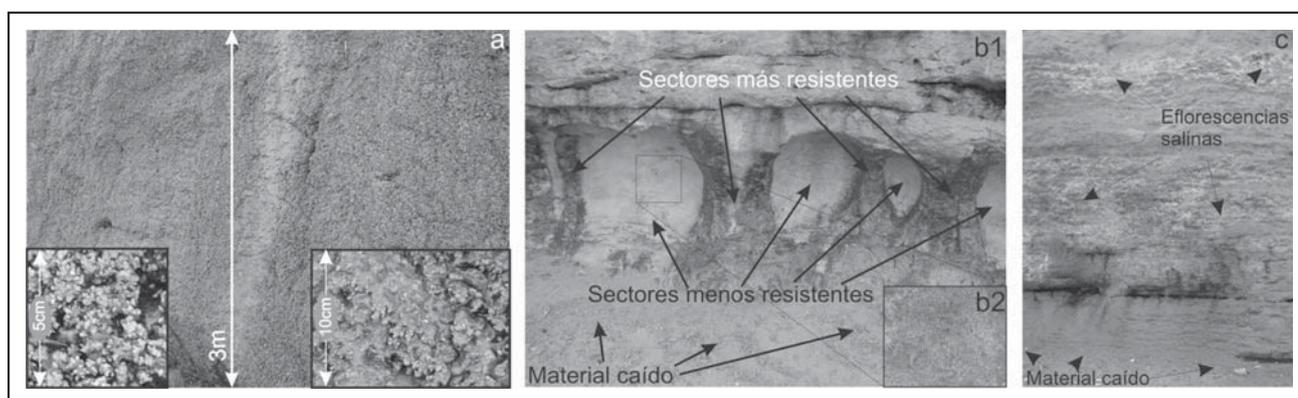


Figura 6. Diferentes formas de cristalización de sulfatos en el frente de acantilado. a) Yeso en roseta formando una capa continua sobre la superficie, en algunos casos asociados a musgos, b) Escasos precipitados de yeso en las cavidades, lavados periódicamente por las olas, c) cristalizaciones pulverulentas en las zonas más secas de los acantilados.

En estos acantilados pueden observarse esencialmente desprendimientos o caídas de rocas (involucran a grandes bloques) y caída de detritos (que involucran a los materiales friables de menor tamaño). Si bien es el principal proceso que lleva al retroceso del acantilado, la escasa altura de éstos (máximo 12 m) y la disposición horizontal de las rocas, contribuye a que el mismo no sea el más trascendente.

La caída de roca constituye el desplome instantáneo y libre de bloques de cualquier tamaño y forma a través de superficies de discontinuidad (diaclasas o planos de estratificación). Muchos de estos diaclasamientos responden a procesos de meteorización como la hidroclastía, termoclastía y haloclastía. A estos procesos preparatorios le continúa la acción marina, acentuada fundamentalmente en periodos de sudestadas o mareas extraordinarias, la que produce no solamente el socavamiento del acantilado, sino también las vibraciones producto del choque de las olas con el frente rocoso.

Las cavernas y muecas en la base del acantilado (Figura 5) generan voladizos que sostienen masa sedimentaria de hasta 10 metros de altura, lo cual genera tensiones a lo largo de toda la estructura que favorecen la formación de grietas y diaclasas. El disparador final del deslizamiento puede ser: la ampliación de la diaclasa hasta el punto de quiebre (generando una caída espontánea y difícil de predecir), el efecto de la energía

de las tormentas sobre el acantilado o la saturación del sedimento por efecto de lluvias, disminuyendo la resistencia de los materiales. Si bien los desplazamientos son más frecuentes durante el invierno (probablemente por la mayor recurrencia de tormentas), pueden darse también en verano, en forma espontánea. Estos desprendimientos se dan en bloque dispuestos directamente en los acantilados o también pueden representar el techo de las numerosas cavernas de la zona (Figura 7).

Estos procesos representan el mayor riesgo a la integridad de las personas. Si bien se han reportado casos durante el verano que no resultaron en accidentes importantes, los mayores se dan durante las tormentas, momentos en que las playas estas deshabitadas. La ocurrencia de desprendimientos es impredecible, si bien es posible reducir el riesgo de accidentes a través de un programa de control y monitoreo sistemático.

La caída de detritos representa un proceso menor y se refiere al desprendimiento libre de los materiales friables de gravas a partir de los acantilados. También se observa que, en función de la estructura y los procesos que actúan, no solamente se dan en los sedimentos marinos y fluviales que descansan en la cresta del acantilados, sino también que la Fm Bajo del Gualicho presenta sectores muy deleznable (Nivel C2) generados en algunos casos por la bioerosión, lo que provoca la caída de materiales en forma continua.



Figura 7. En la fotografía adjunta pueden observarse cómo dos bloques "colgados" se presentan con diaclasas paralelas al frente del acantilado y en las dos fotografías inferiores la presencia de bloques dispersos en la playa producto del desplome.

### Cambios del Nivel del Mar

En base a datos isotópicos de algunos núcleos oceánicos profundos, se infiere que los valores del nivel del mar fueron similares y más altos que el actual por lo menos para los E.I. 1, 5, 9 y 11, y tal vez 23, y que durante los otros estadios isotópicos del Pleistoceno Medio (E.I. 7, 13, 15, 17, 19) el nivel oceánico no ha llegado a la altura del cero actual (*Shackleton 1987; Ortlieb 1987*). En la zona de estudio se han revelado la presencia de cuatro niveles del mar similares o más altos que el actual. De los más recientes y que pudieron haber repercutido mayormente en el trabajo del actual acantilado son los últimos tres, asociados a los MIS 7, 5 y 1. (*Fucks y Schnack 2011; Fucks et al., 2012*). Al más antiguo son asignados los depósitos que se encuentran sobre la actual línea de costa, prácticamente recostados sobre los acantilados (Figura 2), lo que significa que el mar hace ~ 200 ka estuvo trabajando sobre el mismo. La transgresión del MIS 5e accionó fuertemente sobre los acantilados, sobrepasándolos, quedando éstos probablemente en una posición intermareal o sujetos en función de la altura, en forma constante a la acción de éste. La ingresión del MIS 1, menor que la anterior se situó a una altura intermedia con respecto a la actual y al último interglacial, actuando también sobre éste en forma constante.

Queda claro que si bien el mar ha estado más tiempo retirado de la costa actual que accionando sobre ella, son varios los momentos en la historia geológica, sobretodo del Cuaternario, en que ella ha modelado las zonas costeras, debiéndose considerar que las mismas forman parte de varios ciclos de formación.

En la actualidad se han realizado cálculos para evaluar la tendencia relativa del nivel medio del mar tomando como base la estación de Puerto Madryn, obteniéndose para la serie filtrada resultante de los niveles medios anuales de mar para el periodo 1953-1975, una tendencia de +3,5,  $\pm 0,1$  mm/año con un coeficiente de correlación  $r = 0,98$  (*Lanfredi et al. 1998*) resultados que concuerdan con los calculados a nivel global, para el siglo XX (*IPCC 2007*).

### Escurrecimiento subterráneo

El análisis sobre la estabilidad de acantilados en diversos lugares indica una significativa disminución en la estabilidad por el peso y efectos de presión de poro de las aguas subterráneas, pero también por la erosión que producen las filtraciones en la base del acantilado. Muchos casos de colapso de acantilados costeros han sido correlacionados con altos niveles de agua subterránea debido al riego o sistemas sépticos (*Turner 1981; Sterrett and Edil, 1982*). A pesar de esto, en sedimentos parcialmente saturados, la tensión superficial en los contactos de grano puede aumentar la fuerza y la estabilidad del material (*Towner and Childs 1972; Fredlund and Rahardo 1993*).

A lo largo de los acantilados en la zona de estudio se observan importantes tramos de los mismos, de manera irregular, con descargas de aguas subterráneas. Estos "manantiales" no son constantes a lo largo de los acantilados, acentuándose marcadamente en la zona céntrica. Las características litológicas de la Fm Bajo del Gualicho y la pendiente local, controlan la circulación de las aguas freáticas. El Nivel A, de comportamiento acuífugo (impermeable) es utilizado como piso del escurrecimiento y los sedimentos del Nivel B, sobretodo el B1, motivados por la estructura lenticular y ondulítica y la textura areno arcillosa, como acuífero. La estructuración de este nivel hace que se concentre el flujo subterráneo a lo largo de las discontinuidades, erosionándolas y ampliándolas, desalojando los granos en un

proceso conocido como "sapping" (*Higgins 1982; Howard and McLane 1988*). En el frente de estos, el agua aflora produciendo en la playa pequeños canales que rápidamente se infiltran, o inclusive llegan al mar, constituyendo verdaderos microcursos de agua.

Existen ejemplos que indicarían que este proceso produce desestabilizaciones importantes en los acantilados costeros (*Benumof and Griggs 1999*). Químicamente el agua subterránea puede disolver granos inestables o los cementos químicos que dan a la roca sedimentaria su fuerza y desestabilizarlo (*Turner 1981*). Dada las características genéticas de la roca, el agua a medida que circula por ella, disuelve y se carga de componentes salinos, los que al llegar a los lugares de descarga, al cambiar las condiciones físico-químicas, nuevamente produce la precipitación de éstos en forma de rosetas, las que forman una capa que cubre prácticamente todo el frente a partir del nivel superior del nivel freático (Figura 6).

Debido a que el techo del Nivel A presenta buzamiento hacia el Sector Central, el flujo subterráneo también tiende a concentrarse en él, manifestándose en un flujo constante de agua en la zona de cavernas, evidenciado en filtraciones y goteos permanentes desde techo de las mismas. Asimismo, como esta superficie de debilidad (contacto niveles A y B) coincide con el rango de altura de las mareas altas (máximas y promedio), su inherente susceptibilidad genera condiciones favorables para la formación de oquedades que ante el impacto de las olas se transforman en cuevas y grutas de diversos tamaño.

Comparando fotos históricas de 1969 y relatos de vecinos, se revela que en esa fecha y con una población minúscula, el horizonte B1 se mantenía relativamente humectado, aunque no con los niveles actuales.

Estudios bacteriológicos y químicos indican concentraciones de Enterococos, Nitritos y Nitratos en concentraciones importantes, lo que significaría que las aguas cloacales contribuyen en parte a esta descarga (*Fucks et al. 2011*).

### Escurrecimiento superficial

La torrencialidad es un factor importante en los procesos de erosión del acantilado por la generación de cárcavas y sus efectos sobre los bloques muy diaclasados. Debe tomarse en cuenta que durante los meses de verano las precipitaciones, aunque menores en promedio que las de invierno, pueden presentar eventos de gran magnitud: en el periodo 1991-2008 se registraron las mayores precipitaciones en un día en los meses de diciembre, enero y febrero.

En el periodo 2001-2008 se observaron 28 registros de tormentas con precipitaciones mayores a los 30 mm en un solo día y que en el período 1993-1995 se registraron 3 eventos de gran magnitud con precipitaciones diarias de más de 100 mm. Aunque la importancia de estos eventos en la morfología de los acantilados es poco conocida, debe tenerse en cuenta que las grandes tormentas debilitan a los acantilados y aumentan la probabilidad de caídas de rocas incluso varios días después de las mismas.

### Orientación de la costa y Topografía

La costa en el área de estudio forma una amplia concavidad que va desde Punta Delgada a Punta Colorada. La orientación de la costa es NE-SO, observándose pequeñas salientes que en general responden a litologías más resistentes. Las características de la costa específicamente en la ciudad de Las Grutas son

variables. Mientras al sur la zona intermareal esta representada por afloramientos marinos del Pleistoceno Tardío a modo de plataforma costera (MIS 7), desarrollándose entre ella y los acantilados una angosta playa, al N se desarrolla claramente una plataforma de abrasión formada por las mismas rocas de los acantilados (FBG), la que presenta en su superficie una angosta playa. Entre ambos extremos se desarrolla una playa de arena estable y amplia. En el sector S los acantilados solo son activos durante las tormentas. La orientación que presenta la costa hace que esté muy expuesta a la dirección de los vientos más fuertes provenientes de los sectores S, SO y SE.

Un análisis topográfico de la costa nos permite explicar en buena medida la variación espacial de los procesos erosivos-acumulativos a lo largo del sector costero (Figura 8).

