

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Propuesta de un índice de escurrimiento potencial basado en el método del CN, imágenes satelitales y SIG  
*Presutti, Miriam - Barrera, Daniel - Rosatto, Héctor*

La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina

*Albouy, Edgardo René - Carrica, Jorge Carlos - Lexow, Claudio - Lafont, Daniela - Bonorino, Guillermo*

Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana

*Holzman, Mauro - Rivas, Raúl - Piccolo, María Cintia*

Comportamiento de morteros y hormigones con la adición de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados

*Señas, Lilia - Priano, Carla - Maíza, Pedro - Marfil, Silvina*

Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina

*Abascal, Liliana - González Bonorino, Gustavo - Bujalesky, Gustavo G. - Coto, Claudio*

Evaluación de la peligrosidad de flujos rápidos del volcán Lanín (Neuquén, Argentina)

*Salminci, José G. - Malagnino, Eduardo C.*

Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal

*Chacón, José*

Bases metodológicas para la cartografía de riesgos naturales en zonas costeras

*González de Vallejo, L. I. - Seisdedos, J. - Mulas, J. - Rodríguez Franco, J. A. - Gracia, F. J. - Garrote, J. - Del Río, L.*

Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia Michoacán, México

*Arreygue Rocha, E. - Pastor Gómez N. - Chávez Negrete, C. - Alarcón Ibarra, J.*

La gestión del riesgo para enfrentar los mitos y realidades del calentamiento global antropogénico

*Mora Castro, Sergio*

Institucional.

10° Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.

Portada: Bosque petrificado Chubut, Argentina. *Fotografía: Sergio Mora Castro*

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



Publicación Oficial de la

---

ASOCIACION ARGENTINA  
DE GEOLOGIA APLICADA  
A LA INGENIERIA

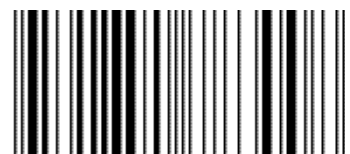
---

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

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

Número 28 • 2012

ISSN 1851-7838





---

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

### DIRECTOR

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

### SECRETARIO

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

### EDITOR ASOCIADO

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

### COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

### PRODUCCIÓN EDITORIAL

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

Webmaster                 *Mauricio Balocco*  
mauricio.b@grupoweb.com

---

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

**COMISIÓN DIRECTIVA 2010 - 2014**

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

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

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Staff		I
Comisión Directiva		II
Propuesta de un índice de escurrimiento potencial basado en el método del CN, imágenes satelitales y SIG	<i>Presutti, Miriam - Barrera, Daniel Rosatto, Héctor</i>	1
La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina	<i>Albouy, Edgardo René - Carrica, Jorge Carlos Lexow, Claudio - Lafont, Daniela Bonorino, Guillermo</i>	15
Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana	<i>Holzman, Mauro - Rivas, Raúl Piccolo, María Cintia</i>	25
Comportamiento de morteros y hormigones con la adición de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados	<i>Señas, L. - Priano, C. - Maiza, P. Marfil, S.</i>	35
Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina	<i>Abascal, Lilitiana González Bonorino, Gustavo Bujalesky, Gustavo G. - Coto, Claudio</i>	45
Evaluación de la peligrosidad de flujos rápidos del volcán Lanín (Neuquén, Argentina)	<i>Salminci, José G. - Malagnino, Eduardo C.</i>	57
Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal	<i>Chacón, José</i>	73
Bases metodológicas para la cartografía de riesgos naturales en zonas costeras	<i>González de Vallejo, L. I. - Seisdedos, J. Mulas, J. - Rodríguez Franco, J. A. Gracia, F. J. - Garrote, J. - Del Río, L.</i>	91
Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia Michoacán, México	<i>Arreygue Rocha, E. - Pastor Gómez N. Chávez Negrete, C. - Alarcón Ibarra, J.</i>	103
La gestión del riesgo para enfrentar los mitos y realidades del calentamiento global antropogénico	<i>Mora Castro, Sergio</i>	111
Instrucciones para autores		127
Formulario de suscripción o compra		129
Institucional.		131



## MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

### Misión y objetivos de la publicación

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

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

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

### Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

### Precio de la revista

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

En la página 129 encontrará el formulario a completar a tal efecto



## Aims and objectives

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

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

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

## Authors Copyrights

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

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

## Price of the Journal

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

*In page 129 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



# Propuesta de un índice de escurrimiento potencial basado en el método del CN, imágenes satelitales y SIG

## *Proposal of a potencial runoff index based on CN method, satellite image and GIS*

Presutti, Miriam <sup>1</sup> ✉ - Barrera, Daniel <sup>2-3</sup> - Rosatto, Héctor <sup>3</sup>

Recibido: 01 de Julio de 2011 • Aceptado: 05 de Diciembre 2011

### Resumen

*En este trabajo se propone un índice para la estimación del escurrimiento superficial potencial a partir de imágenes satelitales, basado en la clasificación de suelos, vegetación y tratamiento (SVT) utilizada en el cálculo del CN. Para ello, se siguió una secuencia de operaciones aplicada en cada píxel para generar cuatro mapas: i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica: obtenido a través de la clasificación ISÓDATA de datos satelitales corregidos radiométrica y geoméricamente (reflectancia) en conjunto con los índices de vegetación y nuevas bandas obtenidas por la transformación Tasseled Cap; ii) Mapa de Número de Curva: al mapa anterior se le suman los datos de grupo hidrológico de suelos para así generar un nuevo mapa donde cada clase SVT tiene asignada un valor de CN.; iii) Mapa de pendientes: generado a partir del DEM del SRTM de 90 m remuestreado a 30m y iv) Mapa de Índice de Escurrimiento Potencial: aplicando una ecuación aquí propuesta utilizando como ingreso los mapas anteriores. Los resultados, utilizando imágenes LANDSAT TM, demostraron que es posible elaborar un mapa del índice potencial de escurrimiento de un área en un momento específico. La metodología desarrollada ofrece una herramienta de altísima definición a nivel de cuenca al determinar los escurrimientos potenciales en cada área elemental o píxel.*

**Palabras clave:** *Escurrimiento superficial potencial, número de escurrimiento, imágenes satelitales.*

### Abstract

*In this work an index is proposed to estimate the potential surface runoff using satellite images data. The proposed index is based on the soil classification, and the soil-vegetation treatment (SVT) used in the CN calculation. For that purpose, a sequence was followed and applied to all pixels to generate four maps:*

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. 60 y 118 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina. Tel: + 54-221-4236616

✉ presutti@agro.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Rivadavia 1917, Capital Federal

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, Capital Federal - CP: 1417. Tel.: 54-11-45248008

i) *Land use and hydrological condition map*: obtained by ISODATA classification of radiometric and geometrically corrected satellite data (reflectance) in conjunction with vegetation indexes and new bands created with the Tasseled cap Transformation. ii) *Curve Number map*: to the previous map an hydrological group of soil data is added, in order to generate a new map where each SVT class has a CN value; iii) *Slope map*: created from SRTM DEM 90 m resampled to 30 m and iv) *Potential Runoff Index map*, by applying the equation proposed here using the previous maps as inputs. The results, using Landsat TM data, have demonstrated that it is possible to make a potential runoff index map for an area at a given time. The developed methodology offers a very high definition tool to determine the potential runoff at each elementary area or pixel at watershed level.

**Keywords:** Potential runoff, curve number, satellite images.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de generación del escurrimiento superficial intervienen factores que caracterizan la magnitud de la crecida y entre ellos, la infiltración es de fundamental importancia, ya que separa el escurrimiento directo del subterráneo. El escurrimiento potencial -el máximo posible- para un área de terreno con ciertas características topográficas, edafológicas y de cobertura dadas, es uno de los parámetros más frecuentemente utilizados en la simulación de inundaciones o mapas de riesgo hídrico. El escurrimiento puede generar erosión si su volumen supera determinado umbral y existen condiciones adecuadas para ello. La erosión hídrica, a su vez, provoca la pérdida del horizonte superior del suelo, generando una disminución de la productividad de dicho suelo y aumentando además las condiciones favorables al escurrimiento. El grave impacto ocasionado sobre el ambiente hace necesaria la búsqueda de nuevos métodos de control, en especial, aquellos relacionados con el cálculo o estimación del escurrimiento potencial de un área en un momento dado. El volumen de escurrimiento está determinado por diferentes variables, tales como precipitaciones, área contribuyente, infiltración y evapotranspiración. Su interacción en tiempo y espacio hace difícil su medición (Singh 1992). Por ello, el cálculo o estimación del escurrimiento debe hacerse bajo métodos que reflejen correctamente la interacción entre dichas variables.

Se han desarrollado diversos métodos para la obtención del escurrimiento superficial en una cuenca hídrica. Uno de los modelos conceptuales más utilizados es el método propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS) de los EEUU, actualmente *Natural Resource Conservation Service*. (NEH-4 1964; NRCS, 2004). Éste emplea tres variables para determinar el escurrimiento directo real: la precipitación, la abstracción inicial y la infiltración potencial máxima (ver ecuación 1). Esta última variable está relacionada con el número de curva CN que a su vez depende del complejo hidrológico suelo-vegetación-tratamiento (SVT). El SCS ha establecido categorías de SVT y asignado empíricamente a cada una un valor de CN, el cual luego es modificado según la humedad antecedente (Chow et al. 1994; Maidment 1992; Orsolini et al. 2000). El valor del CN representa la fracción porcentual de la precipitación que escurre superficialmente en una cuenca después de considerar los efectos combinados de tipo de suelo, cobertura vegetal, tratamiento, condición de humedad antecedente y condición hidrológica. En el manual TR-55 del SCS (1972) se detallan las tablas que relacionan las curvas número con condiciones promedios de humedad antecedente para combinaciones específicas de grupos hidrológicos de suelo, cubierta, tratamiento y condición hidrológica. Los suelos son clasificados en uno de los cuatro grupos hidrológicos de suelo de acuerdo a su velocidad

de infiltración máxima, el tipo de cobertura usualmente se determina a partir de datos de campo, fotos aéreas, mapas o imágenes satelitales mientras que el tratamiento describe el manejo de las tierras cultivadas. La condición hidrológica se basa en una combinación de factores que afectan la infiltración y el escurrimiento y se clasifica como buena, aceptable y mala, según los criterios del manual TR-55.

El método del SCS se utiliza especialmente para el cálculo del escurrimiento en cuencas con insuficiencia de datos. Dado un evento lluvioso, el escurrimiento directo Q es siempre menor o igual a la cantidad de precipitación P. El método se basa en dos hipótesis: la primera es que al principio de la lluvia existe una cantidad de precipitación, llamada abstracción inicial para la cual no habrá escurrimiento, de donde se deduce que el escurrimiento potencial es la diferencia entre la precipitación y la abstracción inicial (P-I<sub>a</sub>). La segunda establece que la relación entre el volumen de agua infiltrado en la cuenca (P-I<sub>a</sub>-Q) y su valor máximo posible S, es igual a la relación entre Q y (P-I<sub>a</sub>). Entonces la ecuación del volumen de escurrimiento en una cuenca hídrica, expresado en altura al dividir dicho volumen por el área de la cuenca, es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

La abstracción inicial considera todas las pérdidas antes de que comience el escurrimiento. Esto incluye el agua retenida en las depresiones superficiales, agua interceptada por la vegetación, evaporación e infiltración. La es muy variable pero generalmente se relaciona con parámetros de tipo de suelo y cobertura vegetal (Tucci, 1994). Varios autores han estudiado la relación entre I<sub>a</sub> y S y han propuesto una relación lineal con diferentes valores para el coeficiente de proporcionalidad, los cuales varían entre 0,095 y 0,38, con un valor medio de 0,2 para cuencas rurales. Se incorpora entonces al método CN la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0,2 * S \quad (2)$$

El valor promedio de 0,2 se obtiene de numerosas pruebas de campo realizadas en cuencas rurales de 10 hectáreas y con una precipitación de más de 600 mm anuales. Al combinar las ecuaciones (1) y (2) se obtiene una expresión que emplea S y P para hallar el escurrimiento:

$$Q = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{(P + 0,8 * S)} \quad (3)$$

El SCS obtuvo empíricamente una familia de CN, cada uno de los cuales relaciona los volúmenes de precipitación y escurrimiento para un determinado valor de la infiltración potencial máxima  $S$ . Las curvas se numeran de 0 a 100, correspondiendo el valor 100 a infiltración y abstracción inicial nulas. La relación, cuando  $S$  se expresa en pulgadas como volumen de infiltración por unidad de área, es la siguiente:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4)$$

El valor de  $S$  está relacionado a su vez con las características del complejo suelo-vegetación-tratamiento (SVT).

Por último, este método combina las características anteriormente nombradas con la Condición de Humedad Antecedente (CHA), que es el contenido de agua presente en el suelo en un momento dado; su valor refleja el efecto de la infiltración en el volumen y velocidad de escurrimiento (Singh 1992), siendo la condición I para suelos secos, la III suelos saturados y la II condiciones intermedias; se considera la lluvia caída en los 5 días previos al evento a modelar y diferenciando si la estación es de crecimiento o latencia. El SCS generó una tabla, donde se combinaron todos los complejos SVT y sus CN correspondientes para la condición II de humedad antecedente y pendiente moderada (USDA 1986); (Chow et al. 1994). Silveira et al. (2000) propusieron una metodología para estimar la humedad de una cuenca previo a una precipitación mediante un índice de humedad antecedente computando 15 días.

Cuanto mayor es el CN, mayor es el escurrimiento  $Q$ , si bien la relación entre ambos no es lineal. Los principales factores para determinar el CN son: grupos hidrológicos de suelos, tipo de cobertura, uso y tratamiento del suelo. El CN es por lo tanto un indicador de la potencialidad de un área de terreno con pendiente moderada para producir escurrimiento. Los valores de CN provistos por el SCS fueron determinados a escala de unidades areales con similares características SVT y pendiente moderada.

En el método del SCS se asigna a  $S$  un valor único para toda la cuenca, que corresponde a un valor medio de CN. Dicho valor medio es evidentemente un promedio ponderado de todos los valores de CN asociados a los tipos SVT presentes en la cuenca. Sin embargo, la pendiente influye en el escurrimiento potencial en la escala en que lo estamos tratando (área de un píxel, o en general área elemental). Por otra parte se ha reportado (Puricelli 2008) que a medida que aumenta el grado de promedio en los valores de CN, el método pierde precisión, provocando errores por exceso en la estimación de volúmenes de escurrimiento.

Colectar la información de campo con técnicas "in situ" consumen tiempo y dinero, una alternativa para medir la cantidad y condición de la vegetación se basa en analizar medidas espectrales captadas por sensores satelitales (Goel y Norman 1992). Dado que los parámetros de entrada más importantes al modelo del SCS son uso del suelo y tipo de suelos, este modelo es potencialmente compatible con datos satelitales (Shi et al. 2007). Al poder determinar, a partir de imágenes satelitales, información relacionada con la cobertura presente en un área, se abre la posibilidad de caracterizar el escurrimiento potencial en cada píxel de una imagen. Variadas investigaciones se han realizado tendiendo a reducir el dato de múltiples bandas a un solo valor de píxel para estimar características de las cubiertas vegetales. Uno de los primeros índices de vegetación que han tenido éxito fue desarrollado por Rouse et al. (1973) basado en

la relación entre dos bandas, una en la región del visible y otra en el infrarrojo, cuanto mayor sea el valor del índice en un píxel mayor es la cantidad de vegetación fotosintetizante presente. Otro índice muy importante en estudios de vegetación es la denominada transformación Tasseled Cap desarrollada por Kauth y Tomas (1976) usando datos del sensor MSS y posteriormente evaluada para TM por Crist y Cicone (1984).

En el presente trabajo se propone una metodología para estimar un índice de escurrimiento superficial potencial para cada píxel, basado en datos edáficos y en dos parámetros obtenibles a partir de datos satelitales ópticos y radar: por una parte, la identificación de los complejos vegetación-tratamiento utilizada para calcular el valor de  $CN$ , y por otra, la pendiente del terreno generada a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Determinación de grupos hidrológicos, clases SVT y pendientes del terreno

Se propuso y desarrolló una metodología para la estimación del complejo SVT a través de la clasificación de imágenes satelitales y su integración con datos edáficos y topográficos. En la Figura 1 se observa el diagrama de flujo de todos los pasos seguidos en este trabajo.

La metodología consistió en las cuatro siguientes etapas: i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica; ii) Mapa de Número de Curva; iii) Mapa de pendientes y iv) Mapa de Índice de escurrimiento Potencial.

#### i) Mapa de uso de suelos y condición hidrológica

En la primera etapa se calibró radiométrica y geométricamente la imagen y se clasificó con el programa Erdas Imagine 8.4 para extraer la información de la cobertura vegetal. La atmósfera presente entre el terreno y el sensor introduce perturbaciones y la energía grabada por el sensor no es la misma que aquella reflejada o emitida por la superficie. La radiación solar en su viaje en el vacío no es afectada, pero al interactuar con la atmósfera es dispersada o absorbida selectivamente, según la longitud de onda (Jensen 1996), la región del infrarrojo está prácticamente libre de los efectos de la atmósfera mientras que la región del visible es fuertemente influenciada por ésta. De allí la importancia de la calibración radiométrica cuando se utilizan diferentes bandas para derivar índices. Por otra parte, en la calibración geométrica se utiliza el método de remuestreo del vecino más cercano ya que el valor del píxel no es alterado en el proceso (Duggin y Rodinove 1990). El método más comúnmente utilizado para medir el error de la corrección geométrica es el error medio cuadrático (RSM error) para cada punto de control individual y total para la imagen completa. (Ton y Jain 1989) siendo el error aceptado menor a un píxel.

Se procesaron los datos originales para obtener nuevas capas de información, con las cuales derivar las características del complejo Vegetación-Tratamiento. Se calcularon el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el NDTI Normalized Difference Tillage Index (Zhongming et al. 2010), y tres nuevas capas de información mediante la denominada Transformación Tasseled Cap: Brillo, Verdor y Humedad. La variable Brillo indica el albedo a través de las reflectancias en tres bandas del espectro visible, la variable Verdor indica la presencia de vegetación mediante el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo cercano y la variable Humedad se relaciona con el contenido de agua en suelos y vegetación y está asociada con la reflectancia en el infrarrojo medio (Chuvieco 2002).

Con estas nuevas bandas obtenidas se realizó una clasificación, donde cada píxel de la imagen es asignado a una clase determinada mediante el algoritmo de clasificación ISODATA (Tou y Gonzalez 1977; Jain 1989). Previo al proceso de clasificación es necesario definir la lista de todas las clases de interés (Gong y Howarth 1992). Las clases utilizadas en la clasificación fueron las que el SCS utiliza para definir los valores de CN en los complejos SVT. El resultado final de esta primera etapa es el mapa de uso de suelo y condición hidrológica de la vegetación.

### ii) Mapa de Número de Curva

Los datos de suelos fueron obtenidos a partir de cartas de suelo del INTA escala 1:50.000, donde se delimitan las unidades cartográficas. Cada unidad cartográfica fue asignada a uno de los cuatro grupos hidrológicos comparando sus características texturales y de drenaje con las descritas exhaustivamente en la bibliografía (*National Engineering Handbook, Section 4-Hydrology 1964; Singh 1992*). Se han reportado diferentes estrategias para la asignación de los suelos a los grupos hidrológicos, por ejemplo la utilización de un mapa de capacidad de drenaje, de la cartografía digital del INTA 1:500.000 como apoyo para esta asignación (Bacchiaga et al. 2010) o estimando la conductividad hidráulica saturada de cada horizonte por medio de la utilización de funciones de pedotransferencia (Crededio et al. 2010)

Los datos vectoriales de suelos fueron convertidos a raster para integrarlos a los datos de vegetación en un entorno SIG. Con la clasificación anterior se obtuvieron los datos de cobertura y uso del suelo y luego se añadieron los datos de grupo hidrológico para así generar un nuevo mapa donde cada clase SVT tiene asignada un valor de CN.

### iii) Mapa de pendientes

En la tercera etapa de la metodología se determinó la pendiente del terreno, calculada a partir de datos de elevación del Shuttle Radar Topography Misión, SRTM con 90 m de resolución. (Jarvis et al. 2008). La pendiente fue calculada en grados y luego convertidas a radianes, pues así lo requiere la siguiente etapa. La pendiente influye en el escurrimiento superficial pues la velocidad de desplazamiento en manto en el píxel considerado es proporcional a aquella. A su vez, un desplazamiento más rápido reduce la infiltración en el píxel considerado.

### iv) Mapa de Índice de escurrimiento Potencial

El SCS obtuvo empíricamente una familia de números de curva CN, cada uno de los cuales relaciona los volúmenes de precipitación y escurrimiento para un determinado valor de la infiltración potencial máxima S en la cuenca bajo análisis. Dicha infiltración, con un valor único válido para la cuenca - considerada como una unidad de escurrimiento e infiltración - a su vez, está relacionada en forma inversa y no lineal con el CN. Un valor de CN igual a 100 indica infiltración potencial máxima nula (ver ecuación 4). En el otro extremo, un valor nulo de CN indica que toda el agua de lluvia se infiltra y el escurrimiento es nulo.

En el método del SCS, el valor único de S para la cuenca corresponde a un valor medio de CN para la misma. Dicho valor medio es evidentemente un promedio ponderado de todos los valores de CN asociados a las unidades areales (por ejemplo, lotes cultivados) presentes en la cuenca, cada una de las cuales tiene asociado un valor de SVT. La pendiente del terreno no está incluida en la ecuación (3) del SCS, pues el estudio

y posterior clasificación realizado por este organismo consideró solamente cuencas con pendiente media moderada.

Sin embargo, la pendiente influye en el escurrimiento potencial en la escala en que lo estamos tratando (área de un píxel, o en general área elemental); el escurrimiento aumenta con la pendiente (Maidment 1992; Chow et al 1994). Por otra parte, Puricelli (2008) mostró que a medida que aumenta el área considerada y por consiguiente el grado de promedio areal en los valores de CN, el método pierde precisión, provocando errores por exceso en la estimación de volúmenes de escurrimiento.

En virtud de estas consideraciones proponemos un índice de escurrimiento potencial que aumente con la pendiente del área elemental considerada, y que a la vez sea directamente proporcional al valor de CN correspondiente a dicha área. La expresión propuesta para el cálculo del índice de escurrimiento potencial, de acuerdo con las consideraciones expuestas, es la siguiente:

$$Ie_{pot} = CN * (0,1 + Slope / Slope_{max}) \quad (5)$$

donde  $Ie_{pot}$  es el Índice de escurrimiento potencial, Slope es la pendiente y  $Slope_{max}$  es la pendiente máxima esperable (tangente trigonométrica del ángulo).

Dado el tamaño del píxel (30m de lado) se fijó el valor de  $Slope_{max}$  igual a 0,7; este valor máximo es función de la resolución espacial usada, debiendo usarse un valor menor si el tamaño del píxel es mayor, ya que la integración areal disminuye la pendiente media del terreno. Para el tamaño de píxel considerado en el presente trabajo el valor de  $Slope_{max}$  solo podría ser alcanzado en zonas extremadamente escarpadas (Chow et al 1994).

Con la expresión propuesta el índice varía entre 0 y 100. El término 0,1 se ha incluido para tener en cuenta la pendiente de la superficie del agua que inunda el terreno en zonas de llanura, la cual puede ser distinta de la pendiente del terreno Slope y originar escurrimiento aún sobre terreno horizontal debido a la transferencia de cantidad de movimiento por parte del viento. Esta ecuación fue aplicada a cada uno de los píxeles de la imagen con el fin de determinar el índice de escurrimiento potencial en cada uno de ellos. En la Figura 1 se resumen los pasos metodológicos llevados a cabo en el presente trabajo.

## ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se llevó a cabo en la cuenca del Río Azul, sector conocido como Cañadón de Gutiérrez, Partido de Azul, Provincia de Buenos Aires. La zona de estudio está ubicada al Sur de la Ciudad cabecera del Partido. En su extremo Sur se encuentra la divisoria del Cerro La Armonía y los límites Este y Oeste están constituidos por divisorias secundarias. El área de estudio cuenta con una superficie superior a las 39.000 has, con cotas que van desde los 255 m s.n.m. en su parte Sur hasta los 118 m s.n.m. en la zona Norte (Figura 2). Desde el punto de vista geomorfológico está ubicada en el Sudoeste de la Pampa Deprimida, en una zona de transición entre la zona Pedemontana de las Sierras de Tandilla y la zona de los Derrames (Moscatelli y Scoppa 1983).

Los suelos presentes son Argiudoles y Hapludoles típicos y líticos en las zonas elevadas y Hapludoles thapto árgicos y Natracuoles someros en zonas más deprimidas. Los datos climáticos de la región son: precipitación media anual 880 mm para

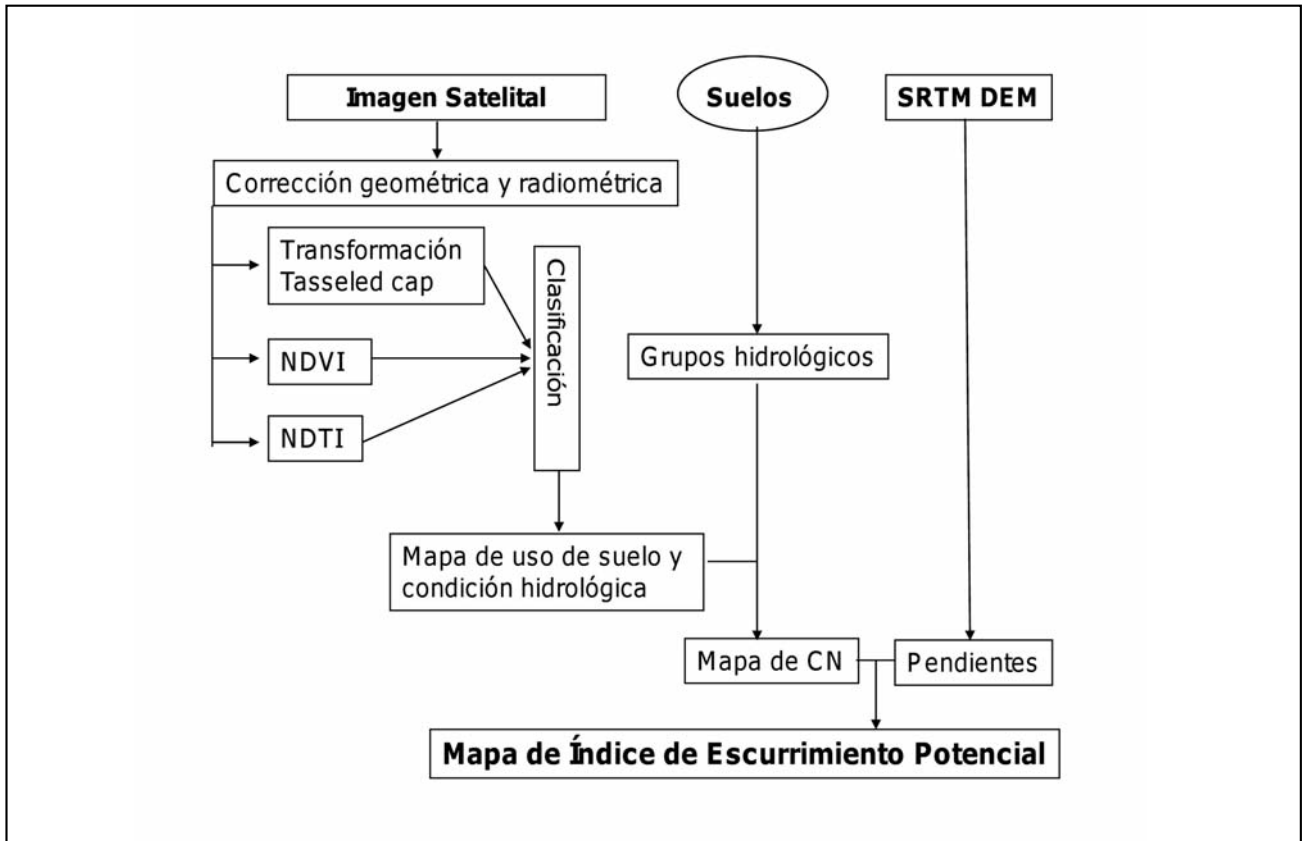


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

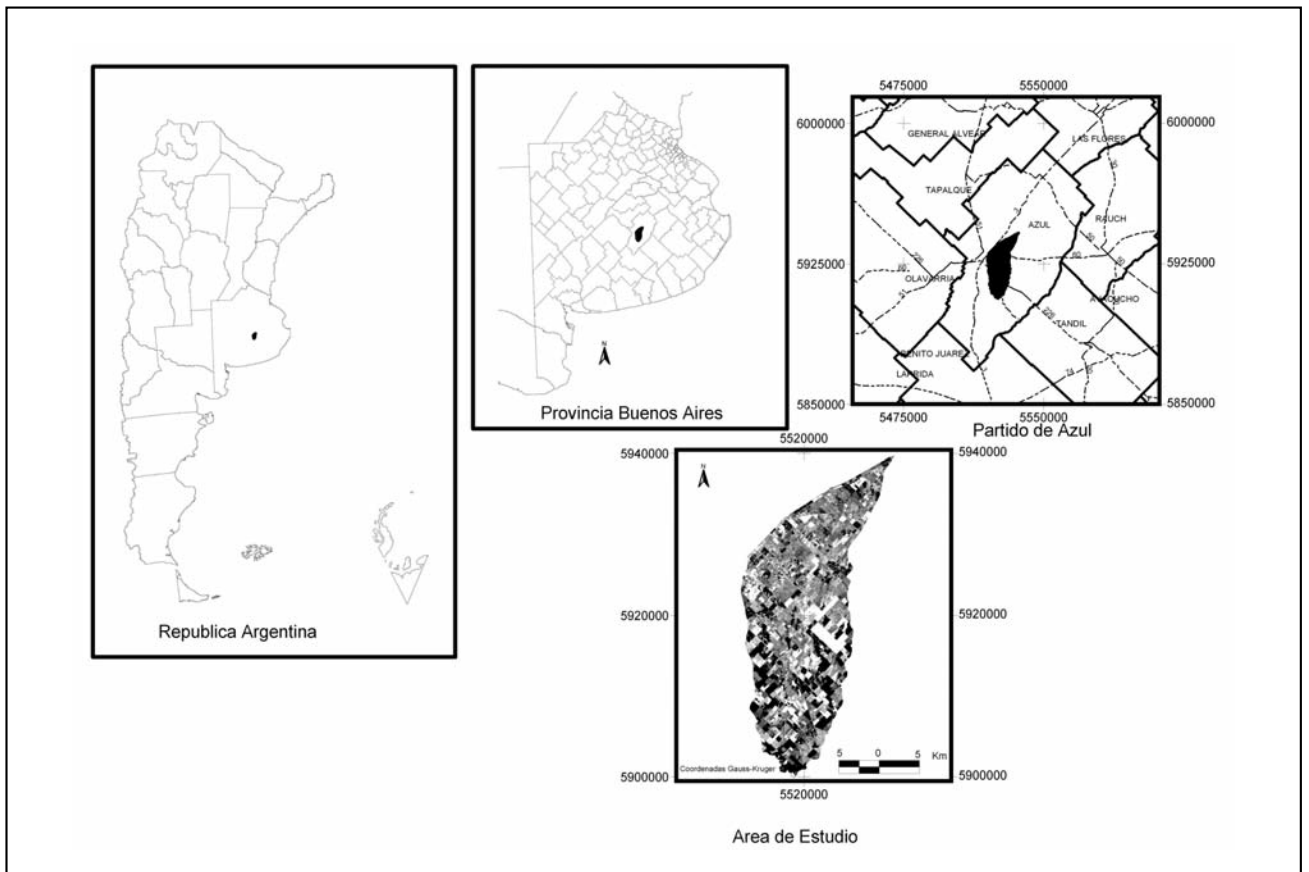


Figura 2. Ubicación del área de estudio en el partido de Azul, Provincia de Buenos Aires.

el periodo 1910-1980; la temperatura media del mes de enero es de 21,3 °C y la temperatura media del mes de Julio de 7 °C; la evapotranspiración potencial anual es de 753 mm indicando que la zona muestra un ligero déficit hídrico en verano y excesos en el invierno.