Este perfil se realizó determinando a lo largo del acantilado: la cota del pie del acantilado, la cota del contacto entre los niveles litológicos A y B, introduciéndole los valores de marea alta media y máxima. En función de diferentes aspectos obtenidos de él se identifican tres secciones con características específicas que son considerados importantes en la evolución del área:

La Sección N es la que se encuentra a mayor altura con respecto al nivel del mar. El borde del acantilado no es afectado por las mareas altas diarias, tan sólo por las mareas más altas y aquellas generadas durante las tormentas. A pesar de esto, las olas de tormenta producen socavamientos en la base del acantilado, producto no solo de la energía de las olas, sino también por actuar directamente en el nivel litológico B1, el cual es mas friable y con mayor cantidad de estructuras sedimentarias, las que rápidamente aumentan de tamaño, generando el socavamiento de toda la pared con la consecuente inestabilidad. Es el sector de los acantilados más altos (15m) y con mayor cantidad de diaclasas verticales, el principal proceso es la caída vertical de bloques, fundamentalmente asociados a las tormentas.

En el Sector Sur las cotas del pie del acantilado presentan valores del orden de los 3 m descendiendo gradualmente hacia el N. El nivel A queda expuesto entre 30 y 80 cm aproximadamente, situándose el contacto con el nivel B entre las mareas altas medias y altas máximas, quedando sumergido sólo en contadas oportunidades. Las olas actúan sobre este sector en menor proporción que en el sector central, pero claramente con más frecuencia que en el Sector Norte. A lo largo del plano de escurrimiento se observan oquedades y pequeñas cavernas no mayor a dos metros de ancho y un metro de alto, con profundidades menores a un metro. Las olas llegan al pie del acantilado con poca energía, pero suficiente para producir erosión en media caña sobre la sección expuesta de la sección A. Este tipo de erosión genera inestabilidad en las secciones superiores del acantilado, produciendo diaclasas,

En la Sección Central el pie del acantilado se encuentra a menor elevación que en los Sectores Sur y Norte, con cotas del orden de 1 m snm. Estas altitudes lo ubican 1,5 a 2 m por debajo al Sector Sur y entre 3 y 4 m por debajo al Sector Norte. En este sector el techo del nivel A se encuentra aproximadamente a la altura del promedio de mareas altas, presentando exposiciones del orden de los 1,5 m a 2 m. Esta situación genera que las mareas altas actúan diariamente sobre el horizonte A y que los primeros 2 m del horizonte B son afectados por olas y mareas con mucha más frecuencia que en los sectores Sur y Norte. Estas situaciones estarían propiciando la formación y profundización de las cavernas en este sector puntual, formas no observadas en otros sectores de la costa del golfo.

#### LAS CAVERNAS O GRUTAS

Si bien el litoral atlántico Argentino presenta escasos ejemplos de cuevas, grutas o cavernas desarrolladas en los acantilados (Marcomini *et al.* 2007; Fucks *et al.* 2011), la bibliografía internacional es muy prolífica en estos rasgos, representando las cuevas, túneles, arcos o bahías evidencia de ataque de onda

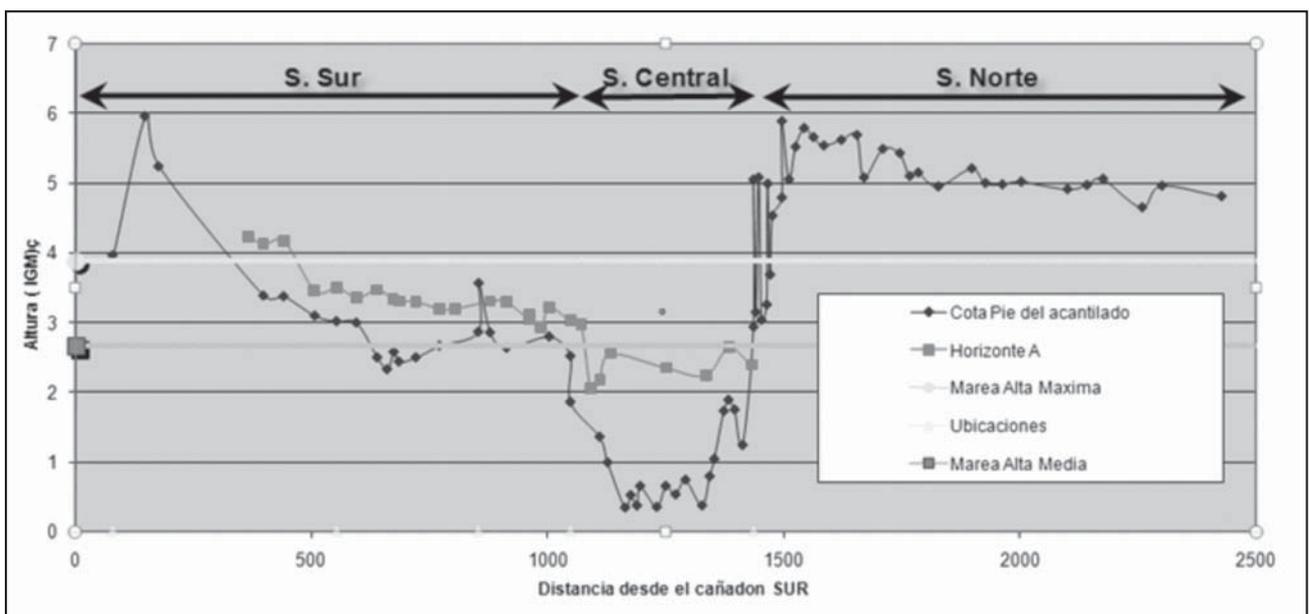


Figura 8. Perfil paralelo al frente costero con la posición del contacto de las unidades A-B y la base del acantilado.

continua a lo largo de las debilidades estructurales como las diaclasas o fallas (*Hampton et al 2004*). A pesar de ello, las morfologías en la zona de estudio representan las únicas en su tipo en el país, por el desarrollo y el agrupamiento que manifiestan, constituyendo evidentemente un desafío la determinación de su génesis. En función de los tópicos desarrollados precedentemente, podemos relacionar su génesis con la acción marina, la meteorización y la acción de las aguas subterráneas esencialmente como procesos lentos y constantes, a los que debemos sumarles los procesos gravitacionales, ocurridos de manera súbita fundamentalmente durante las sudestadas.

### MECANISMOS DE FORMACIÓN DE LAS CAVERNAS O GRUTAS

En función de las observaciones realizadas, tanto de las cavernas ya consolidadas, como de aquellas que se encuentran en procesos de formación, se pueden discernir dos mecanismos claramente diferenciados en su formación:

Un primer mecanismo, asocia a la meteorización y la acción marina como procesos principales actuantes sobre el Nivel A ya que éste se encuentra en el nivel de acción de las olas y el nivel suprayacente (Nivel B1) sólo es alcanzado por las mayores olas y mareas. La acción de estos procesos produce la formación de pequeñas cavidades (ver meteorización) de no más 20 a 40 cm de profundidad de forma semiesférica o media caña (Figura 6b) A medida que esta concavidad va aumentando su tamaño intersecta la base de la sección B1, que debido a la gran estructuración es más susceptible a la meteorización y a la acción del oleaje, degradándose más rápidamente que la sección A. A partir de este punto la caverna desarrolla una rampa sobre

el Nivel A aumentando mas rápidamente en altura y profundidad a expensas del Nivel B1. La evolución lleva a que la inicial morfología cóncava del nivel A cambia progresivamente a convexa, reduciendo la fricción y concentrándose sobre la vulnerable sección B2, produciendo sobre este sector el desarrollo de la parte más profunda de la caverna, que se va acuñando hacia el fondo (Figura 9a).

Otra situación tiene lugar cuando el Nivel B1 está a la altura del golpe de la ola durante una alta proporción del ciclo de mareas. La debilidad intrínseca del contacto entre los horizontes A y B facilita la acción hidráulica de las olas directamente sobre el horizonte B, más vulnerable debido a sus características estructurales. En la etapa inicial, la presión hidráulica aumenta el tamaño de las ya vacías óndulas de la estructura lenticular y ondulítica primaria. A partir de este aumento, las pequeñas oquedades se van uniendo unas a otras aumentando significativamente su tamaño hasta consolidar una caverna de varios metros de volumen. Al mismo tiempo, la sección A va siendo erosionada por abrasión, acompañando parcialmente la profundización de la caverna generada en el Nivel B (Figura 9b).

Es de recalcar que la existencia de cavernas es síntoma de una estabilidad relativa del macizo rocoso en relación a las áreas circundantes. Aunque este concepto resulte contradictorio, debe considerarse que sectores con litologías similares, como los sectores Sur y Norte, reaccionan en forma diferente a similares procesos erosivos, y que esta respuesta diferencial es función directa del grado de cohesión del sedimento. Mientras el sector Norte retrocede en forma lineal con acantilados verticales, deleznable y diaclasado, sin formación de cavernas, el sector central se desarrolla sobre una saliente hacia el mar (indicador

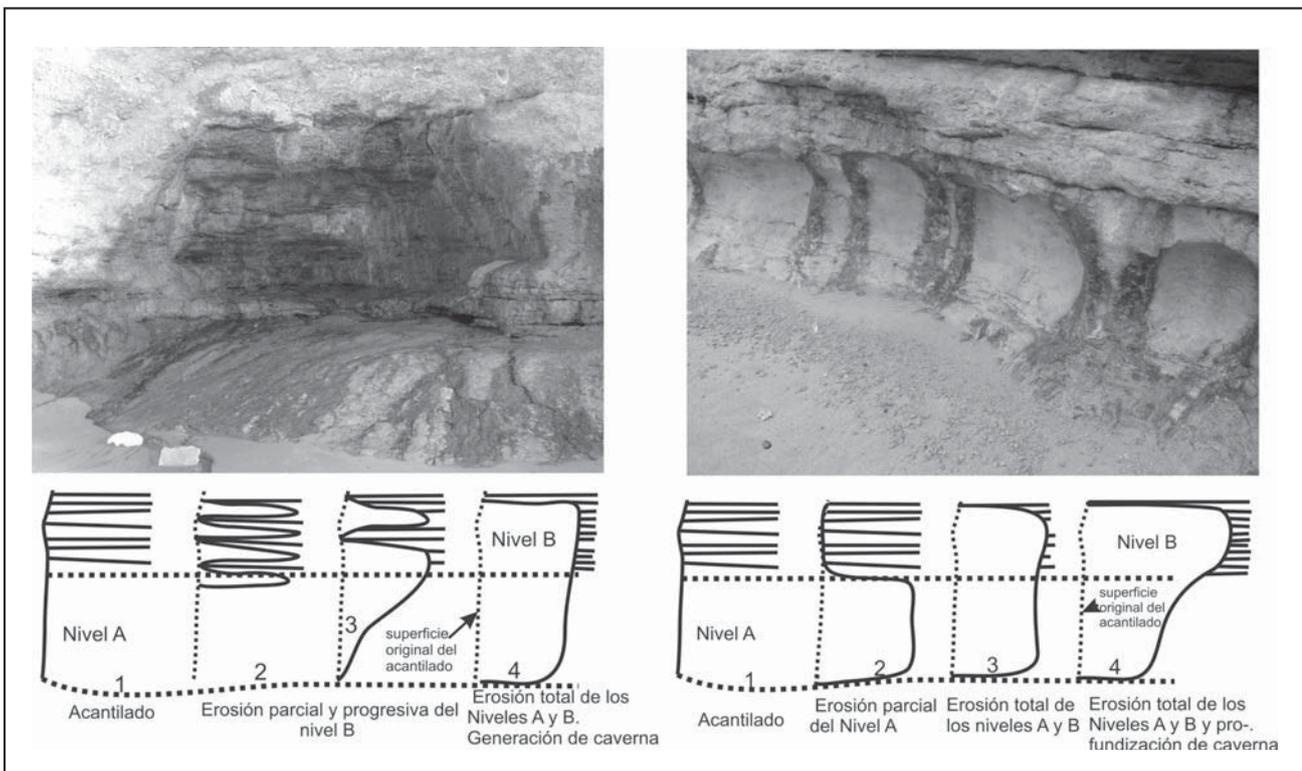


Figura 9. Formación de cavernas. a) La acción es iniciada en el Nivel A dando lugar a cavernas de pequeño porte. Estas formas se ven claramente en el sector Sur. b) la erosión comienza en el contacto de los niveles A-B y da lugar a las cavernas de mayores dimensiones desarrolladas en el sector central.

de mayor resistencia a las olas) y es donde se observa el mayor desarrollo de grutas. Esto estaría indicando que el sedimento del sector central posee una cohesión mayor que el sector Norte, de lo contrario la estructura no soportaría cavernas y se derrumbaría en forma homogénea. Es probable que el nivel de humedad actual y permanente del sedimento otorgue al sector central un nivel de estabilización superior con respecto a sectores sin agua intersticial, reduciendo los procesos de meteorización física, especialmente los asociados con la hidroclastía, que llevan a la formación de grietas o diaclasas.