**Datos utilizados**

Se trabajó con una imagen satelital adquirida el 26 de febrero de 2011 por el sensor Landsat TM correspondiente al Path 225 Row 86 de acuerdo al sistema de referencia mundial. Por otro lado, se establecieron los Grupos Hidrológicos de suelos a partir de cartas del INTA, escala 1:50.000. Se utilizó un modelo digital de elevación de terreno (DEM) elaborado a partir de los datos proporcionados por el proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una precisión vertical de 5 a 6 metros globalmente y de alrededor a 2 metros o menos en áreas planas.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con el resultado de la clasificación, utilizando los índices generados a partir de la imagen radiométricamente corregida,

obtenemos el mapa de Usos de suelo y condición hidrológica (Figura 3). Las clases usadas en la clasificación se seleccionaron a partir de las coberturas del complejo SVT del SCS y en el área estudiada encontramos 5 clases: “Cultivos” en “Buenas” y “Malas” condiciones hidrológicas, “Pastos” en condiciones “Buenas” y “Regulares” y “Rastrojos”, en cuanto al manejo de la cobertura, en el área solamente se realiza en hileras rectas y no en curvas de nivel. La condición hidrológica pudo ser diferenciada al incluir el NDVI y la banda Verdor del Tasseled cap en la clasificación, donde los valores más altos correspondieron a mejores condiciones de la vegetación. Mientras que al utilizar el NDTI y banda Brillo del Tasseled cap los lotes con rastrojos son clasificados sin ninguna confusión.

En el área de estudio se encuentran presentes 31 unidades cartográficas (UC) de suelos, cada una de las cuales fue asignada al grupo hidrológico B o C, no habiéndose encontrado suelos pertenecientes a los grupos hidrológicos A ni D. Cada UC está integrada por 1 a 4 series de suelos en distintas proporciones; sobre la base de sus características físicas y de drenaje y de la proporción en que cada grupo hidrológico está presente, les fueron asignadas las clases B o C (Tabla 1).

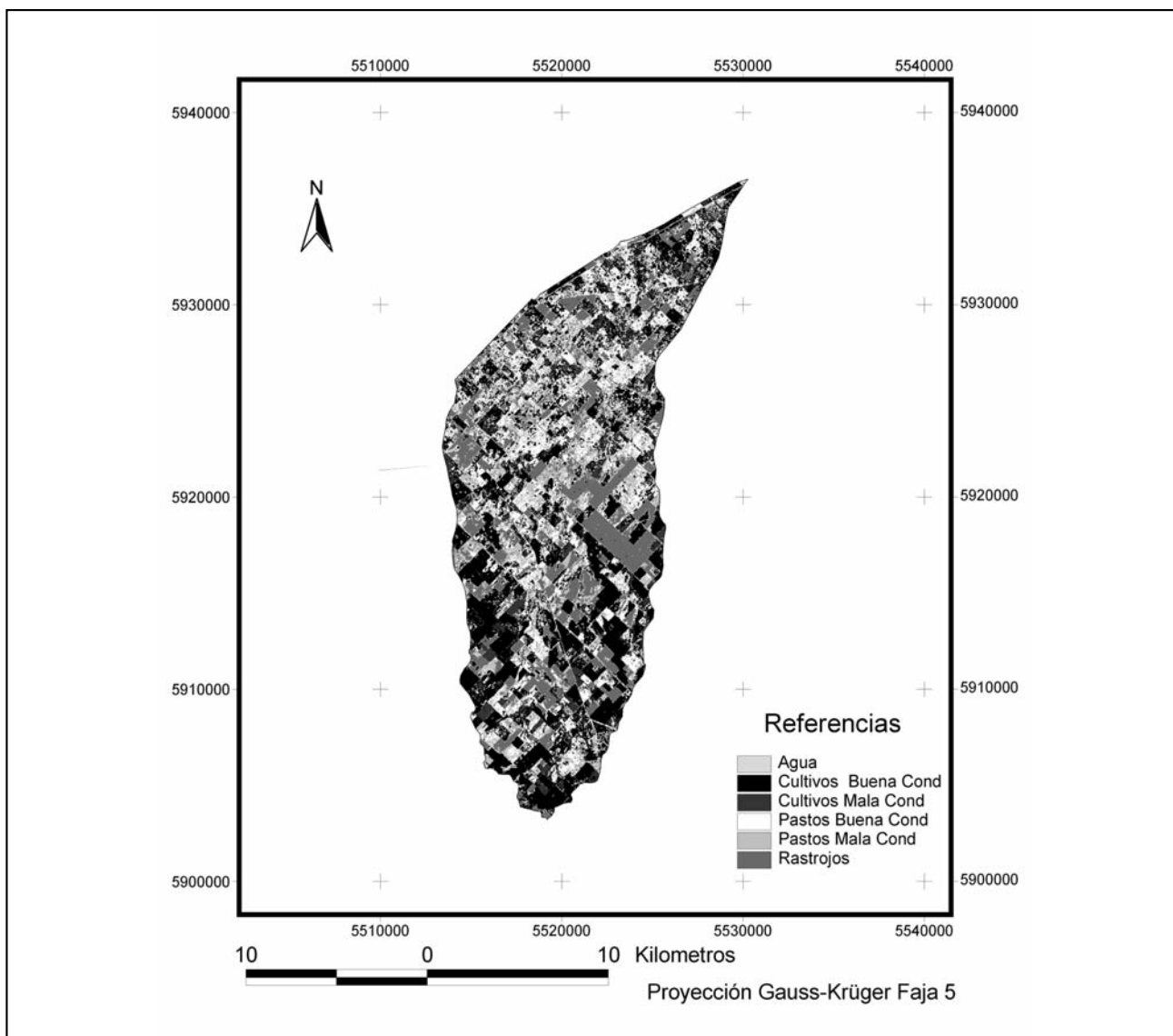


Figura 3. Mapa de Uso de Suelos y Condición Hidrológica (SVT).

**Tabla 1. Unidades cartográficas presentes en la zona de estudio, descripción de las dos primeras series y grupo hidrológico asignado. (B.: Bien drenado; I: Imperfectamente drenado; M: Moderadamente bien drenado; AE: Algo excesivamente drenado; P: Pobrementemente drenado).**

UC	GH	Tipo	SERIE 1	DRENAJE	%	SERIE 2	DRENAJE	%
Ta3	C	Comp.	Tandil	B	25	Azul	B	25
MP9	B	Comp	Mar del Plata	B	30	Balcarce	B	30
MP1	B	Comp	Mar del Plata	B	35	Mar del Plata	B	35
Bal27	B	Comp.	Balcarce	B	40	Mar del Plata	B	30
EaA3	C	Comp	Estancia Aldecoa	I	40	Napaleufú	P	30
TEs5	B	Comp	Tres Esquinas	M	40	La Barrancosa	I	30
Bal26	B	Comp.	Balcarce	B	40	Dos Naciones	B	40
Che8	C	Comp	Chelforó	I	45	General Guido	I	20
BCh1	B	Comp	Blanca Chica	B a M	45	La Nueva Esperanza	M	35
LEs5	C	Comp.	La Escocia	I	50	Miñana	I	20
BCh6	B	Comp	Blanca Chica	B a M	50	La Nueva Esperanza	M	30
MP38	B	Comp	Mar del Plata	B	50	Balcarce	B	30
Bal4	B	Comp.	Balcarce	B	50	Mar del Plata	B	40
Ta33	B	Comp	Tandil	B	50	Santa Luisa	M	50
Bal6	B	Comp	Balcarce	B	60	Blanca Chica	B a M	30
GG28	C	Comp.	General Guido	I	60	Ayacucho	M	30
Bal3	B	Comp	Balcarce	B	60	Balcarce	B	30
Ta30	B	Comp	Tandil	B	60	Azul	B	40
Ta31	B	Comp.	Tandil	B	65	Azul	B	30
Ta32	B	Comp.	Tandil	B	70	Miñana	I	20
MP4	B	Comp	Mar del Plata	B	70	Balcarce	B	30
MP8	B	Comp	Mar del Plata	B	70	Balcarce	B	30
EaA	C	Asoc.	Estancia Aldecoa	I	75	Laprida	B	25
BCh2	B	Consoc.	Blanca Chica	B a M	80	La Nueva Esperanza	M	20
MP2	B	Consoc	Mar del Plata	B	80	Balcarce	B	20
SP5	C	Consoc.	Sierra de los Padres	B a AE	100			0
LEs15	C	Consoc	La Escocia	I	100			0
BCh	B	Consoc.	Blanca Chica	B a M	100			
MP17	B	Consoc	Mar del Plata	B	100			
Ta20	B	Consoc.	Tandil	B	100			
Que	C	Consoc	Querandíes	P a I	100			



A la clasificación de las coberturas se le sumaron los datos de suelo, para así generar una nueva imagen donde a cada clase le corresponde un valor de CN específico. Se obtuvieron cinco tipos de cobertura del suelo y en la cuenca existen dos grupos hidrológicos por lo que la nueva capa de información final tendrá 10 valores de CN como máximo. Estos valores de CN fueron calculados para una Condición de Humedad Antecedente normal (CHA II), en la Tabla 2 se detallan estos valores para las clases SVT halladas, y en la Figura 4 se muestra el mapa correspondiente, donde el rango de variación de los valores de CN es de 61 a 91. En la Tabla 3 se indican los CNs correspondientes a CHA I, donde los suelos están suficientemente secos para ser cultivados y poseen un menor potencial de escurrimiento y para CHA III con mayor potencial de escurrimiento debido a que los suelos están saturados por precipitaciones anteriores.

En la Figura 5 se muestra el mapa de pendientes (expresado en grados angulares) obtenido a partir de imágenes SRTM de 90 m de resolución espacial; mediante una desagregación espacial se obtuvo el mapa de pendientes en un reticulado cuadrado de 30 metros de malla para hacerlo compatible con la resolución de los mapas anteriores. Las pendientes halladas en la cuenca varían de 0 a 5,97°.

Finalmente en la Figura 6 se observa el resultado de la aplicación de la ecuación (5), donde a cada píxel de la imagen le corresponde un determinado valor de índice de escurrimiento potencial. Los valores que adopta este índice cuando los CNs son calculados para CHA normales tienen un rango de 0 a 22,65; mientras que para CHA I varía entre 0 y 19,66 y para CHA III de 0 a 24,14.

Tabla 2. Valores de CN (CHA II) presentes en la clasificación final.

Determinación de la CN según Suelos, Vegetación y Manejo				
Cobertura		Condición hidrológica	Grupo hidrológico de los Suelos	
Uso de suelo	Manejo		B	C
Barbecho o rastrojos	Hileras rectas	Mala	86	91
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Buena	78	85
	Hileras rectas	Mala	79	86
Praderas y Pastizales	Hileras rectas	Buena	61	74
	Hileras rectas	Regular	69	79

Tabla 3. Valores de CN correspondientes para CHA I (secas) y CHA III (saturadas).

CN para CHA II	CNs Correspondientes	
	CHA I	CHA III
61	40	78
69	51	85
74	57	88
78	61	90
79	62	91
85	70	94
86	71	95
91	79	97

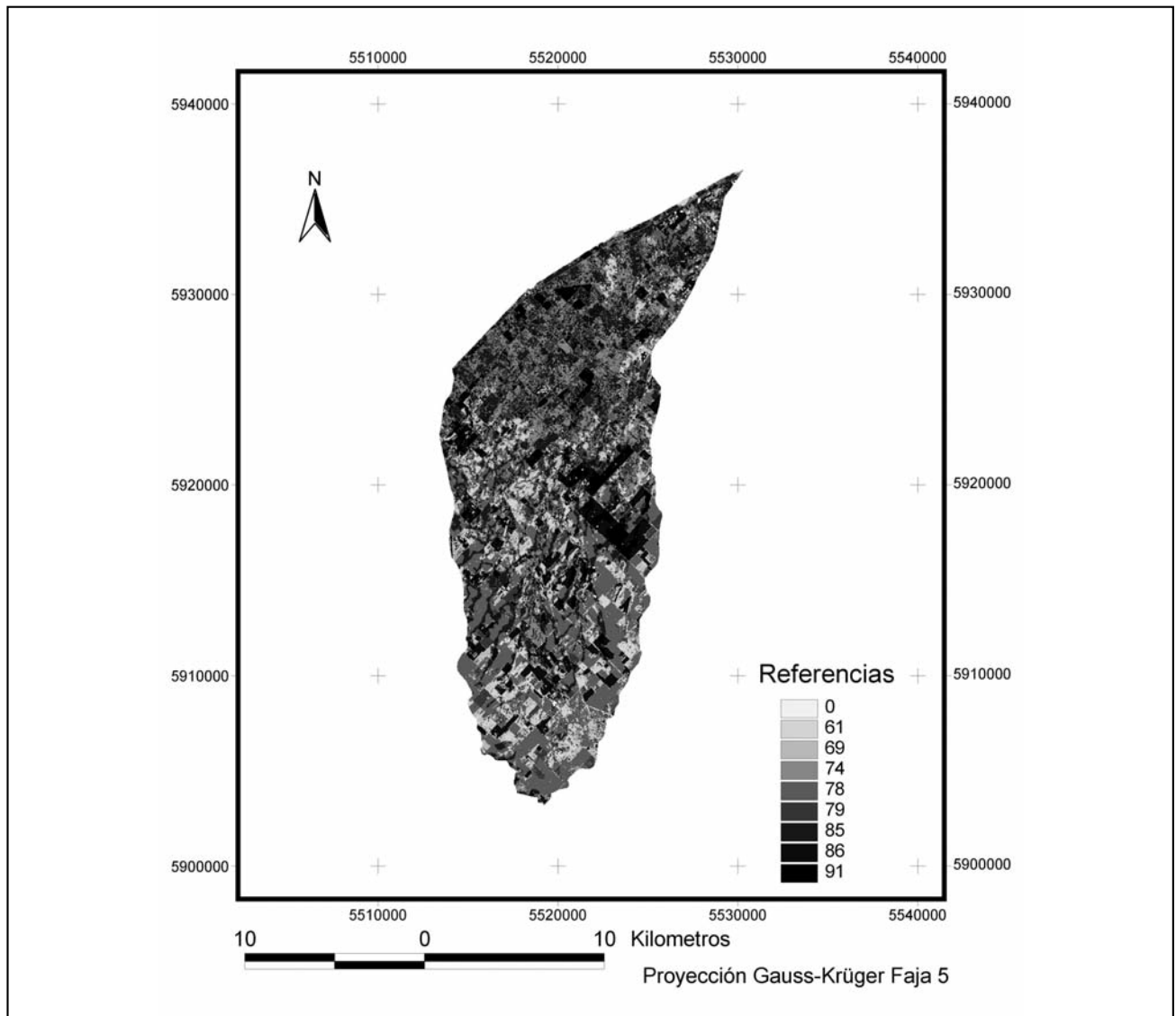


Figura 4. Mapa de Curva Número (CN).

### CONCLUSIONES

La definición y determinación del índice de escurrimiento potencial basado en la clasificación SVT del SCS y en la pendiente del terreno, aplicados a cada píxel de una imagen, constituye una buena alternativa para la caracterización hidrológica del terreno debido a la facilidad de acceso a los datos necesarios para su aplicación.

Se ha probado que es posible estimar la tasa potencial de escurrimiento en áreas elementales o parcelas de terreno a partir de datos satelitales y edáficos.

La metodología utilizada ofrece una herramienta de altísima definición a nivel de cuenca y la información que se genera abre la posibilidad de ser incorporadas como entrada a modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, con unidades elementales compuestas por celdas coincidentes con píxeles.