La forma y la estabilidad de las costas rocosas está más relacionado con factores ambientales heredados del pasado, caracterizadas por condiciones diferentes del nivel del mar y el clima, que interactúan con los agentes erosivos contemporáneos para que el mar puede reparar empinadas laderas formadas inicialmente por procesos no marinos (Sunamura de 1992; Bray and Hooke 1997; Trenhaile 2002) aunque algunos de ellos también puedan tener ésta génesis.

Más allá del procedimiento por el cual se desarrollan estas cavernas, el desmoronamiento se produce por procesos gravitacionales, generalmente durante o posterior a una tormenta, quedando el acantilado proclive al reinicio de los procesos enunciados precedentemente. Si bien no conocemos la edad en que las mismas se han formado, muy probablemente hayan participado más de un ciclo transgresivo, ya que en función de los depósitos del MIS 7, ubicados a una distancia de 100-200 m del acantilado y los del MIS 5, depositados sobre ellos, el grado de retroceso no ha sido significativo para los últimos 200 ka (<200 m).

De acuerdo a estudios periódicos comparando fotografías aéreas e imágenes de satélite de los últimos 50 años, se observa que los mayores rangos de retrocesos se dan entre las bajadas 0 y 1 y que corresponderían al desmoronamiento puntual de las cavernas. No fue posible rectificar las fotografías aéreas antiguas debido a la falta de puntos de control que hayan permanecido estables durante el período de estudio. Por otra parte,

la rápida urbanización de Las Grutas, ocluyó puntos potenciales de control cerca de la costa. La falta de estos controles impidió realizar una corrección geométrica adecuada. Sin embargo, la comparación visual de las fotografías en puntos conspicuos permite observar escasa variación en la forma de las estructuras, dando indicios de una estabilidad relativa durante el período analizado (Figura 10).

Como existe en la población la idea de un peligro constante de desmoronamiento de los acantilados, sectores específicos de la costa fueron utilizados como puntos de control, manifestando una gran estabilidad en el tiempo, aunque en casos puntuales se pudo verificar retrocesos de 1-2 m en los últimos 50 años, con extremos de hasta 3 m en casos puntuales, los que guardan relación con otros trabajos de la zona (Kokot y Chomnalez, 2012).

### CONCLUSIONES

- Los acantilados de las grutas se encuentran sometidos a una serie de procesos geomorfológicos, destacándose la acción litoral, la meteorización y la remoción masa. Las características litológicas de los mismos constituyen un factor muy importante en la evolución de los mismos, acentuando los procesos en algunos sectores y reduciéndolos en otros. La estratificación ondulítica y lenticular presente en el Nivel B1, con espesores de estas estructuras de 2 cm a 10 cm, dan a las capas de arcilla una gran resistencia, aunque las de arena son algo friables, lo que hace que, tanto la acción del oleaje como la del escurrimiento subterráneo, las vayan eliminando progresivamente, debilitando el acantilado con la consecuente formación de la cavernas.
- El agua aflorante en los acantilados participa activamente en los procesos de disolución- precipitación de sales, contribuyendo en sectores a que los procesos de humedecimiento y secado no se produzcan, disminuyendo con esto el diaclasamiento del macizo.

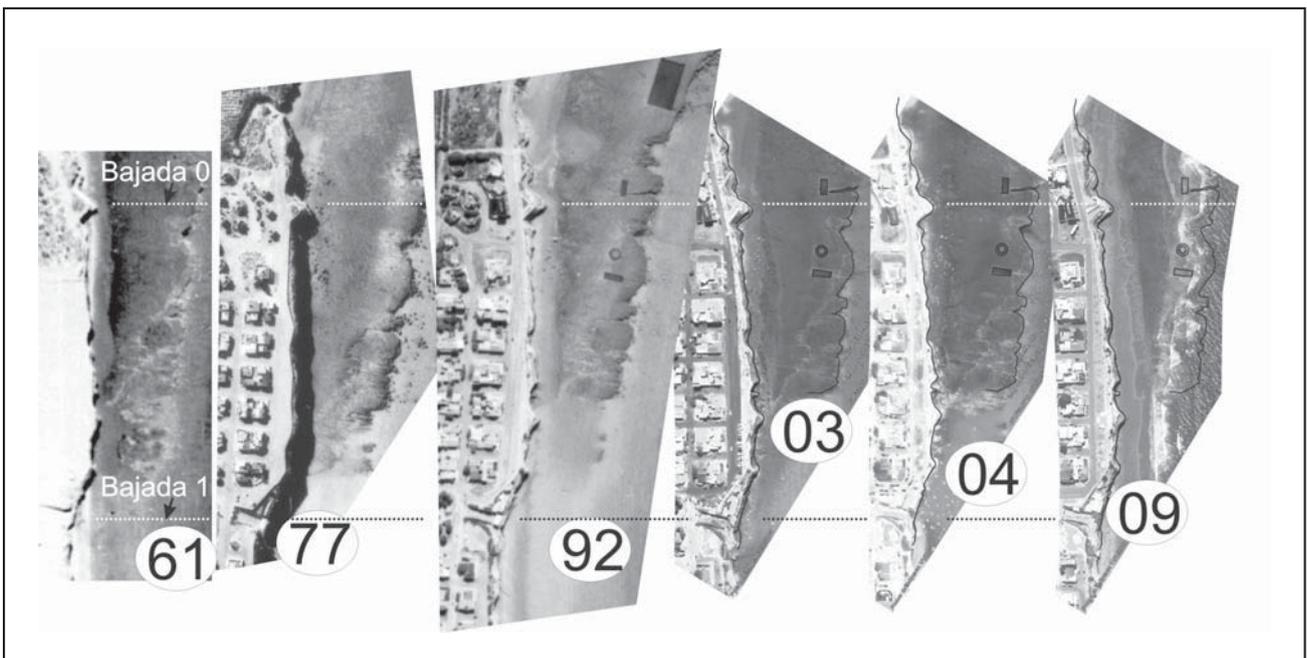


Figura 10. Imágenes satelitales y fotografías seriadas de la zona de estudio indicando el escaso movimiento de la línea de costa en el periodo analizado.

- En el Sector Norte, el proceso erosivo más importante es la remoción en masa con caída vertical de bloques por socavamiento de la base producto de diaclasas y fracturas importantes. En este sector se dan las cotas más altas del pie del acantilado y no se observa escurrimiento subterráneo. Los grandes bloques sobre la playa son testigos de la erosión actual.
  - Las cavernas de mayor desarrollo se presentan en el sector Central, tramo de las menores cotas y de mayor afloramientos de agua. Estas cavernas se desarrollan fuertemente sobre el nivel A y se extienden verticalmente hacia todo el nivel B. Los techos de las cavernas son afectados directamente por las más altas mareas, con lo cual las cavernas se desarrollan dentro del rango de influencia de las mayores olas y mareas.
  - En el sector Sur, no se observan cavernas de gran desarrollo. Sólo pequeñas entradas en la roca de pequeño porte y siempre con base en el nivel A, desarrollándose hasta 1 a 1.5 m sobre el nivel B, sin signos de diaclasamiento ni bloques caídos. Más al S, donde las olas llegan al acantilado sólo circunstancialmente no se observan cavernas, solamente procesos de meteorización sobre la pared del acantilado que llevan al desmenuzamiento del mismo.
  - La importante variación altitudinal de las mareas, asociada a la acción de las olas, la litología y orientación de la costa generan una acción socavadora importante. Muy probablemente la asociación de estos factores es la responsable de la formación de las cavernas.
  - Las plataformas de abrasión presentes en la zona de estudio responden a dos litologías distintas. Frente a las secciones Centro y Norte están compuestas por sedimentitas marinas de la Fm. Bajo del Gualicho, mientras que frente a la Sección Sur se presenta una plataforma constituida por un conglomerado calcáreo de edad pleistocena, de pendiente suave hacia el mar, y separado del acantilado por una playa de aproximadamente 100 m.
  - Si bien la zona de cavernas es estable, la poca información sobre su comportamiento en el pasado más allá de los últimos 40 años no puede conocerse. En este sentido no pueden establecerse con certezas las consecuencias que el drenaje subterráneo desempeña sobre la estabilidad de los acantilados, como así también el paulatino aumento del nivel del mar, pudiéndose estimar por los impactos que estas provocan en otras regiones consecuencias negativas.
  - Debido a la diferencia topográfica a lo largo de la base de los acantilados, el nivel A no se observa con regularidad, pero donde está presente constituye el piso de los afloramientos de agua debido a su bajo grado de permeabilidad. El perfil que forma el mar sobre esta sección es desde vertical a convexo.
  - Si bien el grado de retroceso es escaso, el mayor inconveniente es el establecimiento de la urbanización directamente sobre el mismo, ya sea con edificios o calles con circulación de vehículos, produciendo impactos, ya sea visuales o mecánicos negativos, los que de manera directa o indirecta impulsan acciones contra los mismos.
  - De acuerdo a la experiencia internacional en la materia y las tendencias más modernas, se recomienda orientar a una mínima intervención el sistema costero, con el fin de preservar las características que hacen a la singularidad del área de estudio y a su calidad científica, recreativa y paisajística.
- Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Federal de Inversiones.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALLISON R. J., 1989.  
Rates and mechanisms of change on hard rock coastal cliffs.  
*Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge, Supplementband 73:125-138.*
- ANGULO, R., FIDALGO, F., GÓMEZ PERAL, M.A. Y SCHNACK, E.J., 1978.  
Las intrusiones marinas cuaternarias en la bahía de San Antonio y sus vecindades, provincia de Río Negro.  
*Actas 7º Congreso Geológico Argentino, 1: 271-283. Buenos Aires.*
- BENUMOF, B.T., AND GRIGGS, G.B., 1999.  
The dependence of seaciff erosion rates on cliff material properties and physical processes; San Diego County, California: *Shore and Beach*, 67, 4:29-41.
- BIRD, E.C.F., 1976.  
Coasts. Canberra: Australian National University Press, 282p.
- BIRD, E. C., 1967.  
Una Introducción a la Geomorfología Sistemática. 4.  
*Costas. Jennings (Ed)*
- BRAY M. J. AND HOOKE J. M., 1997.  
Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise.  
*Journal of Coastal Research 13:453-467.*
- BRYAN, W.B., AND STEPHENS, R.S., 1993,  
Coastal bench formation at Hanauma Bay, Oahu, Hawaii:  
*Geological Society of America Bulletin, 105:377-386.*
- COOK, R.; WARREN, A. AND GOUDIE, A., 1993:  
Desert geomorphology. UCL Press.  
*London, 526 p.*

- EMERY, K. O. AND KUHN, G. G., 1982.  
Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification.  
*Geological Society of America Bulletin* 93, 7:644-654.
- FINKL, C., 2004.  
Coastal Classification: Systematic Approaches to Consider in the Development of a Comprehensive Scheme.  
*Journal of Coastal Research*, 20, 1:166-213.
- FREDLUND, D.G. AND RAHARDO, H., 1993.  
An overview of unsaturated soil behavior,  
*in Houston, S.L., and Wray, W.K., eds., Unsaturated Soils: American Society of Civil Engineers Geotechnical Publication* 39:1-31.
- FUCKS, E., SCALICE, A. Y SCHANCK, E., 2011  
Evaluación de Alternativas para la Conservación y Manejo del Frente Costero en Las Grutas, Provincia de Río Negro.  
*Consejo Federal de Inversiones. ISBN 978-987510.099-2., 79 p. Buenos Aires*
- FUCKS, E., Y SCHNACK, E., 2011.  
Evolución geomorfológica en el sector norte del golfo San Matías.  
*18 Congreso Geológico Argentino:173-274, Neuquén.*
- FUCKS, E., SCHNACK, E. J. Y CHARÓ. M. 2012.  
Aspectos geológicos y geomorfológicos del sector N del golfo San Matías, Río Negro, Argentina.  
*Revista de la Sociedad Geológica de España, 25 (1-2): 95-105.*
- GELOS, E., SPAGNUOLO J. Y SCHILLIZZI, R., 1992.  
Las unidades morfológicas de la costa oeste del Golfo San Matías y su evolución.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina, 47 (3):315-326.*
- GIACOSA, R., 1997.  
Geología y petrología de las rocas precretácicas de la región de Sierra Pailemán, provincia de Río Negro.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina, 52 (1): 65-80.*
- GRIGGS, G.B., AND TRENHAILE, A.S., 1994,  
Coastal cliffs and platforms,  
*in Carter, R.W.G., and Woodroffe, C.D., eds., Coastal evolution; late Quaternary shoreline morphodynamics: Cambridge, Cambridge University Press: 425-450.*
- GUILDERSON, T., BURCKLE, L., HEMMING, S., PELTIER, W., 2000.  
Late Pleistocene sea level variations derived from the Argentine Shelf.  
*Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 1, paper number 2000GC000098.
- HAMPTON, M., G. GRIGGS, T. EDIL, D. GUY, J. KELLEY, P. KOMAR, D. MICKELSON AND H. SHIPMAN, 2004.  
Processes that Govern the Formation and Evolution of Coastal Cliffs. Professional Paper 1693.  
<http://geology.usgs.gov/products.html>
- HASLETT, S., 2000.  
Coastal Systems.  
*Routledge, New York. 218 pp.*
- HIGGINS, C.G., 1982.  
Drainage systems developed by sapping on Earth and Mars:  
*Geology, 10:147-152.*
- HOWARD, A.D. AND McLANE, C.F., 1988.  
Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage:  
*Water Resources Research, 24:1659-1674.*
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE), 2007.  
The Physical Basis- Summary for Policymakers:  
<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>
- JOHANNESSEN, C.L, FEIEREISEN, J.J., AND WELLS, A.N., 1982,  
Weathering of ocean cliffs by salt expansion in a mid-latitude coastal environment:  
*Shore and Beach, 51:26-34.*
- KAMPHUIS, J.W., 1987,  
Recession rate of glacial till bluffs: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 113, 1:60-73.*
- KOKOT, R., Y CHOMNALEZ, F., 2012.  
Retrosceso de la línea de costa en Las Grutas, Provincia de Río Negro.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina 69 (1): 88 - 96.*
- LANFREDI N.W., POUSA J.L., D'ONOFRIO E.E., 1998.  
Sea-level rise and related potential hazards on the Argentine coast.  
*Journal of Coastal Research* 14(1): 47-60.

- LAWRENCE P. L., 1994.  
Natural hazards of shoreline bluff erosion: a case study of Horizon View, Lake Huron.  
*Geomorphology* 10:65-81.
- LIZUAIN, A. Y E. SEPÚLVEDA, 1978.  
Geología del Gran Bajo del Gualicho (Provincia de Río Negro).  
*Actas 7º Congreso Geológico Argentino, 1: 407-422. Buenos Aires.*
- MAINGUET, M., 1972.  
Le modelé des gres. Problèmes généraux.  
*Institut Geographique National, 657 p. Paris.*
- MARCOMINI, S.C.; LOPEZ, R.A. Y SPINOGLIO, A., 2007.  
Uso de la morfología costera como geoindicador de susceptibilidad a la erosión en costas cohesivas, Necochea, Buenos Aires.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina, 62, 3:396-404.*
- MARTÍNEZ H., NAÑEZ, C. Y FAROUX A., 2001.  
Hoja Geológica 4166-II San Antonio Oeste.  
*SEGEMAR. Boletín n 254.*
- MCGREAL W. S., 1979.  
Cliffline recession near Kilkeel, N. Ireland; an example of a dynamic coastal system.  
*Geografiska Annale, Series A, Physical Geography 61:211-219.*
- NAIRN, R.B., 1997,  
Cohesive shores:  
*Shore and Beach, 65, 2:17-21.*
- ORTLIEB, L., 1987.  
Neotectonic and Quaternary sea level variations in the gulf of California region.  
*Bull. INQUA Neotecton. Comm., nº 10: 28-31.*
- PETHICK, J., 1984.  
An Introduction to Coastal Geomorphology.  
*London: Arnold, 260p.*
- RICHARDS K. AND LORRIMAN N. R., 1987.  
In Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology, Basal erosion and mass movement,  
*eds Anderson M. G., Richards K. S. (Wiley, New York): 331-357.*
- ROBINSON, L. A. 1977.  
Erosive processes on the shore platform of northeast Yorkshire, England.  
*Marine Geology, 23:339-36.*
- SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL, 2010.  
Tablas de marea.  
[http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form\\_Tmareas.asp](http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp).
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2000.  
Estadísticas Climáticas.  
*Buenos Aires.*
- SHACKLETON, N., 1987.  
New data on the evolution of Pliocene climatic variability.  
*En: S.Vrba, G.Denton, T.Patridge, y L. Burckle (eds.) Paleoclimate and evolution with emphasis on Human origins, 17: 242-248.*
- STERRETT, R.J., AND EDIL, T.B., 1982,  
Ground-water flow systems and stability of a slope:  
*Ground Water, 20, 1:5-11.*
- SUNAMURA, T., 1992,  
Geomorphology of rock coasts:  
*New York, John Wiley and Sons, 302 p.*
- TOWNER, G.D. AND CHILDS, E.C., 1972,  
The mechanical strength of unsaturated porous granular material:  
*Journal of Soil Science, 23:481-498.*
- TRENHAILE, A., 1987.  
The geomorphology of rock coasts:  
*Oxford, Oxford University Press, 384 p.*
- TRENHAILE, A.S., 2002.  
Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms.  
*Geomorphology 48, 7-22.*

- TREHAILE A. S., 2004.  
Modelling the accumulation and dynamics of beach onshore platforms.  
*Marine Geology* 206:55-72.
- TRICART, J., 1959.  
Divisão morfoclimática do Brasil atlântico Central.  
*Boletim Paulista de Geografia, São Paulo. Assoc. dos Geóg. Bras., (31):3-44.*
- TURNER, R.J., 1981,  
Ground water conditions in Encinitas, California as they relate to sea cliff stability:  
*Fullerton, California State University, Master of Science thesis, 81 p.*
- TWIDALE, C.R., 1982.  
Granite landforms.  
*Amsterdam. Elsevier: 372 pp.*
- VIDAL ROMANÍ, J.R., 1983.  
El Cuaternario en la Provincia de la Coruña.  
*Modelos elásticos para la formación de cavidades. Madrid. Universidad Complutense: 283 pp.*
- VIDAL ROMANÍ, J.R AND TWIDALE, C.R., 1998.  
Formas y paisajes graníticos. La Coruña.  
*Universidad da Coruña. 411 pp.*
- VIOLANTE CRESCENZO, 2009.  
Rocky coast: geological constraints for hazard assessment.  
*Geological Society, London, Special Publications, 322:1-31*
- WELLMAN, H.W., AND WILSON, A.T., 1965,  
Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments:  
*Nature, 205: 1097-1098.*
- ZAMBRANO, J. J. 1973.  
Influencia de la deflación en la formación de los bajos sin salida de la Patagonia extraandina..  
*Revista de la Asociación geológica Argentina 28: 92-94*





## **Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda**

### **A critical view on works allocated along the banks and bed of Dulce river between the cities of Santiago del Estero and La Banda**

Castellano, Juan <sup>1</sup> ✉ - Ávila, Edgardo <sup>1</sup> - Zerda, Hugo <sup>2</sup>

Recibido: 15 de marzo de 2015 • Aceptado: 06 de julio de 2015

#### **Resumen**

*En los emplazamientos indicados se introdujeron obras en ambas márgenes o dentro del lecho fluvial, que han generado modificaciones a los procesos geomorfológicos del río. Los mismos se tradujeron en comportamientos imprevisibles y en algunos casos ocasionaron daños importantes a las construcciones o bien impactaron en los sectores más vulnerables de la sociedad asentada en las proximidades del cauce. Aunque los fines de las obras no está en consideración, sí los efectos actuales sobre las mismas y los posibles que llegasen a producirse. Particularmente cuando esto se analizan en el contexto de principios generales que gobiernan la dinámica de un río sobre la superficie terrestre. Prolíferos ejemplos que modificaron su accionar generaron críticas situaciones adjudicada a la inadecuada intervención del hombre. Aquí se consideran conceptos de erosión, transporte, deposición concernientes al comportamiento hidráulico del río y como pueden modificarse por la introducción de obras en el lecho y en la llanura de inundación. Se reconstruyó la geometría del cauce con imágenes satelitales temporales, analizando emplazamientos de obras, cuya presencia se contraponen al comportamiento del río. Asimismo se menciona peligros potenciales del mismo y los riesgos que pueden afectar a poblaciones ribereñas, establecimientos industriales y construcciones civiles en general.*

**Palabras clave:** *Geomorfología, hidráulica fluvial, riesgos.*

#### **Abstract**

*The several works that were emplaced along the banks and bed of Dulce river had influenced its behavior. The influence over its geomorphological processes brought unpredictable consequences that involve not only severe damages on the works themselves but also on the most vulnerable sectors of adjacent settlements. Even though the aims of the construction of these*

1. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Av. Gral. Manuel Belgrano (Sur) Nº 1912 (4200) Santiago del Estero, Argentina

✉ juancast@unse.edu.ar

2. Facultad de Ciencias Forestales Ing. René Ledesma, Laboratorio SIG. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Av. Gral. Manuel Belgrano (Sur) Nº 1912 (4200) Santiago del Estero, Argentina

works are out of question, it is important to consider the present and potential future effects especially when the analysis is made out of the general principles governing river dynamics on the Earth surface. Many and varied are the examples of works that modified the flow of the river and generated critical situations as a consequence of inappropriate human interventions. In this paper, concepts such as erosion, transportation, and settling related to the hydraulic behavior of the river that can be modified when works are emplaced in its bed and flooding plain are taken into account. The river-bed geometry was reconstructed using time satellite images and the emplacement of those works set up against the natural, logic and expected behavior of the river analyzed. Likewise potential risks and threats over river populations, factories and civil constructions in general are mentioned.

**Keywords:** geomorphology, hydraulic fluvial, risks.

## INTRODUCCIÓN

Se presentan observaciones de la dinámica del río Dulce en el sector de estudio comprendido entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda (Figura 1), particularmente referidas a los procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial y, que pueden constituirse en un riesgo cuando se introducen obras que alteran su natural funcionamiento.

Las acciones estructurales, como la construcción de diques, reducción de la sección del cauce, ocupación de la línea de ribera o del lecho ordinario del río, etc., suelen contribuir localmente al aumento significativo de la velocidad del agua y, consecuentemente, generar un aumento en la capacidad de carga del río y de su competencia para erosionar el fondo y márgenes.

Los cambios que se presentan son la migración acelerada del cauce por erosión de las márgenes, para diferentes caudales recurrentes (Fariás et al. 2007), y la excavación del lecho natural. A esto se le suma la socavación que sufren pilas y cabezales de fundación de los puentes construidos en el lecho, como ya ocurrió en el puente de la autopista San Francisco Solano (Figura 1), y que hoy una vez reforzados los mismos, sus diseños no resisten principios de la hidrodinámica fluvial. A dichos condicionamientos se les agrega otro que agravará aún más los problemas mencionados como es la construcción de nuevas costaneras que pasarán por debajo de la anterior obra y del puente Carretero. Las mismas al ocupar el lecho ordinario del río anulan vanos de cada una de esas obras incluso en algunas partes de las

mismas, se anteponen escombros entre el cauce y las costaneras para evitar la erosión del río durante las crecientes. También entre esos restos de la construcción se observan residuos urbanos que son potenciales focos de contaminación del río.

Las medidas no estructurales están dirigidas principalmente a atender los problemas sociales que se desencadenan en una inundación y la respuesta estructural es la construcción de bordos de defensa. Soluciones tendientes a resolver los problemas de erosión del río Dulce entre Santiago del Estero y La Banda parecen no ser considerados o bien incorrectamente aplicados, pese a la existencia de estudios hidrológicos (Fariás et al. 2007) de gran valor. El uso actual de la zona de ribera del río se visualiza más como un recurso paisajístico, aunque sin una planificación urbanística que contemple la problemática hídrica. Por ejemplo, existen medidas estructurales para conducir eventualmente el agua de una precipitación pluvial de la ciudad de Santiago del Estero al río, conociendo la coincidencia de la lluvia extraordinaria con el período hidrológico de máxima del río Dulce, atentos que ambos períodos, de lluvias y crecientes, coexisten.