El algoritmo de clasificación digital de imágenes satelitales no es excluyente de la metodología aquí propuesta. Otros métodos han sido aplicados en estudios previos como clasificación orientada a objetos o clasificación por árbol (Presutti 2003; Presutti et al. 2010).

Debido a que los resultados pertenecen a una fecha precisa, no es correcto utilizarlos para estimar el escurrimiento potencial en otra época del año, ya que, si bien no cambian las características de pendiente y grupo hidrológico del suelo, sí lo hacen en general las características del complejo SVT (en el caso de cultivos, debido a la rotación de los mismos y al estado fenológico) y la Condición de Humedad Antecedente. Si, para un caso particular tratado, puede asumirse que la clasificación SVT no cambia durante el año o durante un período menor (por ejemplo, una estación climática), entonces el índice de escurrimiento potencial puede considerarse válido para el lapso en cuestión.

Nos planteamos como etapa siguiente considerar la variabilidad del factor SVT durante las principales estaciones del año para la cuenca estudiada y elaborar los mapas de  $Ie_{pot}$  para las distintas condiciones de humedad antecedente: CHA I, CHA II y CHA III. La cuantificación del índice de escurrimiento potencial en estas diferentes condiciones permitirá la aplicación de esta metodología durante todo el año.

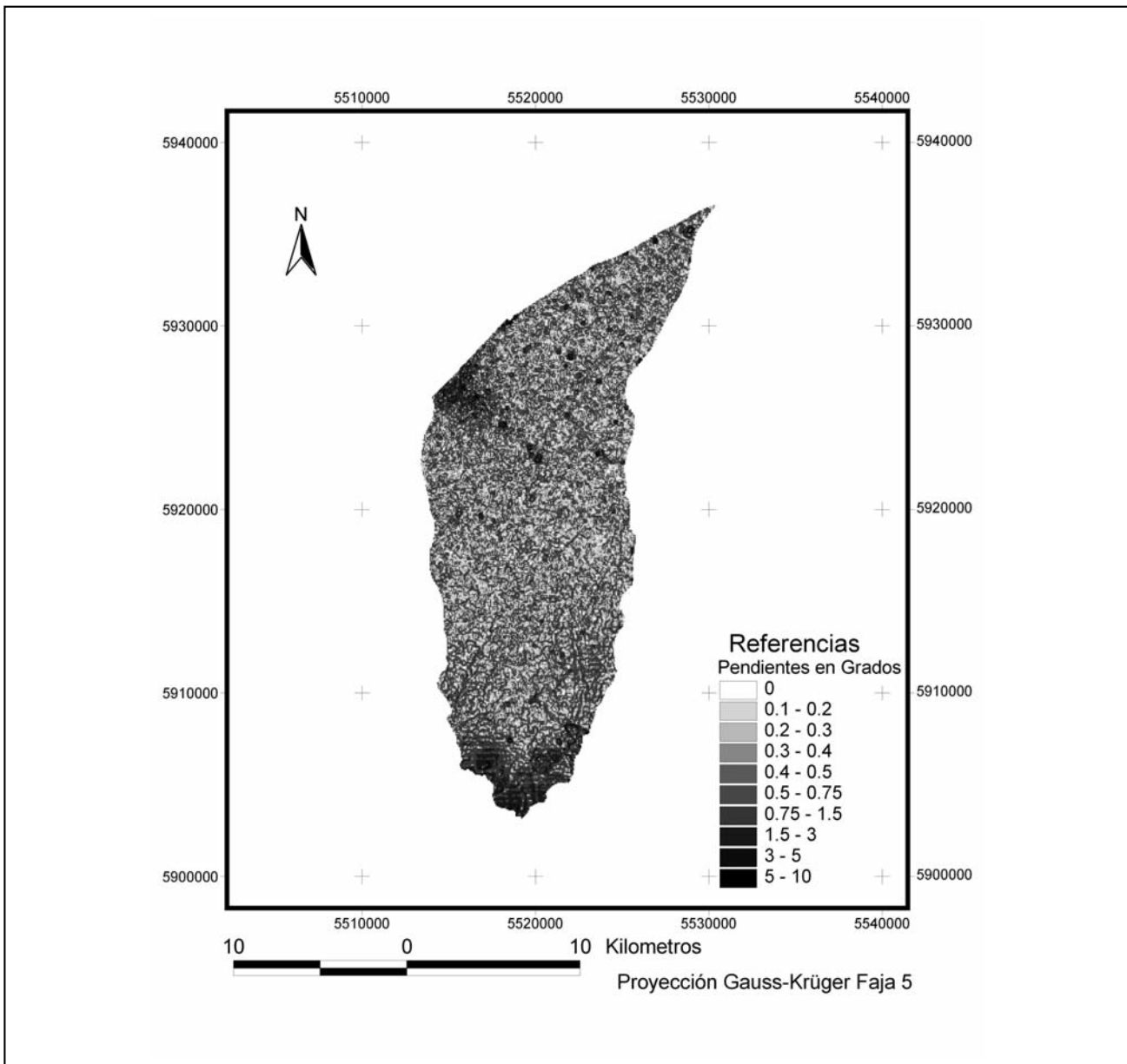


Figura 5. Mapa de pendientes.

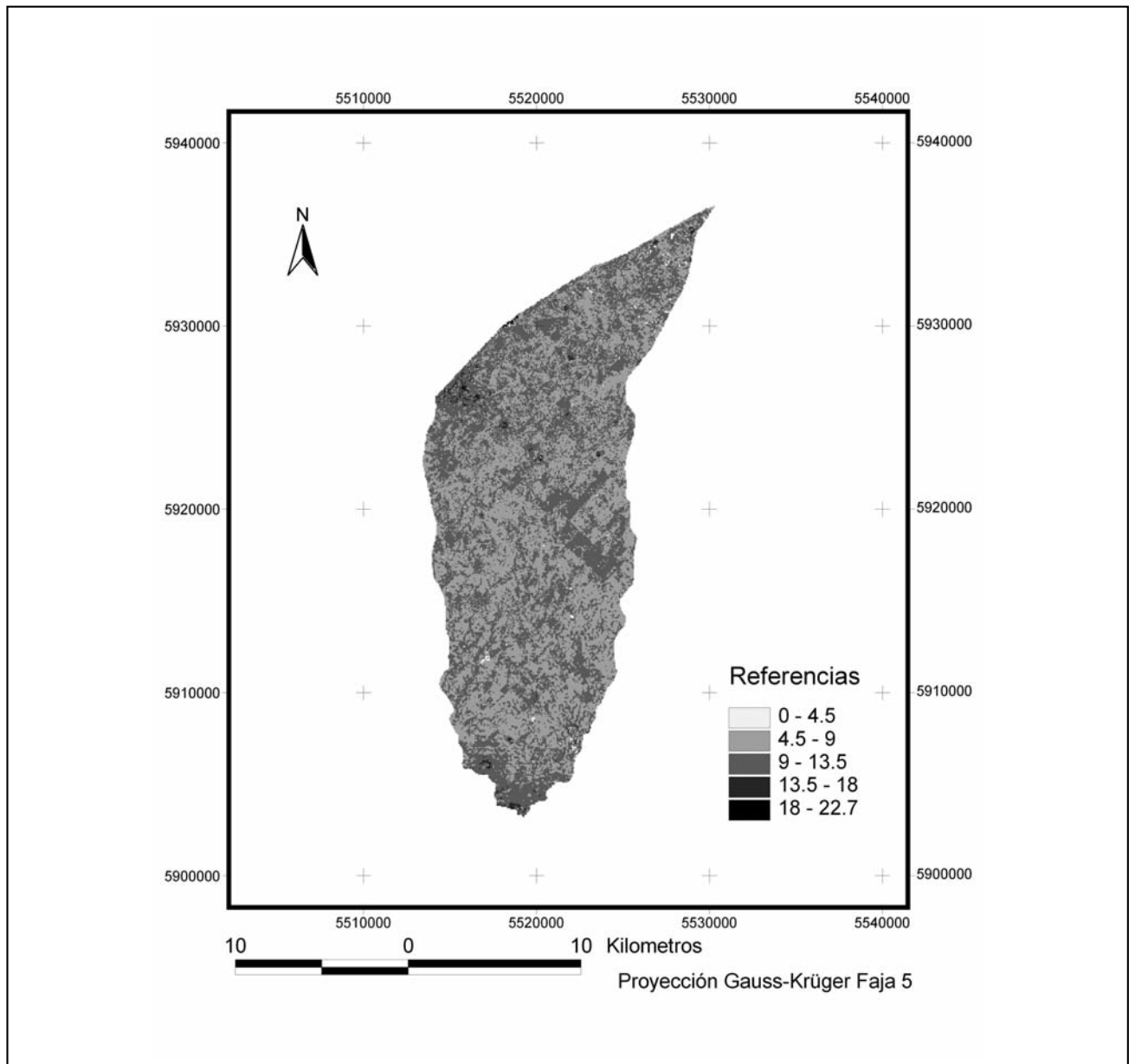


Figura 6. Mapa de Índice de Escurrimiento Potencial para CHA II.

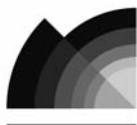
#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BACCHIEGA J. D., M. C. LOPARDO, H. D. BARRIONUEVO, J. A. HASPERT, 2010  
 Determinación del CN a Partir de Imágenes Satelitales.  
*XXIV Congreso Latinoamericano De Hidráulica Punta Del Este, Uruguay, Noviembre 2010*
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. Y MAYS, L. W., 1994.  
 Hidrología Aplicada.  
*McGraw Hill. Bogotá.*
- CHUVIECO E., 2002.  
 Teledetección Ambiental.  
*Ediciones ARIEL S.A. España.*
- CREDEDIO D.A., M.G. ARES Y M. VARNI, 2010  
 Análisis de la variación temporal del escurrimiento potencial en función del suelo y sus usos en la cuenca del arroyo Santa Catalina.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina -pp 177-184*

- CRIST E.P. Y R.C. CICONE, 1984.  
Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data.  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50: 343-352
- DUGGIN J. Y C.J. RODINOVE, 1990.  
Assumptions Implicit in Remote sensing data Acquisition and Analysis.  
*International Journal of Remote Sensing* 11 (10): 1669-1694.
- GOEL N.S. Y M. NORMAN, 1992.  
Biospheric models Measurements and Remote Sensing of vegetation.  
*International Journal of Remote Sensing* 47:163-188.
- GONG P. Y P. HOWARTH, 1992.  
Frequency-based Contextual Classification and Gray level vector reduction for land-use identification.  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58 (4): 423-437.
- JAIN A.K., 1989.  
Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood Cliffs.  
*Prentice Hall* pp 418-421.
- JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON Y E. GUEVARA, 2008,  
Hole-filled seamless SRTM data V4,  
*International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*, available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- JENSEN J.R., 1996.  
Introductory digital image processing: a Remote Sensing perspective 2nd ed.  
*Prentice Hall* 316 pp.
- KAUTH R.J. Y G.S. THOMAS, 1976.  
The Tasseled Cap- A graphic description of the spectral-temporal development of Agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed data. West Layayette.  
*In: Laboratory for Applications of Remote Sensing*, pp 41-51.
- MAIDMENT, D. R., 1992.  
Handbook of Hydrology.  
*McGraw Hill, Nueva York*.
- MOSCATELLI, G. Y C. SCOPPA, 1983.  
Características Hidroedáficas de la Pampa Deprimida.  
*Coloquio Internacional sobre Hidrología de Llanuras. Olavarría, Argentina*.
- NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK, SECTION 4 - HYDROLOGY, 1964.  
Chapter 10: Estimation Of Direct Runoff from Storm Rainfall.  
*US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, US Govt Printing Office, Washington, DC*.
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS), 2004.  
Part 630 Hydrology.  
*National Engineering Handbook Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*
- ORSOLINI, H. E.; ZIMMERMANN, E. D. Y BASILE, P. A., 2000.  
Hidrología: Procesos y Métodos.  
*Editora UNR, Rosario.*
- PRESUTTI M., 2003  
"Clasificación Orientada a Objetos de Imágenes Satelitales: su Aplicación en la Estimación del Escurrimiento Superficial de una Cuenca Hidrográfica."  
*XII Congreso Nacional de Fotogrametría, La Plata, 17 al 19 Setiembre 2003. Organizado: Dirección de Geodesia, Pcia de Buenos Aires. Actas en CD-ROM*
- PRESUTTI M., G. CALVO, D. BARRERA Y H. ROSATTO, 2010.  
Estimación del escurrimiento potencial basado en la clasificación hidrológica del SCS, imágenes satelitales y clasificador "expert classifier"  
*Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina 21 al 24 de septiembre de 2010.*  
*Editores: Marcelo Varni, Ilda Entraigas. Luis Vives Editorial Martin ISBN: 978-987-543-393-9*
- PURICELLI, M.M., 2008.  
Problemas de escala en la utilización del método de Curva Número (CN).  
*En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Potrero de los Funes. San Luis.*
- ROUSE J.W, R.H HAAS, J.A. SCHELL Y D.W. DEERING, 1973.  
Monitoring Vegetations Systems in the Great Plains with ERTS.  
*Proceedings 3er ERTS Symposium Vol 1 pp 48-62*

- SHI P.J., Y. YUAN, J. ZHENG, J.A. WANG , Y. GE, G. Y QIU, 2007.  
The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region,  
*China Catena* 69 31- 35
- SILVEIRA, L., F. CHARBONNIER Y J.L. GENTA, 2000.  
The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure.  
*Hydrological Sciences Journal*, 45 (1), 3-12.
- SINGH V.P., 1992.  
Elementary Hydrology.  
*Prentice Hall, New York*.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS), 1972.  
National Engineering Handbook, section 4, Hydrology.  
*U.S. Soil Conservation Service, Department of Agriculture, Washington DC*,
- TON J. Y A.K. JAIN, 1989.  
Registering Landsat Images by point Matching IEEE  
*Transactions on geoscience and Remote Sensing* 27 (5): 642-651.
- TOU J.T Y R.C GONZALEZ, 1977.  
Pattern Recognition Principles.  
*Reading MA Addison-Wesley, 371 p.*
- TUCCI, C. M., 1994.  
Hidrología - Ciencia y Aplicación.  
*Editora da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.*
- USDA, 1986.  
Urban Hydrology for Small Watersheds.  
*U.S. Dept. Agric. Soil Conservation Service, Tech. Release 55(210.VI-TR-55), 2nd Edition.*
- ZHONGMING W., LEES B.G., FENG J., WANNING L. Y HAIJING S., 2010.  
Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion.  
*Catena* 83 87-93





## La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina

### *Exploitation of groundwater resources. an alternative to supplement the water supply to Bahia Blanca, Argentina*

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

Recibido: 08 de Julio de 2011 • Aceptado: 27 de Diciembre 2011

#### Resumen

*El advenimiento de años pluviométricamente secos provocó los niveles históricos más bajos del Dique Paso de Las Piedras, que abastece de agua potable a la ciudad de Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta (360.000 habitantes). Esta circunstancia generó una "crisis" hídrica que responde más a problemas de gestión y de control, que a la falta de proyectos técnicos o de la disponibilidad del recurso hídrico. Esta contribución tiene como objetivo demostrar la sustentabilidad de explotación del recurso subterráneo para suplementar el abastecimiento de agua a los mencionados núcleos urbanos. El área de estudio abarca una porción de la cuenca superior-media del Ao. Napostá Chico, en la vertiente suroccidental de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. El acuífero libre del sector se emplaza en los denominados genéricamente "sedimentos pampeanos" ampliamente difundidos en toda la llanura pedemontana. La información hidrogeológica disponible permitió construir un modelo numérico de flujo subterráneo mediante el programa Modflow a partir del cual se simuló distintos escenarios de bombeo a efectos de analizar el impacto que tendrían las extracciones de agua subterránea sobre la hidrodinámica del acuífero. Los resultados demuestran la factibilidad de extracción de agua subterránea mediante una batería de pozos ubicados en proximidades de la localidad de Cabildo y de los acueductos provenientes del dique. Se concluye que una explotación racional del acuífero, sustentable en el tiempo, constituye una alternativa técnica viable para paliar la crítica situación hídrica.*

**Palabras claves:** recurso hídrico subterráneo - Bahía Blanca - Modflow.

#### Abstract

*The arrival of dry rainfall years resulted in the lowest historical levels of the Paso de Las Piedras dam, which supplies drinking water to Bahía Blanca city, Gran Bahía Blanca and Punta Alta. This situation created a "water crisis" that is mostly due to*

<sup>1</sup> Departamento de Geología (UNS) - San Juan 670 (8000), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

✉ albouy@uns.edu.ar

<sup>2</sup> PAID Comisión de Investigaciones Científicas Prov. de Buenos Aires



control and management problems, than to the lack of technical projects or the availability of the water resource. This contribution aims to demonstrate sustainability of exploitation of groundwater resources to supplement the water supply. The study area covers a sector of the Napostá Chico stream watershed in the southwestern slopes of the Sierras Australes range, Buenos Aires province. The unconfined aquifer is located in the "pampean sediments" widely distributed throughout the piedmont plain. Available hydrogeological information allowed to formulate a numerical flow model by means of the Modflow program. Pumping scenarios were simulated and their impact on the hydrodynamics of the aquifer was tested. The results demonstrate the feasibility of extracting groundwater through a well battery located in close proximity of Cabildo locality. A rational exploitation of the aquifer, sustainable in time, constitutes a viable alternative to alleviate the critical water situation.