El estudio de esta corriente fluvial desde un enfoque integral, sistémico y temporal permitirá realizar un mejor análisis de los impactos que las obras pueden generar en toda la extensión de este ambiente y que seguramente repercutirá en una mejor y mayor vida útil de las mismas. Así en ese contexto, se podrán evaluar localmente las consecuencias directas o indirectas que pueden modificar la acción geológica del río.

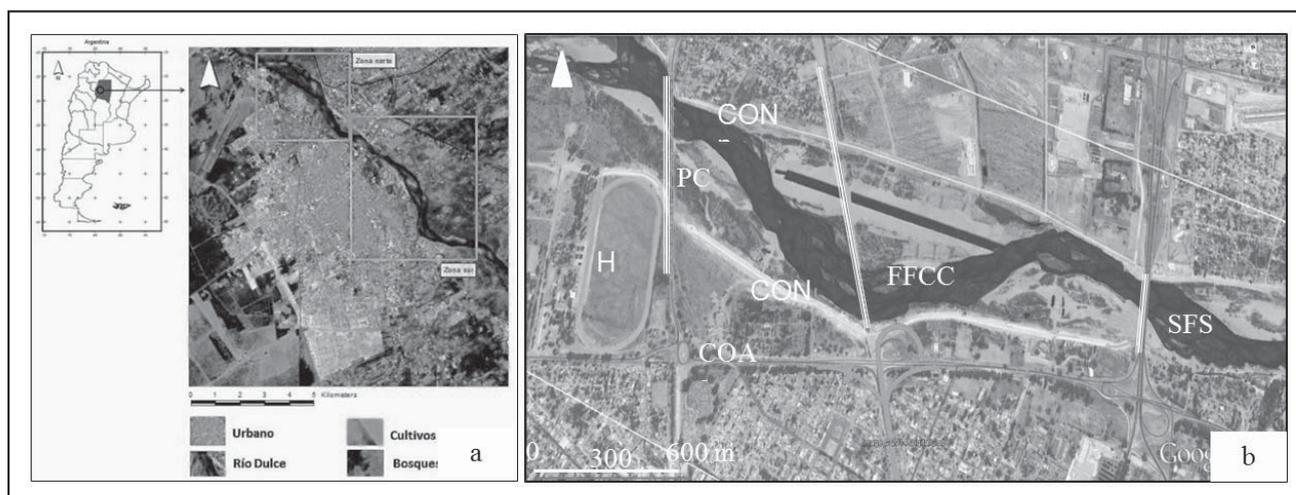


Figura 1. Área de estudio. a: Ubicación General. b: Obras principales. Puentes: PC, Carretero. FFCC: Ferroviario actual. SFS: San Francisco Solano. Costaneras: COA, antigua, CON, Nuevas. H: Hipódromo. Imagen Geoeye, en Google Earth, 24/09/2013.

También permitirá que toda medida no estructural de la auto-riedad de aplicación tenga, probablemente, un menor impacto en sus costos para afrontar la dinámica fluvial del río Dulce, al momento de ocurrir una creciente.

Dichas consideraciones, de carácter general, tendrían como principio de solución admitir que decisiones tomadas u obras realizadas tuvieron relación con resolver la contingencia más que ser producto de la aplicación de políticas hídricas. Por ejemplo, minimizar riesgos a personas y actividades que se realizan en la zona de ribera del río Dulce, ya sea advirtiendo o prohibiendo construir en el lecho, ocupar áreas de riberas inundables, márgenes sujetas a erosión permanente, etc. Considerando que el máximo caudal que puede derivar el Dique Termas de río Hondo es de  $2.409 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un máximo volumen embalsado de  $1.500 \text{ hm}^3$  (Martínez, 1999), podría significar un potencial peligro, si este último valor ocurriera. También se debería considerar la necesidad de preservar y controlar de posible contaminación en la zona de recarga del acuífero que el río Dulce alimenta, reserva subterránea que provee de agua potable a más del 65% de la población provincial.

## METODOLOGÍA

Para identificar algunas de las situaciones problemas identificadas anteriormente se efectuaron actividades en gabinete, campo y laboratorio, reconociéndose con ellas características geológicas estructurales, ambientes litológicos y rasgos geomorfológicos del río Dulce. Se recorrieron las obras ubicadas en las márgenes y en el lecho y se hicieron también observaciones referidas al estado general de las mismas y de los impactos que sobre ellas ejerce la acción geológica del río. En particular las construcciones recientes o en ejecución, ubicadas en el lecho ordinario y que provocan su contracción de modo significativo, pudiendo afectarlas y / o generar riesgos aún mayores en otros sectores urbanizados, asentamientos poblacionales, industriales, recreación, etc., ubicados en la ribera del río Dulce.

### Actividades de gabinete

Comprendió la búsqueda y recopilación de antecedentes, y su análisis y discusión de la misma en el marco de los criterios que llevaron a la elaboración del presente. La obtención de una serie temporal de imágenes satelitales desde el año 1975 hasta el año 2009 permitió constatar la migración del cauce con la aplicación de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), medir desplazamientos, determinar pendientes y construir perfiles transversales al mismo. La identificación de sinuosidades del río, el cauce de estiaje, lecho ordinario, los depósitos en barras longitudinales o en puntas, albardones, etc., aportaron al marco de referencia para una mejor comprensión de la acción geológica del río.

También se realizaron reuniones entre los autores de este trabajo y profesionales del medio relacionados a esta temática, aportaron puntos de vista que contribuyeron a priorizar los resultados obtenidos y que aquí se vierten y fundamentan. El análisis en general de datos hidrológicos e información obtenidas y / o textos consultados son citados en la bibliografía de referencia. Finalmente las tareas de elaboración del informe con gráficos y figuras como el armado del mismo, se encuentran entre las actividades correspondientes a este punto.

### Actividades de campo

Se recorrió el ambiente del río Dulce para observar y comprender los procesos de erosión, transporte y sedimentación en

las obras ubicadas en ambas márgenes del mismo, en especial entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda (Figura 1). También aguas arriba y aguas abajo de ambos ejidos urbanos se apreciaron las condiciones del escurrimiento natural del río, sin las alteraciones producidas por dichos asentamientos.

### Actividades en el laboratorio

Comprendieron la selección de imágenes satelitales históricas y recientes y su posterior procesamiento de los datos espaciales mediante SIG. Ello permitió realizar: i) transformaciones geométricas y estandarización de las imágenes, al efecto de una correcta comparación de la geometría del río, ii) observar los cambios en la geometría del Río Dulce, iii) digitalización del cauce en las diferentes fechas y generación de las líneas centrales correspondientes, iv) producción de un modelo de sombras del terreno a partir de un Modelo Digital del terreno (SRTM NASA), v) mediciones sobre las imágenes y polígonos, vi) elaboración de cartografía. Los procedimientos utilizados son los básicos para trabajos que buscan generar una base de datos terrestres y también su posterior procesamiento mediante SIG (Jensen 2007, Eastman 2006).

Los datos satelitales utilizados fueron: i) LANDSAT MSS 246-79 del 28.02.1975 (Servicio Geológico de los EEUU-USGS), ii) LANDSAT TM 230-79 del 10.01.1987 (USGS), iii) CBERS-2B HRC 171-B-131-3 del 28.03.2009 del catálogo de imágenes de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales-CONAE. Se analizaron otras imágenes de diferentes fechas, decidiéndose por las indicadas anteriormente ya que permiten detectar variaciones del río hasta la actualidad. También se emplearon imágenes Geoeye de la aplicación libre Google Earth, y utilizando sus posibilidades de visualización se identificaron elementos geomorfológicos y estructurales del lugar en estudio, coordenadas, altitud de puntos y perfiles transversales del terreno.

## CONTEXTO GENERAL. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA

La cuenca hidrográfica del río Salí - Dulce, ubicada en su mayor parte en las provincias de Tucumán y Santiago del Estero, nace en el macizo del Aconquija desde donde desciende a través de una extensa red de afluentes que formarán el río Salí, y se desarrolla hasta el Embalse de Río Hondo con su cuenca alta de  $20.400 \text{ km}^2$  a lo largo de 225 km. Desde el dique homónimo, el Río Dulce, o Mishky Mayu, por su topónimo quechua, escurre atravesando una zona de lomadas con cambiantes direcciones. Al Este de la ciudad de Santiago del Estero tiene una dirección general NO - SE y posteriormente N-S, para retomar el primer rumbo hasta su desembocadura. Atraviesa diagonalmente la extensa llanura de Santiago del Estero y en crecientes sus aguas inundan ambos lados de su cauce formando bañados, ocupando bajos, creando lagunas temporarias y finalmente desemboca en la Laguna de Mar Chiquita al SE provincial. El recorrido de este tramo es de 454 km, y es donde desarrolla su cuenca inferior de  $37.000 \text{ km}^2$ , que junto con la parte superior integran un total de  $57.400 \text{ km}^2$  (Martínez 1999).

El embalse Río Hondo, a cota de umbral de vertedero (272 msnm) tiene una capacidad de almacenamiento de  $1.155 \text{ hm}^3$  y de  $1.500 \text{ hm}^3$  a cota de compuerta de vertedero (274 msnm). El módulo del Río Dulce, actualizado al año 1.997 es de  $104 \text{ m}^3/\text{s}$  (Martínez, 1999), y desde su puesta en funcionamiento en el año 1967, los picos de crecidas máximas se produjeron en los años 1984, 2000 y 2007 con  $1.446 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1.395 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1.183 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente (Fariás et al. 2007).

Se aprecia que estos valores están por debajo de la capacidad de evacuación por vertedero de 2.409 m<sup>3</sup>/s (Martínez 1999), crecida máxima esta, que podría presentar a la salida del embalse.

El régimen de escurrimiento principal del río Salí - Dulce está comprendido entre los meses de diciembre a abril, dentro de su correspondiente año hidrológico y con sucesos de crecientes de envergadura entre enero a marzo (Martínez 1.999). El caudal instantáneo mayor conocido, aportado por su cuenca al embalse de Termas de Río Hondo, fue de 4.100 m<sup>3</sup>/s el 18 de marzo de 1994 y antes de la construcción de esa obra el mínimo fue de 0,00 m<sup>3</sup>/s, en noviembre del año 1937. Dicho valor fue registrado aguas abajo del dique mencionado en la estación de aforo El Sauzal, operada por la ex Agua y Energía de la Nación (Martínez, 1999).

### ASPECTOS DE LA GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGÍA

La información se obtuvo del estudio Geología del río Dulce entre Termas de Río Hondo y el Dique Los Quiroga (Collantes 1983), de la Carta Geológica Santiago del Estero (Martin et al. 2000), a lo cual se suman observaciones recogidas en el campo.

#### Litología del lecho

Entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda el lecho está formado por arenas finas micáceas grisáceas con gravas finas y sueltas. La figura 2 incluye la curva granulométrica y fotografías de los sitios de muestreo (Fariás et al. 2007) en la cual se observa el carácter homogéneo del material. Estos sedimentos superficiales del Holoceno recubren a un antiguo cono aluvial que formó el río Dulce (Martin et al. 2000), cuyo ápice se inicia a menos de 5km al NO del puente Carretero (Figura 1). Los depósitos del cauce, jóvenes, recientes y homométricos tienen la predisposición a ser erosionados generando un fondo móvil. Este comportamiento también ocurre en los márgenes durante tiempos relativamente cortos y observables a simple vista. Al Oeste de la zona de estudio, aguas abajo del Dique Los Quiroga, el ambiente del lecho ordinario del río se diferencia del anterior por estar conformado de limonitas y arcillitas rojizas laminadas y /o masivas del Plioceno Superior, descripta en un perfil litológico tipo (Collantes, 1983) y también observadas en el campo (Figura 2).

#### Estructuras geológicas

Las diferentes litologías del lecho rocoso están íntimamente relacionadas con la presencia de fallas, una de ella es la

de Huyamampa (Martin et al. 2000) que pasa por la ciudad de Santiago del Estero y que produjo el ascenso del bloque Oeste del área de estudio. Al Este de la misma se formó un cono aluvial, formado por arenas y gravas y que constituye la principal reserva de agua subterránea de Santiago del Estero y La Banda entre otras ciudades de importancia de la provincia. Desde el dique de Termas de Río Hondo hacia el Este y hasta un poco antes de ambos núcleos urbanos, el río circula entre fallas de direcciones cambiantes (Figura 3). Aquí, el lecho formado de limonitas y areniscas rojizas poseen diaclasas, y es por donde el río excava y modela su cauce (Figura 2) poniendo en evidencia el control estructural existente (Martin et al. 2000).

En secciones topográficas transversales al curso de agua, obtenidas de las imágenes Geoeye (Google Earth), se aprecian desniveles entre el talweg y las divisorias de 20 m, y que unos 6 km antes del puente Carretero se reducen a 12 m y permiten identificar distintos elementos geomorfológicos del Río Dulce (Figuras 3 y 4).

#### Elementos geomorfológicos y estructurales.

La acción geológica para modelar la superficie mediante procesos de erosión, transporte y sedimentación (Tarbuck y Lutgens 2005), no escapa a nuestro río que elaboró su ambiente fluvial donde se pueden observar las formas típicas (Bloom 1973). Entre los diferentes elementos geomorfológicos identificados, pueden mencionarse los erosivos como el lecho mayor, menor, canal de estiaje, terrazas erosión, márgenes cóncavas del cauce y faja de divagación del mismo, mientras los depósitos aluviales están integrados por islas en el lecho ordinario, barras de punta, depósitos en márgenes y terrazas aluviales (Figuras 4 y 5).

Se consideran como elementos estructurales (Tarbuck y Lutgens 2005) a las obras que se ejecutaron para controlar inundaciones, concepto que fue ampliado a las estructuras realizadas para sortear el lecho del río. Todas ellas tienen incidencia y modifican los elementos geomorfológicos anteriormente mencionados. Las obras se las designa conforme a la terminología local, así tenemos los puentes, Carretero, originalmente ferroviario, hoy remodelada como vial; el Negro, ferroviario y la autopista San Francisco Solano. Todas ellas permiten la comunicación entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda. Otras obras son: el Canal Matriz y el que conduce sus excedentes al río; costaneras, el hipódromo provincial; parque industrial y sectores urbanizados (Figura 5).

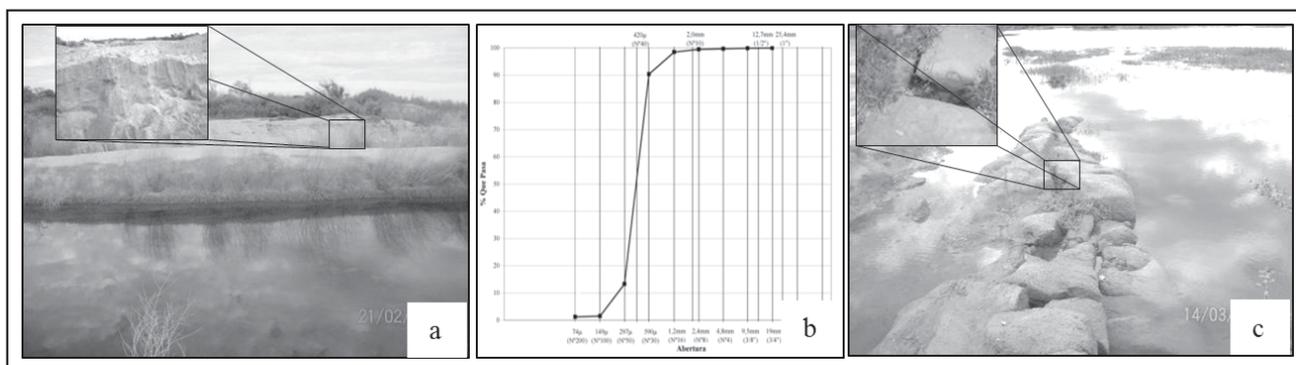


Figura 2. Litologías del río Dulce. a: Arenas micáceas grisáceas con gravas recientes. b: Curva granulométrica. c: Limonitas y arcillitas rojizas con diaclasas. Detalles en recuadros.

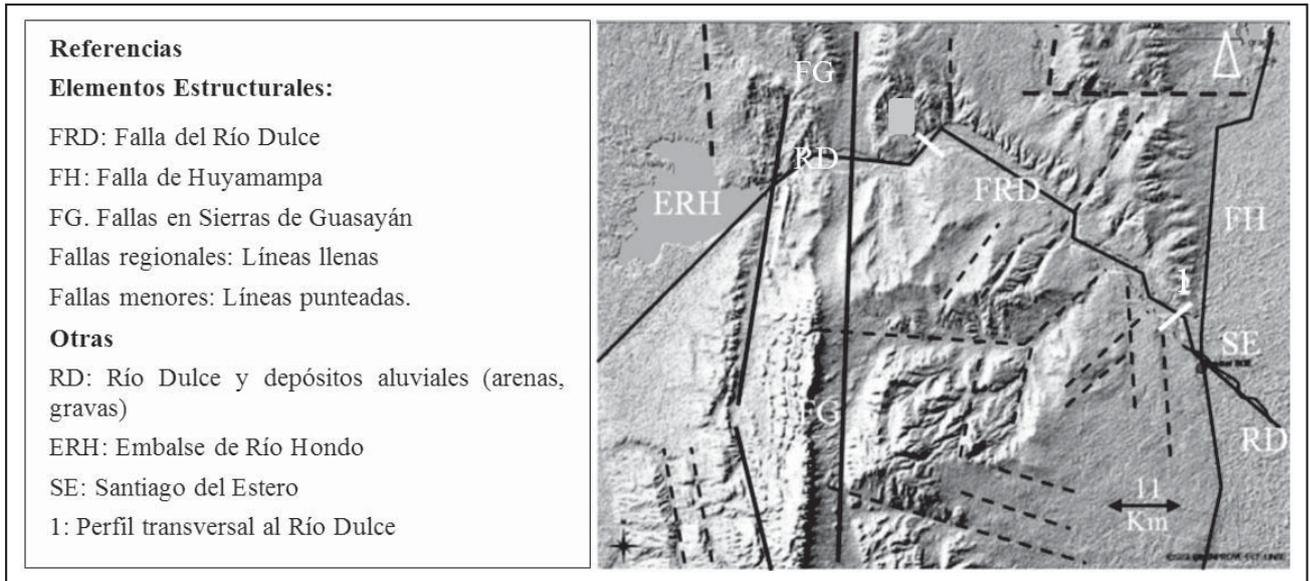


Figura 3. Fallas regionales, estructuras menores. Ubicación del perfil 1.

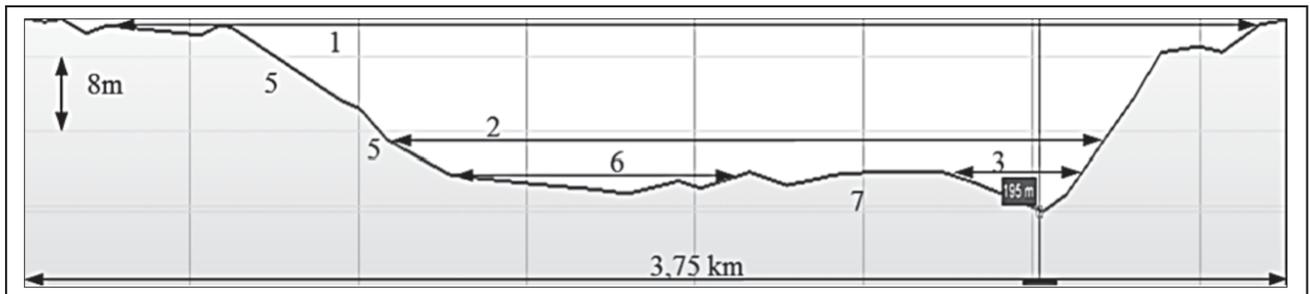


Figura 4. Perfil 1: (1): Antiguo valle del río Dulce (2) Llanura de inundación actual y (3) Lecho actual y canal de estiaje (4) Terrazas abandonadas, (5) zonas de canteras y (6) Cauces abandonados pasibles de activarse con crecientes (7) Depósitos actuales en forma de barras o islas.

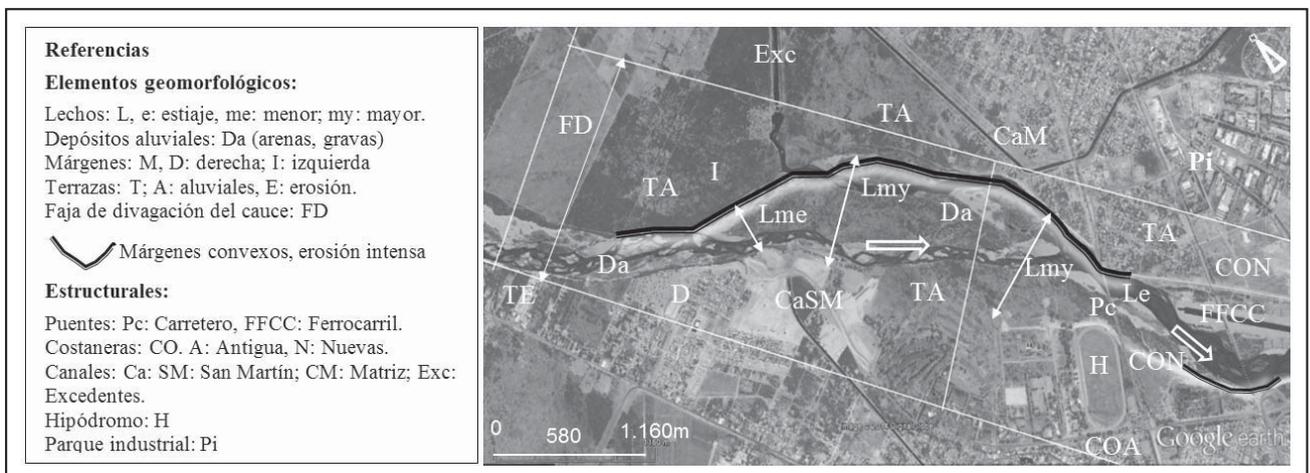


Figura 5. Elementos geomorfológicos y estructurales. 1: Imagen Geoeye, Google Earth 24/09/2013.

### Migración del cauce

Mediante el análisis temporal de imágenes satelitales entre los años 1973 al 2009, aguas arribas del puente Carretero, se constata el desplazamiento y ensanchamiento del cauce del río Dulce (Figura 6) cuando los escurrimientos comenzaron a desviarse al realizar el hipódromo. Se anularon 4 vanos (*Fariás et al. 2007*), contados desde el estribo derecho. El proceso natural de divagación del cauce habría sido acelerado hacia la margen izquierda, aunque también facilitado por el vuelco de excedentes provenientes del denominado Canal Matriz. El río fue erosionado lateralmente al lecho ordinario, provocando su ensanchamiento, en la dirección NE - E y poniendo en riesgo a los elementos estructurales próximos a la orilla izquierda (Figuras 5 y 6).

### Erosión

La serie temporal mencionada permitió estimar que la margen izquierda cóncava se desplazó aproximadamente 750m hacia el Este con 22m anuales de promedio, por lo que el río erosionará para diferentes caudales que no necesariamente deben ser excepcionales (Figura 7). Si continúa su acción, y no hay nada que lo impida ya que es una terraza aluvial, pondría en riesgo al Canal Matriz para riego. Con el empleo de la imagen Geoeye (Google Earth) se comprueba también la distancia

que lo separa del cauce actual, es de 93m, y el desnivel con el fondo del valle más de 8m (Figuras 4 y 7). Si el río captura a esa obra provocaría en principio, su rotura y podría avanzar a zonas urbanizadas, parque industrial, centros comerciales e incluso sedes de la UNSE (Figura 5 y 6).

La construcción de la costanera sobre margen izquierda del río, pasando por debajo de uno de los vanos del Puente Carretero, no llega a proteger dicho sector y si hubiese sido construida sería muy susceptible de ser erosionada como la que recientemente presentó deterioros en la base del talud después de una inundación. Se considera que ello ocurrió por estar realizada muy próximas al lado cóncavo del cauce, (Figura 4), aunque sin descartar cuestiones técnicas - constructivas.