**Keywords:** groundwater resource - Bahía Blanca city - Modflow.

## INTRODUCCIÓN

La continua demanda de agua para uso humano e industrial hace necesario contar con un adecuado conocimiento de los recursos hídricos disponibles que permitan llevar a cabo una apropiada planificación hidrológica. A fines de la década de los 80<sup>s</sup> se comenzó un estudio de evaluación de las potenciales fuentes de abastecimiento de agua a Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta (unos 360.000 habitantes) a través de un convenio entre el Ministerio de Obras Públicas, la Comisión de Investigaciones Científicas (ambos de la provincia de Buenos Aires) y la Universidad Nacional del Sur (UNS). Dicho trabajo (*MOP 1990*) consistió en evaluar distintas alternativas para suplementar la única fuente de abastecimiento a las mencionadas ciudades, el dique Paso de las Piedras, limitado por la disponibilidad del recurso y la capacidad de transporte de los acueductos a unos 3 m<sup>3</sup>/s. En el estudio se analizaron distintas propuestas de suministro y se dio prioridad por la relación costo-beneficio a la explotación de 1 m<sup>3</sup>/s de agua subterránea de la capa freática del sector pedemontano de las Sierras Australes, dentro de la cuenca del Ao. Napostá Grande. La situación quedó indefinida hasta que en el año 2000, la empresa Azurix, por entonces concesionaria del servicio, encargó al Grupo de Hidrogeología de la UNS nuevos estudios de agua subterránea. En esa oportunidad, en base a trabajos previos, se seleccionó un área de interfluvio entre las cuencas medias del río Sauce Grande y el Ao. Napostá Chico, cercana a la localidad de Cabildo y al actual acueducto proveniente de Paso de las Piedras. Se planificó la extracción sostenible de hasta 0,8 m<sup>3</sup>/s, caudal que podría incrementarse si la explotación es "a demanda" es decir, estacional (*FUNS 2000*). Con la retirada de la empresa de la concesión del servicio, el proyecto se suspendió.

En el período 2005-2009 se registró en la región una sucesión de años secos con una media pluviométrica de 495 mm muy por debajo del módulo anual (674 mm; período 1960-2009). Este hecho derivó en una notable merma en las reservas del dique Paso de las Piedras que de un volumen máximo de 328 hm<sup>3</sup> pasó a valores por debajo de los 70 hm<sup>3</sup>. Esta situación, denominada por la prensa "crisis hídrica" aún no ha sido revertida, aunque en parte aliviada con algunas acciones y obras de emergencia y por las lluvias ocurridas durante enero del 2011. Las obras paliativas consisten en tomas adicionales de agua superficial y la construcción de algunos pozos someros (de 50 m) para extracción de agua subterránea en el Bajo San José, dentro del valle medio del río Sauce Grande, aguas abajo del embalse.

A partir de esta situación de "crisis" la concesionaria actual del servicio Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA) decidió retomar los estudios, realizados en el año 2000, por el Grupo de Hidrogeología de la UNS en la cuenca del Ao. Napostá Chico. El principal objetivo del trabajo fue seleccionar los sectores del

acuífero freático con mayor potencial de producción y mejor calidad química para consumo humano. El área de prospección se restringió, lo más próxima posible, a la traza del acueducto proveniente del dique Paso de las Piedras, a fin de optimizar los costos de transporte del agua. Derivado de dicho objetivo se formuló un modelo numérico de simulación del flujo con el que se pretende sostener que una explotación racional del acuífero constituye una alternativa técnica y económicamente viable para paliar la crítica situación hídrica de la ciudad.

Esta contribución sintetiza la reciente propuesta científico-técnica de explotación del recurso hídrico subterráneo, la que se está ejecutando hoy en día.

## METODOLOGÍA

El método de trabajo se basó en la recopilación de la información previa relevada, la realización de un nuevo censo hidrológico más local, que permitió complementar la información disponible y la ejecución de 12 sondeos eléctricos verticales (SEV) cuyo objeto principal fue estimar la profundidad de los eventuales pozos de explotación. Durante el censo se tomaron muestras de agua subterránea a fin de verificar su aptitud para consumo humano. Los análisis físico-químicos fueron realizados por ABSA y comprendieron la determinación de elementos mayoritarios, nitratos, flúor, arsénico y bacteriológico. En base a la información precedente se propuso un área de explotación en la que se efectuó una perforación de estudio de 137m para determinar las características litológicas y productividad del acuífero. El estudio se complementó con la elaboración de un modelo numérico del flujo subterráneo con MODFLOW (*McDonald y Harbaugh, 1988*) en base al cual se plantearon hipotéticos casos de bombeo y analizaron las situaciones hidrodinámicas generadas en el sistema acuífero modelado.

## ÁREA DE ESTUDIO Y MEDIO FÍSICO

El área de estudio comprende una superficie de unos 300 km<sup>2</sup> en proximidades de la localidad de Cabildo, provincia de Buenos Aires. Se inserta en la zona de interfluvio de las cuencas medias del Ao. Napostá Chico, que la atraviesa de noroeste a sur y del río Sauce Grande, hacia el este (Figura 1). Ambos cursos desaguan parte de la vertiente sur y este de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires.

El clima según los índices de Thornthwaite es subhúmedo-húmedo, mesotermal. La temperatura media anual está en el orden a los 14,7 °C y la lámina anual media precipitada en la localidad de Cabildo es de 674 mm (período 1960-2009). El paisaje forma parte de la denominada área de piedemonte de las Sierras Australes que conecta hacia el sur con la llanura subventánica (*González Uriarte, 1984*). La geología local responde

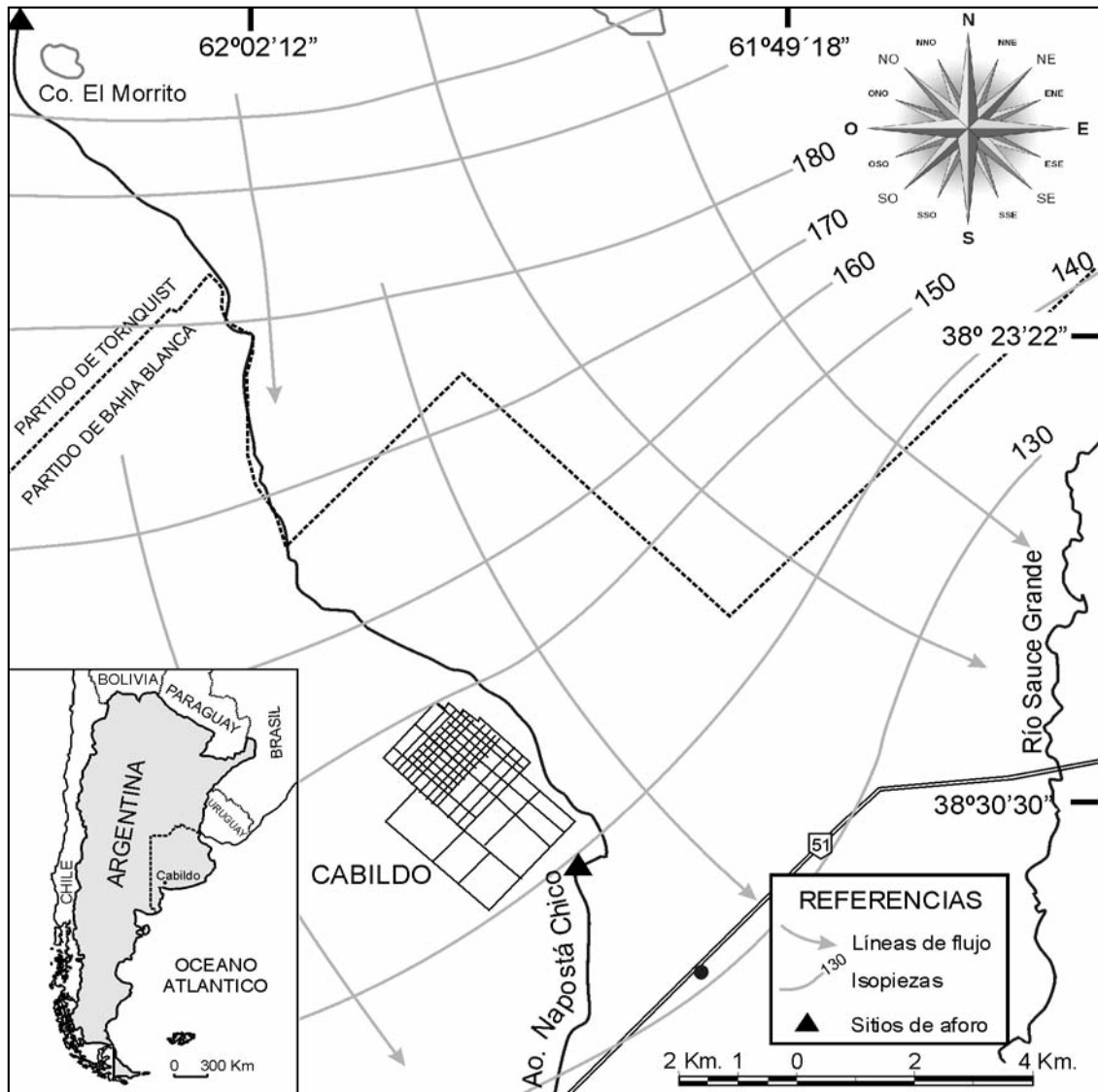


Figura 1. Área de estudio y red de flujo subterráneo (modificado de FUNS 2000).

a las características impuestas por dos regiones morfoestructurales en cuyo límite se inserta el área de estudio: las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires y la Cuenca del Colorado. La cuenca presenta en su mayor parte, un relieve de llanura con suave pendiente hacia el sur. El único elemento orográfico lo constituyen los afloramientos cuarcíticos remanentes de las Sierras de la Ventana, que delimitan hidrológicamente a la cuenca media en el sector septentrional.

La morfología de la zona corresponde a una planicie, suavemente ondulada por la presencia de médanos fijos-semifijos de 1-2 m de altura que la atraviesan en su parte central. La presencia de estos cordones arenosos y la ausencia de tosca en las partes topográficamente bajas del relieve, resultan de suma importancia en la infiltración del agua de lluvia y recarga del acuífero. El Ao. Napostá Chico presenta un régimen efluente y permanente hasta la localidad de Cabildo a partir de donde adquiere un carácter influente hasta desaparecer por infiltración en proximidades de Bahía Blanca. El módulo anual al ingresar al área de estudio (ver Figura 1) se estimó en  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  y a la altura de Cabildo, en  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (FUNS 2000). El río Sauce Grande es de carácter permanente y ganador con un caudal básico

en la zona, de unos  $0,6$  a  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  debido al cierre total que ejerce el dique Paso de las Piedras. Ambos ingresan a la llanura como cursos maduros, alóctonos y con valles encajonados producto del rejuvenecimiento del paisaje.

#### HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio se inserta en la región hidrogeológica interserrana y periserrana (González 2005). El basamento hidrogeológico está conformado por cuarcitas y areniscas cuarcosas paleozoicas de la Fm. Trocadero (Harrington 1947 en Llambías y Prozzi 1975) que afloran en la margen derecha del Dique Paso de las Piedras y en las últimas estribaciones serranas que limitan el área de estudio por el norte. De acuerdo a los estudios geofísicos realizados (SEV) se profundiza hacia el sur habiéndose detectado a unos 450 m de profundidad en el límite austral del área de estudio (FUNS 2010). Una perforación exploratoria realizada por ABSA en el Bajo San José (10 km al este de Cabildo) alcanzó a los 396 m b.b.p. rocas masivas que a partir de los 442 m b.b.p. se identifican como granitos miloníticos. En este sector existe una concordancia entre el basamento hidrogeológico y el geológico por la ausencia de la cobertura sedimentaria paleozoica. Por encima, se atravesaron unos 75 m de

sedimentos continentales adjudicados a la Fm. Ombucta, del Eoceno-Oligoceno (Yrigoyen 1969 en Bonorino 1988) con características acuitardas-acuícludas. Estos sedimentos pasan transicionalmente hacia arriba a la Fm. Barranca Final, conocida regionalmente como “Mioceno Verde”, o “ingresión paranaense” de ambiente de sedimentación marino de plataforma, que se extendería hasta los 236 m b.b.p. Se trata de niveles acuícludos y acuitardos intercalados con algunos niveles acuíferos, con agua de elevada salinidad (Figura 2).

Por encima aparecen los denominados “sedimentos pampeanos” (Fidalgo et al. 1975) del Mioceno superior-Plioceno superior que conforman las zonas saturada y de aireación. En el área de estudio se estiman espesores de unos 180 m, que se acuñan hacia los afloramientos serranos. Se tratan de limos arenosos y hasta arcillosos, macizos, cementados con carbonato de calcio y rematados por niveles de tosca (2 a 3 m de espesor) que la caracterizan. La tosca aflora en las lomas mientras que en los bajos es discontinua o puede estar ausente.

EDAD	Prof. m	FORMACION	LITOLOGIA
PLEISTOCENO SUPERIOR	- 250	LA NORMA	
MIOCENO MEDIO		“Sedimentos Pampeanos” limos-arenas acuíferos- acuitardos	
MIOCENO		BARRANCA FINAL arcillas-limos acuícludo-acuitardo	
EOCENO-OLIGOCENO		OMBUCTA arcillas-limos acuícludo-acuitardo	
TRIASICO A PRECAMBRICO	- 400	BASAMENTO HIDROGEOLOGICO cuarcitas acuífugo	

Figura 2. Esquema hidroestratigráfico.

Los “sedimentos pampeanos” presentan anisotropías hidrolitológicas que dan lugar a una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos (sistema multicapa) con un comportamiento hidráulico único. Los sondeos eléctricos verticales indican la presencia en el área de estudio de niveles acuitardos y/o acuícludos a unos 180-200 m de profundidad que podrían constituir el hidroapoyo del acuífero freático (FUNS 2010). Ensayos de bombeo, a caudal constante, realizados en los primeros 100 m de espesor saturado arrojaron transmisividades promedio de 144 m<sup>2</sup>/d con máximos de hasta 230 m<sup>2</sup>/d y coeficientes de almacenamiento del orden de 0,1, con drenaje diferido (Albouy et al. 2005; FUNS 2000).

La capa freática presenta una morfología radial divergente con dos zonas de recarga preferenciales: una en el sector pedemontano de las sierras y otra coincidente con la presencia de cordones medianos en el sector meridional del área de estudio y cuya delimitación resulta más evidente desde un punto de vista hidroquímico que hidrodinámico. En la zona medana, la recarga preferencial favorece la calidad química del agua del acuífero, cuya conductividad eléctrica, en general, no supera los 1000 µS/cm. Es del tipo bicarbonatada clorurada calcio-sódica y químicamente potable hasta las profundidades de los ensayos realizados, es decir unos 100 m de espesor saturado (FUNS 2010). Las zonas de descarga del acuífero libre son los cursos efluentes que drenan el área.