En el sector de margen derecha se inició la construcción de la nueva costanera también pasando por debajo del puente Carretero, provocando una nueva reducción del lecho ordinario. Este agravante junto con el hipódromo y la costanera de margen izquierda, inutilizan 6 de los 12 tramos, disminuyendo el 50 % de los vanos útiles, para el paso de los grandes caudales. Es decir quedan 420m libres de los 840 m originales, (Figura 5). Esta situación lleva a que en la sección de paso del puente se agudicen procesos de erosión en el lecho menor y también de socavación de las pilas y cabezales. (*Fariás, et al 2007*)

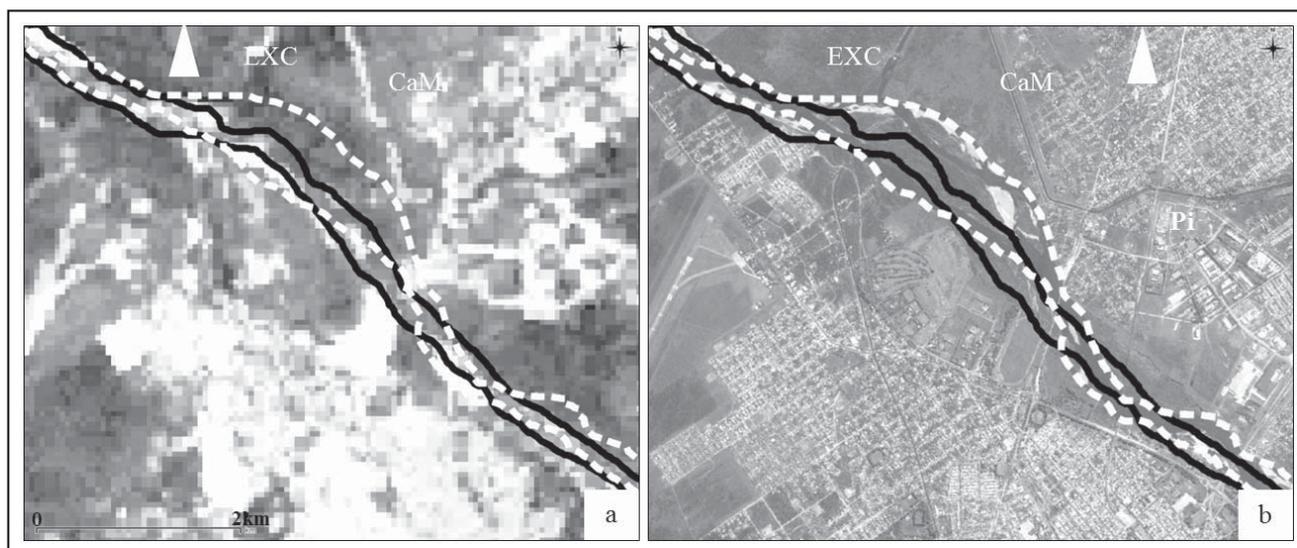


Figura 6. Evolución de la margen izquierda del río Dulce año 1973al 2009. (a): Imagen Landsat; (b): Imagen Geoeye, Google Earth 28/03/2009. Línea negra: lechos del año 1973, blanca: año 2009.

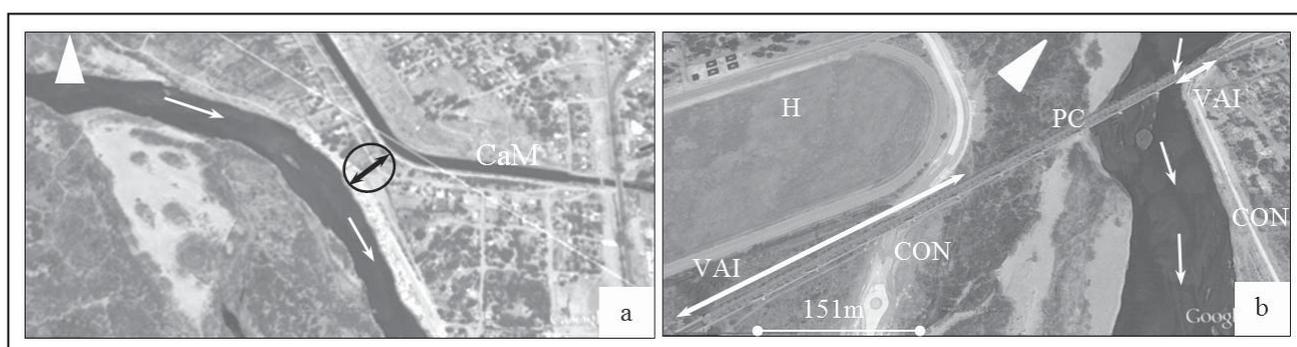


Figura 7. (a): Distancia entre el Río Dulce y el Canal Matriz (CaM) de 93m; (b): Vista en planta: estrangulamiento del lecho ordinario en el Puente Carretero: Pc. H: Hipódromo. CON: Costaneras nuevas. VAI: Vanos inutilizados: 420m de 840 m = 50%.

Una posible lectura es que dichas costaneras se comportan relativamente resistentes a la erosión, al ser compactadas y protegidas durante su construcción. En época de crecientes los caudales traen aparejado aumento de la velocidad y generan el incremento de flujos turbulentos, por lo que el fondo del lecho, al no estar densificadas sus partículas, será proclive a ser removido con mayor facilidad que las márgenes artificiales delimitadas con la costanera. Es decir se profundiza el lecho arenoso y los torbellinos que afectan la zona de cabezales y pilas del puente se harán más frecuentes socavándolos y exponiéndolos al riesgo de su eventual colapso y poniendo en peligro al Puente Carretero, (Figura 8).

Si bien estos procesos locales se producen al colocar obras en el lecho, la tendencia general de erosión del fondo del cauce, también se vio acelerada cuando se construyeron aguas arriba el azud Los Quiroga y posteriormente el Dique de Termas de río Hondo. Ambos embalses constituyen niveles de base locales, que contribuyen a la formación de depósitos de deltas en sus colas y aguas abajo a acelerar la erosión. Esta concatenación puede ser significativa si no se le presta la debida atención, ya que el Puente Carretero, obra emblemática del patrimonio santiaguense, podría verse amenazada seriamente por dicho proceso y también porque hay deterioros propios de la antigüedad de la obra tanto en sus pilas como cabezales de fundación expuestos a la intemperie. (Figura 8)

#### Sinuosidades menores

Entre los puentes Carretero, Negro y San Francisco Solano el río formó en su lecho arenoso (Figura 9) un cauce sinuoso donde las amplitudes y longitudes son menores, respecto a las que se desarrollan aguas arriba y aguas abajo de la primera y última de las mencionadas obras. Dicho desarrollo se interpreta como una adaptación del flujo del río a la ocupación por el uso urbano de ambas márgenes, particularmente la derecha más consolidada ya que se asienta la ciudad de Santiago del Estero. También se debe mencionar la presencia de las pilas y cabezales de los puentes indicados, que en el lecho ordinario del río modifican el escurrimiento del agua (Figuras 1, 5 y 8).

En un análisis expeditivo del terreno se obtuvieron gradientes a partir de imágenes Geoeye (Google Earth), en tres tramos del río: 1) aguas arriba del puente Carretero, con valores entre 6 y  $6,7^{-4}$ ; 2) desde el anterior y hasta el puente San Francisco, de  $2^{-3}$ ; 3) aguas abajo de este último, de  $8,9^{-4}$ . Es decir un valor, en orden de magnitud, similar al de aguas arriba del puente Carretero pero menores al tramo intermedio (Figura 8). Esos cambios de la pendiente, comprobable con estudios de detalle del lecho que exceden al presente trabajo, podría ser el motivo que en épocas de crecientes, produzca localmente la rotura del equilibrio erosión / velocidad, induciendo a la remoción de

partículas del mismo. Respecto a la canalización en la imagen, todavía no funcionó y al no registrarse una creciente importante su comportamiento tampoco se pudo evaluar. En principio propiciaría también el aumento de la velocidad del flujo, si por ella se encauza todo el caudal del río (Figura 9). Los hechos parecen corroborarlo, ya que graves problemas de socavación ocurrieron en los tres puentes (Figuras 8 y 10).

El Puente Negro, ferroviario, también posee daños significativos en cabezales y pilas por corrosión química y empujes mecánicos sobre tablas estacas con que fueron protegidas. Originalmente poseía una extensión de 1283 m y tiene hoy, entre ambas costaneras 780 m útiles. Es decir que supera a los dos puentes viales, aproximadamente en más del 46% al puente Carretero y un 60% al puente San Francisco Solano. Esta última obra en el año 2007 tenía una sección de 250m (Fariás, et al 2007) y actualmente es de 240m. Esta disparidad de largos en las medidas de los puentes permite, en base a las observaciones realizadas, fijar prioridades para actuar con el fin de evitar riegos por mayor socavación de dichas estructuras atento al costo que significa restituirlos e incluso rehacerlos, si son destruidas. En este sentido lo más conveniente sería construir pilas y cabezales más separadas en el lecho del cauce, o en el mejor de los casos evitarlas realizando estructuras seguras apoyadas sobre márgenes estables, o con cierta estabilidad relativa de los mismos en el tiempo, o bien estructuras que mejor se adapten a la dinámica fluvial del Dulce. En este contexto, la limpieza del lecho, acortar los cauces sinuosos menores, remover depósitos del mismo (Figura 5 y 8) podría facilitar el escurrimiento. Hacerlo en las actuales circunstancias y contenido de problemas, aceleraría la velocidad y con ello la capacidad de erosión del lecho y por ende de la socavación de las pilas. (Figura 9).

#### Aguas abajo del puente San Francisco Solano

Después de atravesar la mencionada obra, el río se dirige a la margen derecha y escurre de modo paralelo a ella. Esta protegida con espigones de escombros para evitar su erosión y posteriormente se dirige a la margen izquierda. Esta última está constituida por antiguos depósitos fluviales y es fácilmente removida por la acción erosiva del río excavándola sin dificultades. Este proceso pone en riesgo asentamientos poblacionales, que sin ninguna planificación fueron ocupando el lugar (Figura 11). Una interpretación de cómo llega a este lugar la acción erosiva del río tiene que ver con la protección de la margen derecha, la cual direccionó las corrientes de flujo hacia la izquierda ese lado de la ribera. Esta margen forma la parte de un cauce de mayor amplitud, sin defensas que la protejan como en el sector ubicado entre los puentes descriptos (Figura 11).

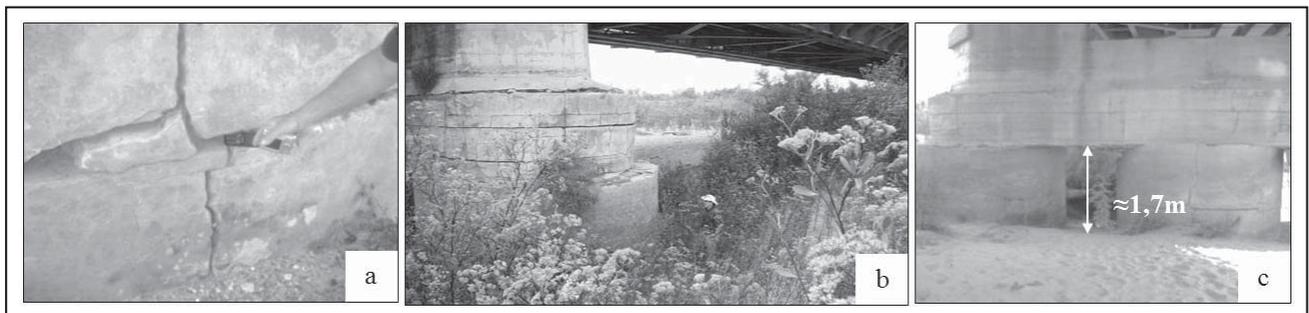


Figura 8. (a). Deterioros importantes en pilas (b).Socavación de las pilas y cabezales descubiertos, ver la persona de referencia. (c). Profundidad de la socavación de la pila. Febrero 2014.

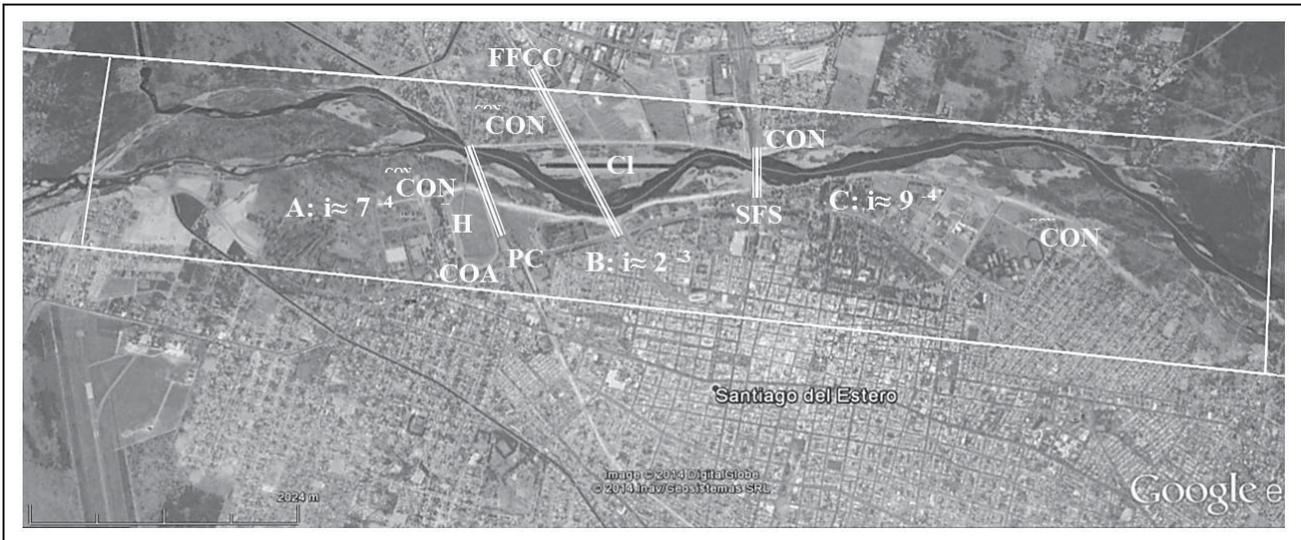


Figura 9. Tramos del río con diferentes pendientes: A: Aguas arriba del Puente Carretero (PC); B: Intermedio; C: Aguas abajo del Puente San Francisco Solano. CI: Canalización. H: Hipódromo. CO: Costaneras: A. Antigua. N: Nuevas.



Figura 10. Socavación de pilas y cabezales. (a): Puente Ferrocarril, con procesos de corrosión de las tablestacas de protección de pilas. (b y c): Puente San Francisco Solano, observar el eje mayor de los cabezales transversales a la corriente.

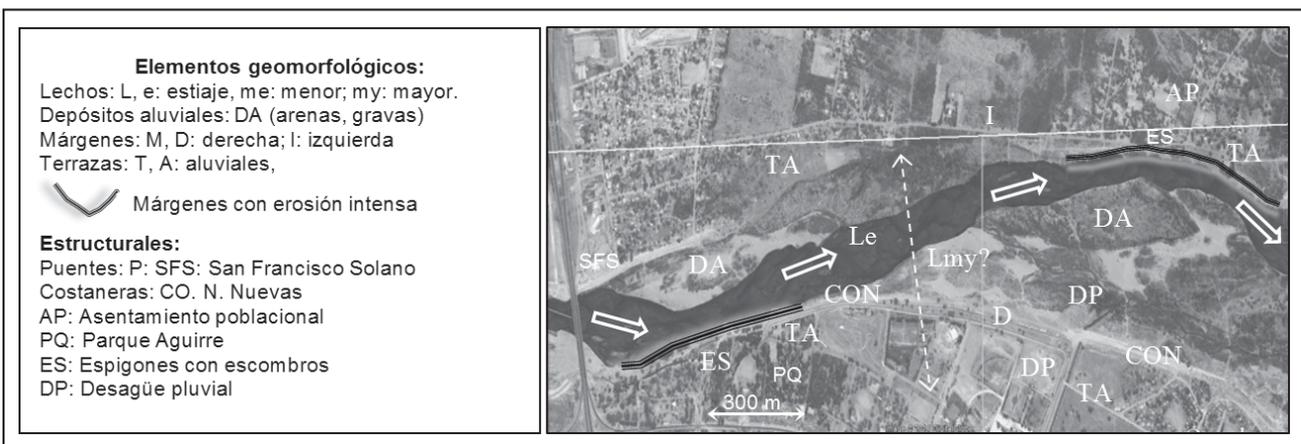


Figura 11. El flujo del río va de margen derecha a izquierda, poniendo en riesgo el asentamiento.

El análisis de la serie temporal de imágenes entre 1975 y 2009 también mostró la tendencia de la línea central del río a desplazarse a la izquierda, lo que acentuó en esa margen la erosión de la curva cóncava del cauce existente. En el año 2010,

durante la creciente registrada del río Dulce, se intervino construyendo espigones para su defensa cada 50m y 100 m de separación (Figura 10).

Una situación especial se observa en la margen derecha, donde existe uno de los desagües principales de la zona céntrica de la ciudad de Santiago del Estero. Este atraviesa la costanera, todavía en construcción, mediante una alcantarilla que lleva sus aguas al río, dentro de su llanura de inundación ordinaria. Si bien resulta una solución lógica para evacuar aguas de precipitación, no lo es si se analiza la posibilidad que el agua del río se introduzca por el canal de desagüe en épocas de creciente. Esto ya ocurrió en el año 2010 (Figura 11), por lo que dicho canal es una potencial vía de entrada de agua e inunda las zonas que pretende defender esa nueva costanera. En este contexto hipotético, ¿qué ocurriría si el desagüe pluvial no pudiera evacuar el agua de una lluvia de significativa intensidad en la ciudad? Se estará en la situación que el agua pluvial, impedida en su circulación, se desplace afectando a otros sectores urbanizados de la ciudad poniéndolos en peligro con posibilidad de riesgos evitables a los mismos.

### Consideraciones generales

Los problemas analizados individualmente en este trabajo tienen su propia complejidad, pero que durante las crecientes del río se pueden concatenar, interrelacionar y potenciar, haciendo aún más laborioso su estudio, y por ende la búsqueda de soluciones. Particularmente cuando en un ambiente fluvial se supera el umbral geomorfológico (Pitts, 1984), los procesos que actúan se tornan inmanejables, y en este contexto pueden también generar consecuencias sociales no deseadas. El río Dulce o Mishki Mayu, no está exento de ellos, por lo que la migración acelerada del cauce, erosión, contaminación potencial del río, colmatación de embalses, inundaciones, cambios de los sitios y volúmenes de depósitos del lecho, etc., van a continuar y en la medida que se intervenga inadecuadamente tenderán a agravarse.

### CONCLUSIONES

En el marco de todo lo expresado precedentemente los resultados presentados de este trabajo tienen el objetivo de aportar conocimientos que permitan la solución de los problemas identificados.

1. El tramo comprendido entre ambas ciudades del Río Dulce está siendo limitado en su divagación natural. El emplazamiento de la Santiago del Estero desde su fundación tuvo inundaciones que incluso obligó su traslado al actual sitio (Fariás et al, 2007); así que proteger y consolidar la margen derecha fue una constante en la historia de la ciudad. Las diversas acciones en ese sentido llevaron al Río Dulce a erosionar y avanzar hacia su margen izquierda para poder conducir los caudales de sus aguas. Por el contrario, la expansión de la ciudad de la Banda hacia el río, trajo como consecuencia que se tenga que hacer la costanera sobre margen izquierda y realizar acciones diversas de defensa (Figuras 5, y 7).
2. La amplia sinuosidad del cauce aguas arriba del puente Carretero en el río Dulce afecta la margen izquierda y pone en riesgo al canal matriz, ya que está solo a 93 m de los 800m originales que los separaba del río. Esta situación generada con la construcción del hipódromo, en parte del lecho ordinario, provocó la migración acelerada del cauce hacia la margen izquierda. También se ensanchó facilitado por los excedentes del canal matriz derivados al río Dulce, por lo que si el proceso continúa sin la adecuada protección de la margen se pondría en riesgo el azud construido para conducir los excedentes de aguas (Figura 7).
3. La construcción del Dique Los Quiroga y el Embalse de Termas de río Hondo, llevó que los procesos de erosión del fondo del lecho aumentarían aguas abajo manifestándose en la zona de estudio. A esto se agrega que durante crecientes importantes se produce la socavación de las pilas y cabezales de los puentes construidos sobre el río Dulce, por la anulación de vanos debido a la construcción del hipódromo, y las costaneras de defensa en ambas márgenes del río. (Figura 7).
4. En el puente San Francisco Solano, la colocación de escombros para protección del estribo de margen izquierda direccionaron el flujo del río hacia las pilas y cabezales, cuyo diseño original es inadecuado, por lo que fueron más socavadas y cedieron. Su reparación presenta también una inapropiada disposición al colocársela transversal al escurrimiento. (Figura 8)
5. Otra potencial causa que incidiría en el aumento de la socavación de las estructuras es el aumento de la velocidad en el tramo de sinuosidades menores del río, aunque para su comprobación se requerirá realizar estudios de detalles del cauce. Se estima a futuro que las obras más comprometidas son los puentes y las costaneras en contacto con el lecho del río. (Figura 9).
6. Aguas abajo del puente San Francisco Solano, la margen derecha del cauce se encuentra protegida relativamente mediante la nueva costanera; aunque es conveniente aclarar que al ser atravesada por el desagüe pluvial a cielo abierto de la ciudad de Santiago del Estero esta obra puede permitir la entrada de agua del río, al área que pretende proteger de las inundaciones. Será necesario evitar la erosión del margen izquierdo, ya que a tan solo 70 m se encuentra un asentamiento poblacional (Figura 11).
7. Finalmente si se quiere corregir y mejor actuar en los problemas planteados, se considera que sobre la base del conocimiento de todos los actores involucrados, directamente o indirectamente, se deben articular acciones estructurales, como el camino que permita arribar a las soluciones pertinentes. Transitarlo tendrá el objetivo de lograr el mejor y seguro desarrollo de la ribera del Mishky Mayu, o río Dulce, para el presente y futuro de la población de las ciudades de Santiago del Estero y La Banda.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BLOOM, A. 1973

La superficie de La Tierra.  
4 (53 - 69) Ediciones Omega S.A.

COLLANTES M. 1983

Geología de la cuenca del río Dulce entre Termas de Río Hondo y Los Quiroga con énfasis en Geomorfoloía.  
Facultad de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Tucumán. IIB2 C (17-48); IIIB3 (59-60).

- EASTMAN, J. R. 2006.  
Idrisi Andes Guide to GIS and Image Porcessing.  
*Clark Labs, Clark University, Worcester, MA, USA.*
- FARÍAS, ET AL. 2007.  
Estudios hidráulicos y fluviales del Rio Dulce para la determinación de línea de ribera e impacto de obras Provincia de Santiago del Estero,  
*Consejo Federal de Inversiones, Universidad Nacional de Santiago del Estero. I: (2 - 8).I.5: (13 - 21).*
- JENSEN, J. R., 2007.  
Remote sensing of the environment: an earth resource perspective.  
*2nd Ed. Prentice Hall, USA.*
- MARTÍN ET AL 2000  
Carta geológica de Santiago del Estero 2763-III.  
*Servicio Geológico Minero Argentino - Universidad Nacional de Santiago del Estero.*
- MARTÍNEZ N, 1999  
Aprovechamiento del rio Dulce, Proyecto Ejecutivo del Dique Derivador Tuhama.  
*Provincia de Santiago del Estero, Consejo Federal de Inversiones. I: (2 - 4).*
- PITTS, J. 1984.  
A Manual of Geology for Civil Engineers.  
*1: (6 -9). Word Scientific Publishing Co.*
- TARBUCK E. J. Y LUTGENS F. K. 2005.  
Ciencias de La Tierra. Una introducción a la Geología Física.  
*5: (111- 121); 10: (213 - 234). Prentice Hill.*

# 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. En el caso que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras, las "Palabras clave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords". A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea inglés, la primera sección será el "Abstract" de hasta 250 palabras, seguido de las "Keywords" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Resumen" y las correspondientes "Palabras clave" en español. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "Resumo" de hasta 200 palabras, seguido de las "Palavras chave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords" en inglés. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a interlineado sencillo, con sangría de un centímetro y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán

los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.

- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 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 superior 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  $\frac{Sy}{Xm}$
- 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 y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. 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.
- 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.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,..... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).
- 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 01-04-2015):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **480** Pesos
- Compra de número atrasado: **420** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **210** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **55** Dólares
- Compra de número atrasado: **45** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-04-2015):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **600** Pesos, en formato electrónico, y **800** Pesos en edición papel
- Suscripción Instituciones: **2400 / 3200** Pesos
- Compra de número atrasado: **420** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **210** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **67** Dólares, en formato electrónico, y **89** Dólares en edición papel
- Suscripción Instituciones: **268/356** Dólares
- Compra de número atrasado: **45** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

**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)

Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en [www.asagai.org.ar](http://www.asagai.org.ar)

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

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2015  
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Junio de 2015