La descripción de las características hidrogeológicas e hidrolitológicas precedente permite establecer que la principal fuente de explotación de agua subterránea de la zona, la constituye la capa freática, descartándose, en principio, la explotación de niveles acuíferos más profundos (FUNS 2000).

### RECARGA Y RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

La recarga por agua de lluvia en el área de estudio se cuantificó mediante balances hidrológicos a nivel cuenca y del ión cloruro, obteniéndose un valor promedio del 12,5% de la precipitación media, esto es unos 84 mm/año (FUNS 2000) valor coherente con los obtenidos por otros autores en climas semiáridos-semihúmedos con suelos arenosos (Carrica 2009).

El ingreso subterráneo de agua por el límite norte del área de trabajo (ver Figura 1) se estimó en base a balances hidrológicos, el mapa de isopiezas, la permeabilidad calculada por ensayos de bombeo y el espesor del acuífero libre inferido mediante geoelectrónica (Albouy et al. 2010). Esta recarga indirecta puede cuantificarse en unos 14.500 m<sup>3</sup>/d (5,3 hm<sup>3</sup>/año) de los cuales un 35% (5000 m<sup>3</sup>/d) pasaría a formar parte del escurrimiento subterráneo profundo (Bonorino 1988; Carrica 1998). El recurso hídrico subterráneo dentro del área estudiada equivaldría a la recarga media por agua de lluvia (16,8 hm<sup>3</sup>/año) más el aporte por escurrimiento subterráneo proveniente de la cuenca superior (3,4 hm<sup>3</sup>/año). Ello totaliza unos 20 hm<sup>3</sup>/año que en términos de consumo equivalen a 0,63 m<sup>3</sup>/s. Considerando un espesor medio saturado de 160 m, un área de unos 200 km<sup>2</sup> y una porosidad eficaz de 0,1 las reservas totales de agua se cifrarían en el orden a los 3.220 hm<sup>3</sup>.

En el área del trabajo, sobre la margen izquierda del arroyo Napostá Chico y hasta el río Sauce Grande, no existe ninguna explotación significativa del acuífero; las extracciones de agua se limitan a establecimientos rurales y para uso doméstico. La localidad de Cabildo, de unos 2000 habitantes, se abastece de dos perforaciones ubicadas sobre la margen derecha del Ao. Napostá Chico.

### MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

En este apartado se describe el modelo de simulación del flujo de agua subterránea en una porción del acuífero freático, con el empleo del 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. El objetivo de la simulación ha sido integrar la información hidrogeológica del acuífero y cuantificar los procesos físicos actuantes. Además, el modelo construido sirve de herramienta para analizar cualitativa y cuantitativamente los efectos hidrodinámicos del bombeo sobre el acuífero y demostrar la viabilidad de la explotación racional del agua subterránea para paliar la crítica situación hídrica de la ciudad.

El modelo abarca un área activa de unos 300 km<sup>2</sup> que se discretizó en 116 filas, 91 columnas de 180 m de lado y una

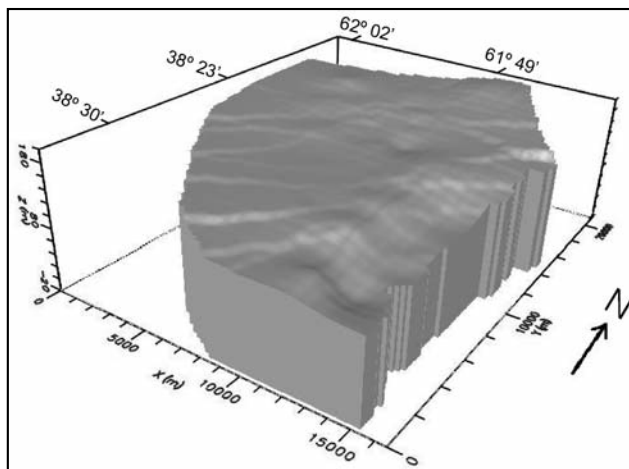


Figura 3. Diagrama de la topografía en 3D.

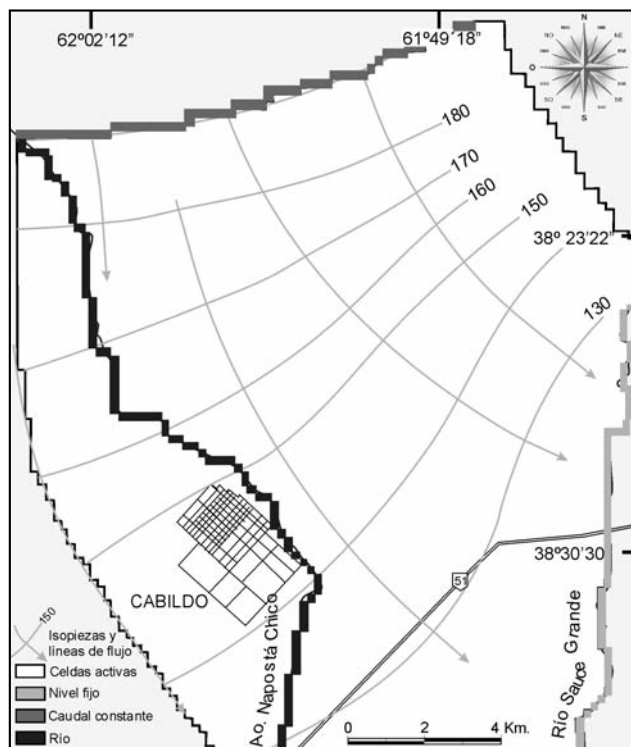


Figura 4. Área del modelo y condiciones de borde.

capa de sedimentos pampeanos de 160 m de espesor medio correspondiente a lo que se considera como capa freática. La relación espacial entre el espesor del acuífero y su extensión areal permiten considerar la dirección del flujo subterráneo, como esencialmente horizontal. Las celdas están limitadas, arriba, por el nivel de terreno y abajo por la presencia de una capa predominantemente arcillosa que constituye el hidroapoyo del acuífero (*FUNS 2000*). La base topográfica se construyó a partir de la Hoja 3963-12-1 (CABILDO) en escala 1:50.000 del IGM. El área tiene una altura entre 200 m s.n.m. (hacia el norte) y 120 m s.n.m. (en la porción sur) (Figura 3).

Las condiciones de contorno asignadas en los límites de la zona de estudio son: nivel fijo al este y sureste (en correspondencia con el curso effluente y permanente del río Sauce Grande); por el norte se introdujeron caudales de ingreso de agua subterránea y por el noreste y oeste una condición de caudal nulo siguiendo líneas de flujo. Dentro del área del modelo se estableció una condición tipo río en coincidencia con el curso del A.O. Napostá Chico que atraviesa el sector del modelo de norte a sur (Figura 4). La condición de flujo nulo siguiendo una línea de escurrimiento subterráneo impuesta hacia el sur, debe tomarse como un límite teórico y aproximado a la realidad, ya que la ausencia de información hidrodinámica del acuífero no permiten extender el modelo hacia ese sector.

Para construir el modelo en régimen estacionario se tomó como base el mapa de isopiezas de julio del 2000 (Figura 1) asumiendo que el mismo representa una condición media temporal de los niveles freáticos.

#### Ingresos de agua del modelo

El principal ingreso de agua al sistema es la recarga a partir del agua de lluvia. En base al modelo conceptual descrito en párrafos anteriores, la misma está en el orden al 12,5% de la precipitación, es decir 84 mm/año. El otro ingreso significativo de agua al modelo lo constituye el flujo subterráneo proveniente de la cuenca superior del A.O.. Este valor se estimó en torno a los 14500 m<sup>3</sup>/d de acuerdo a la información piezométrica, geoelectrica e hidráulica obtenida en estudios previos (*FUNS 2000*).

#### Calibración y resultados en régimen estacionario

La calibración se realizó mediante el método de prueba y error. Los parámetros utilizados en el proceso fueron la recarga, la conductancia del río y los caudales subterráneos que ingresan por el borde norte del modelo. La conductividad hidráulica asignada a toda la capa fue de 1,7 m/d correspondiente al valor promedio obtenido a través de los seis ensayos de bombeo efectuados en el área estudiada (*FUNS 2000; Albouy et al. 2005*). El valor de la recarga calculado, corresponde a un valor medio para el área, por lo que se lo asignó de manera uniforme sobre todas las celdas activas.

Sobre el curso del A.O. Napostá Chico se estableció una condición mixta tipo río. La cota del fondo del cauce en el origen se impuso en 189 m variable hasta la celda donde finaliza con una cota de 120 m y un tirante de agua medio a lo largo de todo el trayecto de 1 m. La conductancia hidráulica del río (C) se estableció según la conductividad hidráulica de los materiales del fondo ( $K_0$ ), la longitud del río en cada celda (L), el ancho del río (W) y el espesor del material del lecho (M) de acuerdo a la siguiente relación:

Durante la calibración se obtuvo una conductancia hidráulica entre  $250 \text{ m}^2/\text{d}$  y  $500 \text{ m}^2/\text{d}$  que arroja una descarga subterránea coherente con los valores de caudal básico aforados (FUNS 2000). Tales valores se obtienen considerando:  $L = 180 \text{ m}$ ,  $W = 3,5 \text{ m}$ ,  $K_0 = 0,2 \text{ m/d}$  y  $M$  variable entre  $0,25$  y  $0,5 \text{ m}$ .

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 contrastó luego con el que se estimó mediante cálculos basados en el conocimiento hidrogeológico. Del total del flujo entrante por el borde norte ( $14.500 \text{ m}^3/\text{d}$ ), donde el acuífero libre tiene un espesor bien definido por el basamento hidrogeológico paleozoico subyacente, una parte alimenta a los niveles acuíferos más profundos, situados, fundamentalmente en la Fm. Omibucta y otra a la capa freática. En el límite sur del área de estudio, el basamento geológico precámbrico-paleozoico se encuentra a unos  $450 \text{ m}$  de profundidad, lo cual pone de manifiesto la existencia de niveles acuíferos profundos. Bonorino (1988) y Carrica (1998) calcularon para el sector pedemontano de las Sierras Australes, que alrededor del  $35 \%$  del caudal ingresante pasaría a formar parte del escurrimiento subterráneo profundo. En base a lo anterior, se asumió un caudal entrante al acuífero freático de  $9.425 \text{ m}^3/\text{d}$ . Este caudal subterráneo se distribuyó de manera uniforme y proporcional a lo largo de las 66 celdas activas que abarcan todo el borde norte del área modelada ( $Q = 142,8 \text{ m}^3/\text{d}$  por celda).

El modelo en régimen de flujo estacionario resultado de la calibración, se aprecia en la Figura 5. El mapa piezométrico simulado reproduce la configuración regional de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Además, muestra la relación hidráulica entre el Ao. y el acuífero observándose un comportamiento efluente del curso hasta la localidad de Cabildo, consistente con las evidencias de campo.

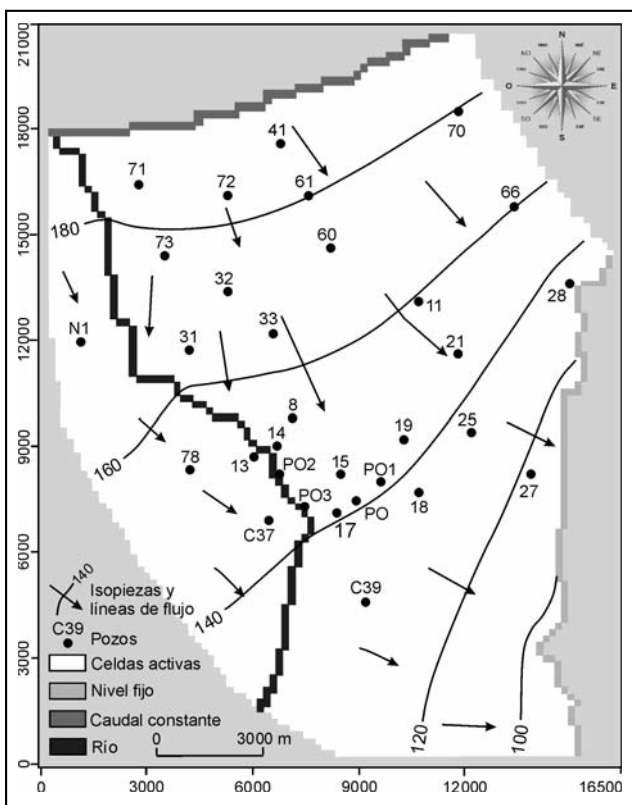


Figura 5. Mapa de isopiezas simulado. Equidistancia 20 m.

El ajuste obtenido se evaluó comparando los niveles medidos y observados en 31 pozos de la red de registro de niveles en julio del 2000 (Tabla 1 y Figura 6). El mismo indica un coeficiente de correlación ( $r$ ) entre valores simulados y medidos de  $r = 0,99$  con un error cuadrático medio normalizado del  $6 \%$ . El error medio absoluto es de  $3 \text{ m}$  (valor que está en el orden de las fluctuaciones plurianuales de los niveles freáticos del área) aunque se obtuvieron diferencias significativas en algunos sectores de la cuenca que podrían adjudicarse fundamentalmente a variaciones locales en la litología del material.

En la Figura 7 puede verse un balance de ingresos y egresos de agua al modelo que totaliza unos  $64.093 \text{ m}^3/\text{d}$ . Las entradas de agua al sistema acuífero corresponden a la recarga por agua de lluvia ( $83\%$ ), flujo subterráneo que ingresa por el norte del área de estudio ( $15 \%$ ) e influencia del Ao. ( $2\%$ ). Las salidas de agua del acuífero se reparten entre flujo a través del nivel fijo o sea flujo subterráneo saliente por el río Sauce Grande ( $39.446 \text{ m}^3/\text{d}$ ) y la descarga al Ao. Napostá Chico ( $24.677 \text{ m}^3/\text{d}$ ). Este último valor significa un aporte del acuífero al curso de unos  $0,285 \text{ m}^3/\text{s}$  consistente con la información hidrométrica de campo.

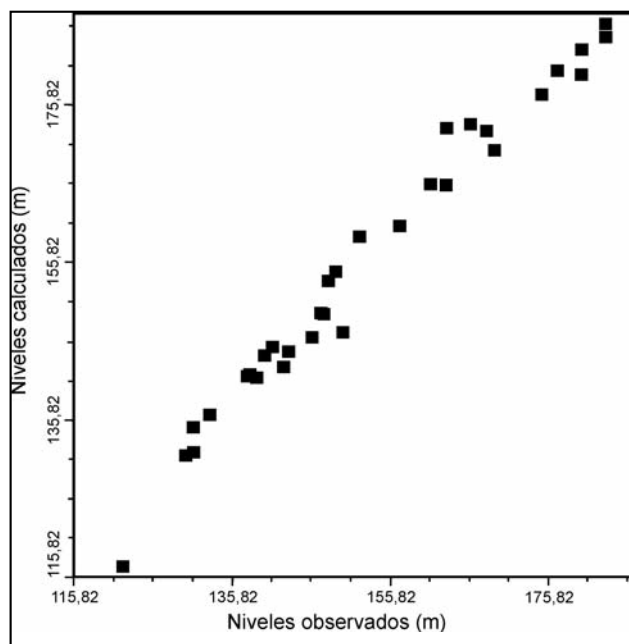


Figura 6. Niveles simulados versus observados.

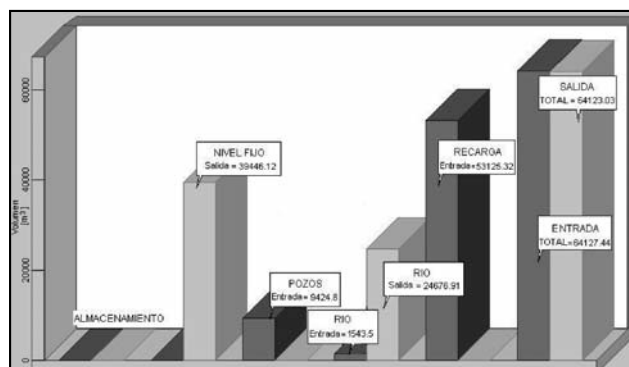


Figura 7. Balance de masas de ingresos y egresos de agua al modelo.

Tabla 1. Niveles estáticos medidos y simulados.

Pozo	Coordenada X en el modelo (m)	Coordenada Y en el modelo (m)	Nivel Observado Obs. (m)	Nivel Calculado Calc. (m)
11	10,700	13,100	152,00	159,13
13	6,032	8,703	147,50	149,27
14	6,700	9,000	147,00	149,40
15	8,500	8,200	141,00	145,00
17	8,400	7,100	139,00	141,08
18	10,700	7,700	133,00	136,50
19	10,300	9,200	140,00	143,87
21	11,800	11,600	150,00	146,86
25	12,200	9,400	131,00	134,89
27	13,900	8,200	122,00	117,19
28	15,000	13,600	130,00	131,36
31	4,200	11,700	163,00	165,63
32	5,300	13,400	168,00	172,54
33	6,600	12,200	161,00	165,70
41	6,800	17,600	183,00	186,03
60	8,200	14,600	166,00	173,17
61	7,600	16,100	177,00	180,03
66	13,400	15,800	157,00	160,44
70	11,800	18,500	180,00	179,63
71	2,800	16,400	183,00	184,39
72	5,300	16,100	180,00	182,79
73	3,500	14,400	175,00	177,17
78	4,230	8,356	149,00	154,61
08	7,100	9,800	148,00	153,41
C37	6,435	6,885	143,00	144,48
C39	9,200	4,600	131,00	131,73
N1	1,176	11,936	169,00	170,01
PO	8,927	7,470	137,80	141,45
PO2	6,750	8,193	146,10	146,27
PO3	7,473	7,295	142,45	142,55
PO4	9,646	8,011	138,10	141,56

#### Simulación de bombeos en estado transitorio

La modelación del flujo estacionario se empleó como condición inicial para realizar una simulación transitoria de bombeos, a efectos de analizar el impacto hidrodinámico que tendrían las extracciones de agua subterránea sobre la hidrodinámica del acuífero y sustentar la posibilidad de llevar a cabo una explotación como las supuestas. Los resultados teóricos que se obtienen se corresponden con los valores de transmisividad del ajuste del modelo estacionario y con un coeficiente de almacenamiento medio de 0,1 calculado en base a los ensayos de bombeo a caudal constante realizados en pozos próximos a la localidad de Cabildo (*Albouy et al. 2005*). Durante la ejecución de las

pruebas a caudales constante y variable se midieron los niveles dinámicos en los pozos de bombeo a pared desnuda que sirven para testear los descensos teóricos que arroja la simulación en estado transitorio.

Un primer escenario de bombeo se planteó considerando una extracción de agua subterránea por medio de una batería de 15 pozos que bombean 100 m<sup>3</sup>/h cada uno, durante los 365 días del año, lo que equivaldría a una extracción que en términos de consumo representa unos 0,41 m<sup>3</sup>/s. La distancia entre pozos se estimó en 250 metros teniendo en cuenta la superposición teórica entre conos de bombeo en base a parámetros calculados por *Albouy et al. (2005)* y a criterios

económicos (longitud de acueductos de interconexión). La ubicación de la batería se estableció en base a criterios geofísicos e hidroquímicos y de conformidad con ABSA sobre calles vecinales, con 12 pozos en sentido noreste y una batería de 6 pozos con rumbo noroeste.

La Figura 8 muestra el nuevo esquema hidrodinámico que se establecería en el acuífero luego de los 365 días de bombeo y que en líneas generales, no difiere del de la simulación estacionaria.

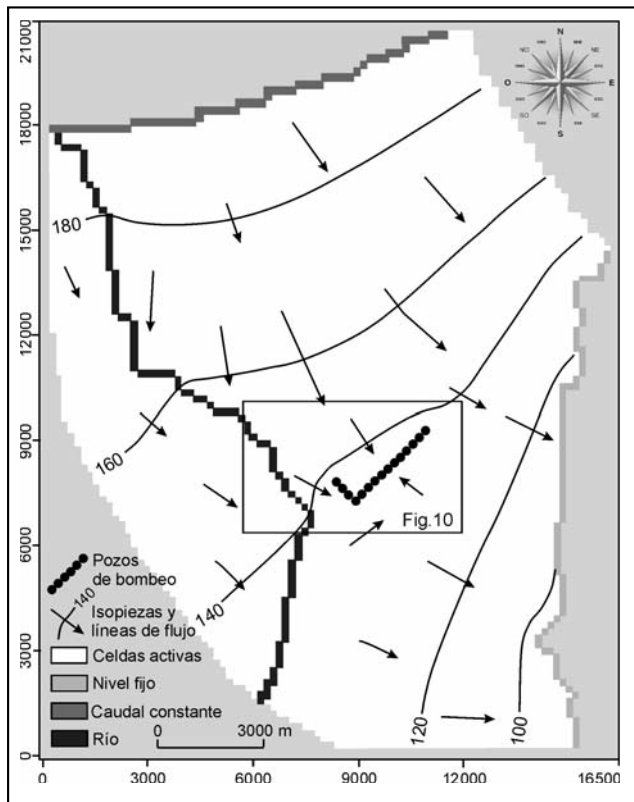


Figura 8. Simulación I. Equidistancia 20 m.

El balance de masas (Figura 9) indica que en esta simulación transitoria de régimen influenciado por bombeo se tomarían del almacenamiento del acuífero unos 33342 m<sup>3</sup>/d. La descarga de agua del acuífero al curso pasa de 24677m<sup>3</sup>/d (estacionario, sin bombeo) a 23163 m<sup>3</sup>/d por lo que se produciría una merma de unos 1514 m<sup>3</sup>/d (0,018 m<sup>3</sup>/s). Asimismo se induciría una captación adicional desde el arroyo (por influencia) de unos 0,01m<sup>3</sup>/s por lo que se produciría una merma del orden del 6% en su caudal básico (0,5 m<sup>3</sup>/s) a la altura de Cabildo.

El máximo abatimiento se produciría a unos 500 m de la intersección de las dos líneas de pozos y sobre la más extensa y sería del orden de 18 m no superando el 20% del espesor saturado del acuífero (Figura 10).

El bombeo no debería afectar los niveles de agua sobre la margen derecha del Ao. (donde está la localidad de Cabildo) tal como lo indican los vectores del flujo en el acuífero y por lo tanto sobre esa margen la influencia del campo de bombeo debería ser nula ya que el Ao. Napostá Chico se comporta como un límite o barrera positiva. El cono de descensos generado afectaría el nivel de agua subterránea en las captaciones próximas a las líneas de pozos de bombeo y en general hasta una distancia de 1000 m podrían aparecer efectos de la extracción.

En el supuesto que el bombeo continuara hasta alcanzar un régimen estacionario, el balance de masas (Figura 11) indica que se tomarían del arroyo unos 0,127 m<sup>3</sup>/s y se verificaría una baja en la descarga subterránea de agua al curso que produciría una merma del orden del 50% en su caudal básico. Asimismo se interceptaría o captaría parte del escurrimiento del acuífero hacia el río Sauce Grande. Estos resultados demostrarían que este escenario de bombeo podría mantenerse teóricamente en el tiempo con la consecuente merma de los caudales de estiaje.

Otro escenario hipotético planteado, supone una explotación constante a lo largo de 365 días de 0,83 m<sup>3</sup>/s por medio de una batería de 30 pozos, separados entre sí 250 m, con

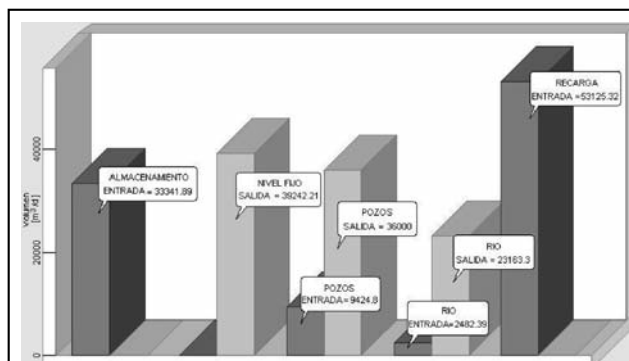


Figura 9. Simulación I. Balance de masas.

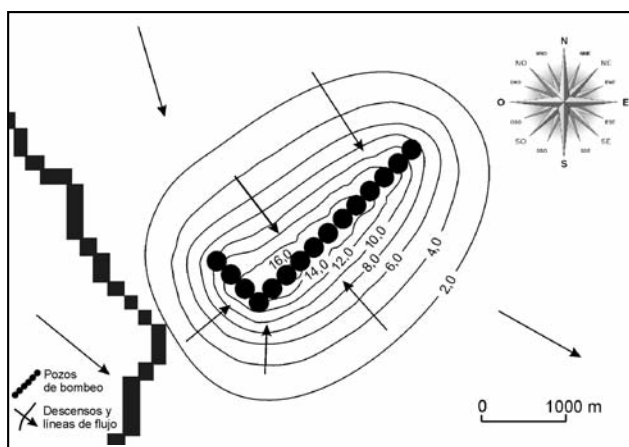


Figura 10. Escenario de bombeo I: Cono de descensos simulado. Equidistancia 2 m.

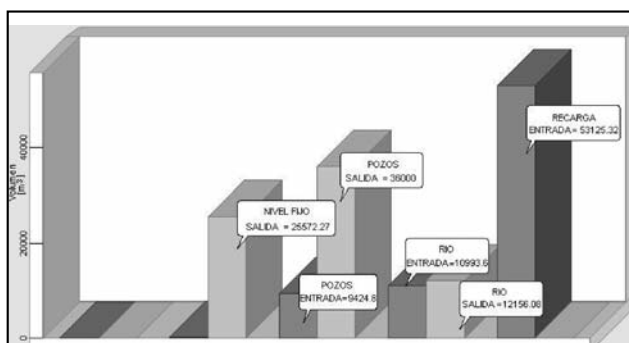


Figura 11. Simulación I. Balance de masas en régimen estacionario.

un caudal de extracción de 100 m<sup>3</sup>/h. La batería está compuesta por la anterior adicionando tres pozos a la línea noroeste y una línea con otros doce pozos en una calle vecinal perpendicular a la anterior y con orientación noreste.

La Figura 12 muestra la configuración que adquiriría la superficie piezométrica luego de un año de bombeo y en la cual se aprecia que se mantiene el esquema hidrodinámico general de flujo subterráneo.

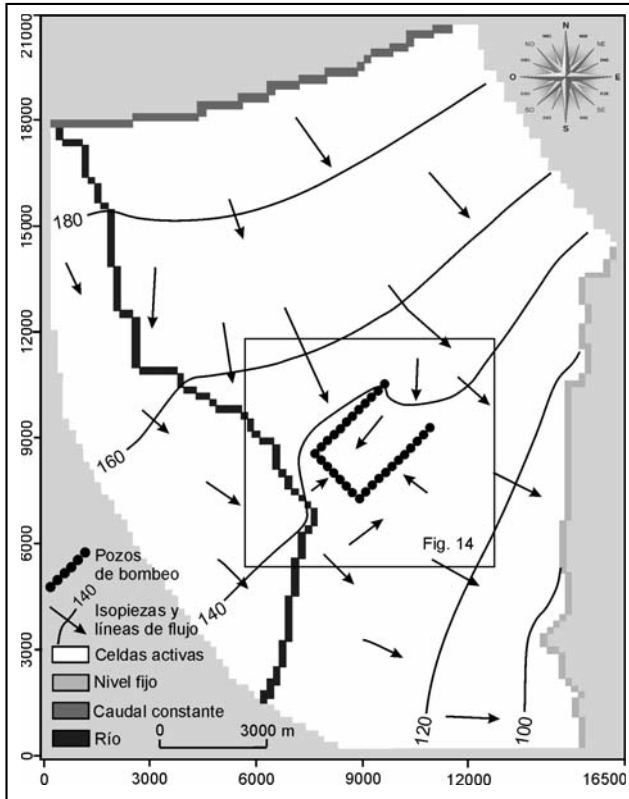


Figura 12. Simulación II. Equidistancia 20 m.

El balance de masas (Figura 13) indica que en esta otra situación hipotética se tomarían del almacenamiento del acuífero unos 64794 m<sup>3</sup>/d. La descarga de agua del acuífero al curso pasaría de 24677 m<sup>3</sup>/d (estacionario, sin bombeo) a 20917 m<sup>3</sup>/d por lo que se produciría una merma de unos 3760 m<sup>3</sup>/d (0,043 m<sup>3</sup>/s). Asimismo se induciría una captación adicional desde el arroyo (por influencia) de unos 0,037 m<sup>3</sup>/s por lo que se produciría una merma del orden del 20% en su caudal básico.

Los máximos abatimientos del nivel freático se producirían en el sector interno a la intersección de la línea de pozos y estarían en orden a los 18-19 m (Figura 14). El radio de influencia de la batería de pozos evoluciona con el tiempo de bombeo, y luego de un año de explotación, los resultados de la modelación indican que, podrían verificarse descensos medios de hasta 5 m en el nivel de agua, en los pozos ubicados hasta 1000 m de la batería de explotación. El cono de descensos no debería afectar el nivel de agua en los pozos que abastecen a la localidad de Cabildo, situada sobre la otra margen del Ao. Napostá Chico y el impacto de la explotación debiera ser poco significativo sobre esta margen.

Si bien los resultados demuestran la factibilidad de llevar a cabo una explotación anual transitoria como la supuesta anteriormente, se trata de un escenario de bombeo excepcional y teórico ya que una extracción de este tipo se instrumentaría, en

la práctica, solo en forma acotada en el tiempo y en función de las necesidades de consumo. Así podría pensarse en una explotación estacional sustentable del acuífero, en los meses de demanda pico del verano.

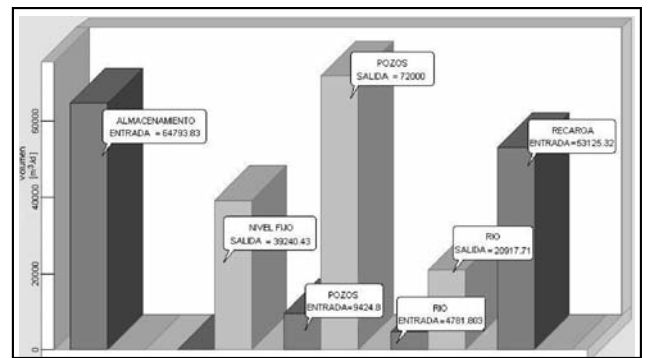


Figura 13. Simulación II. Balance de masas.

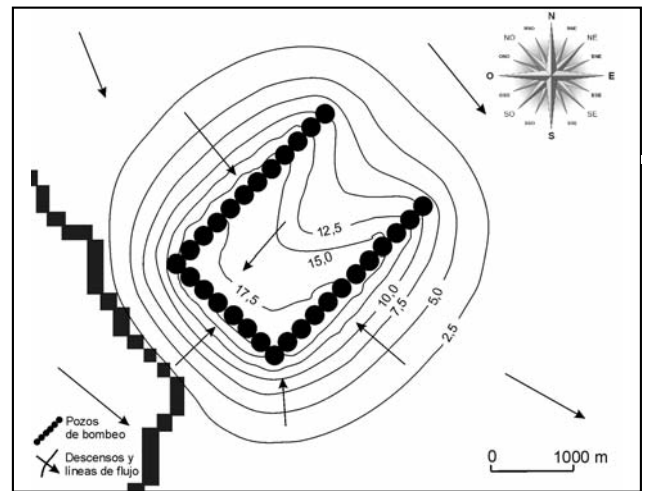


Figura 14. Escenario de bombeo II: Cono de descensos simulado. Equidistancia 2,5 m.

## CONCLUSIONES

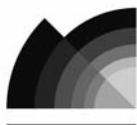
La información hidrogeológica disponible permitió formular un modelo conceptual confiable respecto al funcionamiento del sistema acuífero estudiado. Asimismo, los estudios de campo previos, en particular sobre los parámetros hidráulicos del acuífero y la recarga, permiten otorgar robustez al modelo numérico construido.

El análisis del impacto hidrodinámico que ejercerían los campos de bombeo simulados sobre el sistema, demuestran la factibilidad de extracción de agua subterránea, para suplementar el abastecimiento a la ciudad de Bahía Blanca, Punta Alta y alrededores aún considerando sólo una pequeña parte del extenso acuífero freático del pie de monte de las Sierras Australes. Una adecuada gestión de los recursos hídricos debería tener en cuenta el aprovechamiento conjunto o coordinado de las aguas superficiales y subterráneas lo que permitiría proporcionar el recurso hídrico de manera racional y sustentable, en función de las necesidades de la demanda ya que los acuíferos o embalses subterráneos permiten complementar a los superficiales en épocas de sequía. En este sentido, una explotación racional del acuífero constituye una alternativa técnica y económicamente viable para paliar la crítica situación hídrica en la región.



## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALBOUY, R., J. CARRICA, Y G. BONORINO, 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), Río Cuarto, 259-268.*
- ALBOUY, R., J. CARRICA Y D. LAFONT, 2010.  
Crisis hídrica de la ciudad de Bahía Blanca: sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo para abastecimiento humano.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras, Tomo II: 449-456. Azul, Buenos Aires, Argentina. Varni, Entraigas, Vives Editores.*
- BONORINO, G., 1988.  
Geohidrología del sistema hidrotermal profundo de la región de Bahía Blanca.  
*Tesis doctoral. Biblioteca Central UNS. 289 p. Inédita.*
- CARRICA, J., 1998.  
Hidrogeología de la cuenca del Ao. Napostá Grande, provincia de Buenos Aires.  
*Tesis doctoral. Biblioteca Central UNS. 215 p. Inédita.*
- CARRICA, J., 2009.  
Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. Recarga de acuíferos. Aspectos generales y particulares en regiones áridas.  
*VI Congreso Argentino de Hidrogeología, Santa Rosa, 71-80.*
- FIDALGO, F., F. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
*VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio, Bahía Blanca, 103-138.*
- FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, FUNDS, 2000.  
Estudio hidrogeológico de la cuenca del Ao. Napostá Chico. Estapas 1, 2 y 3.  
*Inéditos.*
- FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, FUNDS, 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. 64 pp y anexos (Inédito).*
- GONZÁLEZ URIARTE, M. 1984.  
Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires.  
*IX Congreso Geológico Argentino, S. C. Bariloche, (3): 556-576.*
- GONZÁLEZ, N. 2005.  
Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires.  
*En Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. XVI Congreso Geológico Argentino, Relatorio, La Plata, (22): 359-374.*
- LLAMBÍAS, E. Y C. PROZZI, 1975.  
Ventania.  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires, Bahía Blanca, 79-103.*
- MCDONALD, G. Y A. HARBAUGH, 1988.  
A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.  
*US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, chapter A1.*
- MINISTERIO OBRAS PÚBLICAS PROVINCIA DE BUENOS AIRES (MOP), 1990.  
Plan Integral de Abastecimiento de Agua a Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta.  
*Prefactibilidad Técnica y Económica. Convenio MOP-CIC-UNS. Inédito.*



## Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana

### *Utilization of surface temperature and enhanced vegetation Index images for the study of hydric conditions on Pampa region*

Holzman, Mauro <sup>1</sup> ✉ - Rivas, Raúl <sup>1-2</sup> - Piccolo, María Cintia <sup>3-4</sup>

Recibido: 28 de Junio de 2011 • Aceptado: 08 de Marzo 2012

#### Resumen

*En este trabajo se avalúan los efectos de dos eventos ENOS en la disponibilidad de agua en el suelo de la región pampeana argentina-uruguaya a través del índice Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI). En 3 áreas no cultivadas, ubicadas en las provincias de La Pampa y Buenos Aires en Argentina y en el departamento de Maldonado en Uruguay se analizaron imágenes satelitales del sensor MODIS de temperatura de superficie (LST) e índice de vegetación mejorado (EVI), composición de 8 y 16 días respectivamente, de 67,75 ha de resolución. Los períodos de análisis fueron seleccionados a partir del índice Niño 3.4 de anomalías de temperatura de la superficie del mar y comprendieron los meses de agosto-febrero de 2007-2008 (La Niña) y 2009-2010 (El Niño). El EVI mostró valores más bajos en la provincia de Buenos Aires y en Uruguay para el periodo 2007-2008 que en 2009-2010, a partir de octubre-noviembre; la LST fue menor en Uruguay para el periodo 2009-2010 que en 2007-2008. El TVDI mostró una leve tendencia a condiciones de menor disponibilidad de agua en el suelo en Uruguay durante la etapa madura de La Niña. Se propone al TVDI como una herramienta para evaluar las teleconexiones de ENOS en la disponibilidad de agua en el suelo de la región pampeana, con el potencial de ampliar su utilización en el estudio, planificación y gestión de múltiples actividades o aspectos relacionados con el ciclo hidrológico a escala regional.*

**Palabras clave:** ENSO, TVDI, LST, EVI.

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA - CIC - Municipalidad de Azul) - República de Italia 780 (B7300), Azul, Buenos Aires, Argentina.

✉ mauroh@faa.unicen.edu.ar

<sup>2</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires

<sup>3</sup> Instituto Argentino de Oceanografía, Camino la Carrindanga km 7 (B8000), Bahía Blanca, Argentina

<sup>4</sup> Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

#### Abstract

*The effects of two ENSO events on soil moisture of the Pampa Region of Argentina and Uruguay through the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) are evaluated. In 3 uncultivated areas of La Pampa and Buenos Aires provinces in*

Argentina and Maldonado department in Uruguay, satellite images from the sensor MODIS of LST (Surface Temperature) and EVI (Enhanced Vegetation Index), composition of 8 and 16 days respectively and 67,75 ha resolution were analyzed. The analyzed periods were selected considering the Niño 3.4 index of Sea Surface Temperature anomalies which correspond to August-February 2007-2008 (La Niña event) and 2009-2010 (El Niño event). EVI showed lower values in Buenos Aires province and Uruguay for the 2007-2008 period from October-November than 2009-2010 period; LST was lower in Uruguay for 2009-2010 period than 2007-2008 period. TVDI showed a slight trend to lower water availability before weakening La Niña. TVDI as a tool to evaluate ENSO teleconnections on soil water availability on Pampa Region is proposed, with potential application in research, planning and management of several aspects related to hydrological cycle at regional scale.

**Keywords:** ENSO, TVDI, LST, EVI.

## INTRODUCCIÓN

Aunque en la región pampeana se han observado incrementos en la producción agropecuaria a partir de la década de 1980 (Viglizzo *et al.* 2004), los excesos o déficits de agua ejercen limitaciones para la producción en secano. A su vez, estas fluctuaciones hídricas tienen la potencialidad de afectar diversas actividades humanas como es la generación de energía hidroeléctrica, entre otras. Específicamente la variabilidad interanual en las precipitaciones en el sureste de Sudamérica ha sido frecuentemente asociada a El Niño Oscilación Sur (ENOS), con valores superiores a lo normal durante El Niño y escasez en La Niña. Scian (2000), analizó la relación entre dos índices de ENOS, el Índice de Oscilación del Sur (SOI), las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) y la variabilidad de las precipitaciones en el centro-oeste de la pradera pampeana. Encontró que las correlaciones espaciales más fuertes ocurrían al final de la primavera y comienzos del verano. A su vez, otros autores como Compagnucci y Agosta (2008) encontraron que no hay vinculación entre las anomalías de SST del Pacífico ecuatorial y la precipitación en el centro-oeste de Argentina. Boulanger *et al.* (2004), estudiando las teleconexiones de ENOS en las precipitaciones sobre la cuenca del Paraná-Plata en los últimos 50 años, hallaron que hay desplazamientos de los patrones espaciales de teleconexión entre un evento y otro, impidiendo la definición de una relación estadística robusta entre ENOS y la variabilidad de las precipitaciones.

Por otro lado, en las últimas tres décadas la teledetección ha contribuido a mejorar el conocimiento de la variabilidad de diversos procesos hidrológicos, climáticos y ecológicos (Poveda y Salazar 2004). Dicha herramienta ha sido aplicada recientemente en la región pampeana en estudios de diversa temática, desde la hidrología a la producción agrícola (Rivas *et al.* 2011). Además, algunos autores (Asner y Townsend 2000; Kogan y Wei 2000; Poveda *et al.* 2001) han analizado la relación entre ENOS y las condiciones de la vegetación en el sur de Sudamérica, a través de imágenes satelitales. Kogan y Wei (2000) con imágenes del satélite NOAA compararon la condición de la vegetación durante 4 eventos El Niño y La Niña en todo el mundo. Hallaron una zona de elevada correlación en el centro-este de Argentina. En la fase temprana del evento las diferencias en las condiciones de la vegetación serían mínimas, con posterior deterioro durante La Niña y de mejora en El Niño en las fases maduras del fenómeno (agosto a febrero).

La información que brindan los sensores a bordo de satélites en la región térmica del espectro electromagnético complementada con la del Visible e Infrarrojo cercano ha sido utilizada (Goward *et al.* 1985; Nemani *et al.* 1993; Moran *et al.* 1994; Sandholt 2002; Rivas y Houspanossian 2006; Han *et al.* 2010)

para inferir el estado hídrico de la vegetación y el suelo conjuntamente, posibilitando el estudio de áreas parcialmente vegetadas. La primera combinación que mostró aptitud en reflejar la condición de humedad del suelo fue la relación LST/NDVI (Temperatura de Superficie/Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Nemani *et al.* (1993), calculando la pendiente de dicha relación para diferentes áreas, encontraron que está asociada a las condiciones de humedad del suelo. A su vez, brinda información sobre la resistencia de la cubierta vegetal y la posibilidad de estudiar la interacción superficie-atmósfera. Posteriormente, Moran *et al.* (1994), basándose en el método LST/NDVI y en el índice Crop Water Stress Index, desarrollaron el índice Water Deficit Index (WDI). El WDI se sustenta en la relación entre la diferencia de temperatura de la superficie y la del aire con el NDVI, permitiendo estimar la tasa de evapotranspiración y el déficit relativo de agua para superficies total y parcialmente cubiertas por vegetación.

Sandholt *et al.* (2002), desarrollaron el Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI). En este índice supone que gráficamente la dispersión de LST en función de NDVI tiene forma triangular. Luego el TVDI se puede estimar definiendo los límites húmedos y secos en el triángulo. Dichos autores estimaron este índice para la región norte de Senegal con imágenes NOAA-AVHRR y, comparándolo con la humedad superficial simulada del suelo, encontraron altas correlaciones ( $R^2=0,70$ ) con patrones espaciales similares entre sí. Han *et al.* (2010) aplicaron el TVDI con imágenes producto de LST y NDVI del sensor MODIS sobre distintas cubiertas en la región Noreste de China. Encontraron que este índice tiene aptitud para reflejar los cambios espaciales y temporales de humedad superficial del suelo, mostrando una alta concordancia ( $R^2>0,70$ ) entre las estimaciones desde satélite y la humedad relativa del suelo medida en campo.

En este trabajo se propone evaluar preliminarmente a través de la relación entre LST y EVI (Índice de Vegetación Mejorado) si los cambios en las condiciones hídricas de superficie en la región pampeana argentina-uruguaya en dos primaveras y veranos están influenciados por los eventos ENSO.

## METODOLOGÍA

El análisis de LST y EVI se realizó mediante el uso de productos MOD11 (Land Surface Temperature and Emissivity), composición de 8 días y MOD13 (Gridded Vegetation Index), composición de 16 días, correspondientes al sensor AQUA/MODIS (<http://wist.echo.nasa.gov>). Las imágenes fueron procesadas con el software ENVI y proyectadas a coordenadas Geográficas (Lat/Long), Datum WGS84. Luego se realizó un recorte de la región pampeana y se armaron los pares de imágenes de LST

y de EVI de un mismo periodo. Para equiparar los 16 días analizados en el producto MOD13, se computaron 2 imágenes del MOD11 para cada imagen de EVI, según la metodología de Han et al. (2010). Todas las imágenes procesadas tienen una resolución de 67,75 ha.

Las imágenes utilizadas en el análisis se seleccionaron tomando como referencia el índice Niño 3.4 (Figura 1) (<http://www.cpc.noaa.gov/data/indices>). El índice Niño 3.4 se define como la media de las anomalías de SST sobre un área rectangular limitada por: 5°N - 5°S y 170°O - 120°O. Este índice, considera como periodo El Niño o La Niña si las anomalías de SST en el área rectangular es mayor a +0,8 y menor a -0,8, respectivamente. Los valores de anomalías intermedios son considerados como periodo neutro ([www.bom.gov.au](http://www.bom.gov.au)). Tomando los límites anteriores como base, se seleccionaron los siguientes periodos que conforman 14 pares de imágenes LST/EVI:

- agosto-febrero 2007-2008 (periodo La Niña) y
- agosto-febrero 2009-2010 (periodo El Niño)

#### Áreas de Interés

En la región de estudio se seleccionaron 3 áreas de interés (AOI) correspondientes a zonas naturales o no cultivadas. Para evitar los posibles efectos antrópicos en la LST y EVI por el cultivo, con imágenes del satélite Landsat 5 se corroboró que las áreas permanecieron invariantes en el periodo considerado. Estas imágenes fueron corregidas espacialmente en base a los mosaicos ortorectificados de Landsat ETM+, GeoCover 2000, de 14,25 m de resolución espacial. Las AOI seleccionadas fueron 1 en la provincia de Buenos Aires (BA) y 1 en la provincia de La Pampa (LP), Argentina, y 1 en Uruguay (Ur) (Figura 2). La Figura 2 A muestra la ubicación de dichas AOI y, como ejemplo, la evolución temporal 2007 (Figura 2 B)-2010 (Figura 2 C) de la considerada en BA, correspondiente a Path 226 y Row 086. La caracterización de las mismas es la siguiente:

- AOI de provincia de La Pampa (25.400 ha): está ubicada en un relieve suavemente ondulado por la

presencia de médanos. Los suelos predominantes son los Entisoles, con dominio de suelos Torriortent y Torripsament, poco estructurados, con texturas arenosas, drenaje excesivo y permeabilidad muy alta. El clima es templado semiárido, con precipitaciones medias anuales de 500 mm y déficit hídrico en primavera-verano. La vegetación es una formación leñosa alta de bosque caducifolio de variable densidad, dominada por *Prosopis caldenia* (Cano, 1980).

- AOI de provincia de Buenos Aires (30.800 ha): está incluida en una llanura deprimida, con presencia de bajos inundables. Los suelos son del orden de los Molisoles y Alfisoles, con un horizonte superficial menos desarrollado que en los primeros; también se encuentran hidromórficos con permeabilidad deficiente (Batista et al. 2005). Los suelos más comunes son los Natra cuoles y Natralboles, con un horizonte arcilloso, baja permeabilidad y alto contenido en sales sódicas (Salazar Lea Plaza y Moscatelli 1989; Lavado 1992). El clima es templado sub-húmedo, comúnmente con exceso de lluvias en invierno y déficit en verano (Lemcoff 1992). La vegetación predominante es pastizal natural, presentando estepas gramíneas y praderas con distinta cobertura y altura de pastos y hierbas. En los suelos con un horizonte superficial profundo y bajo contenido de sales se desarrollan gramíneas altas, cercanas a 0.8 m y en los suelos poco profundos y más salinos, gramíneas más bajas y predominantemente halófilas.
- AOI de Uruguay (89.700 ha): se ubica en una planicie suavemente ondulada. Los suelos son predominantemente Molisoles, dominando Argiudol y en menor proporción Hapludol, ambos con buen desarrollo vertical. El clima es templado sub-húmedo a húmedo, con precipitaciones anuales de 1100mm. Durante el verano suelen ocurrir déficits hídricos. La vegetación es predominantemente pradera natural. En las márgenes de los cursos de agua se encuentra vegetación arbórea de monte ribereño, con cobertura media a densa.

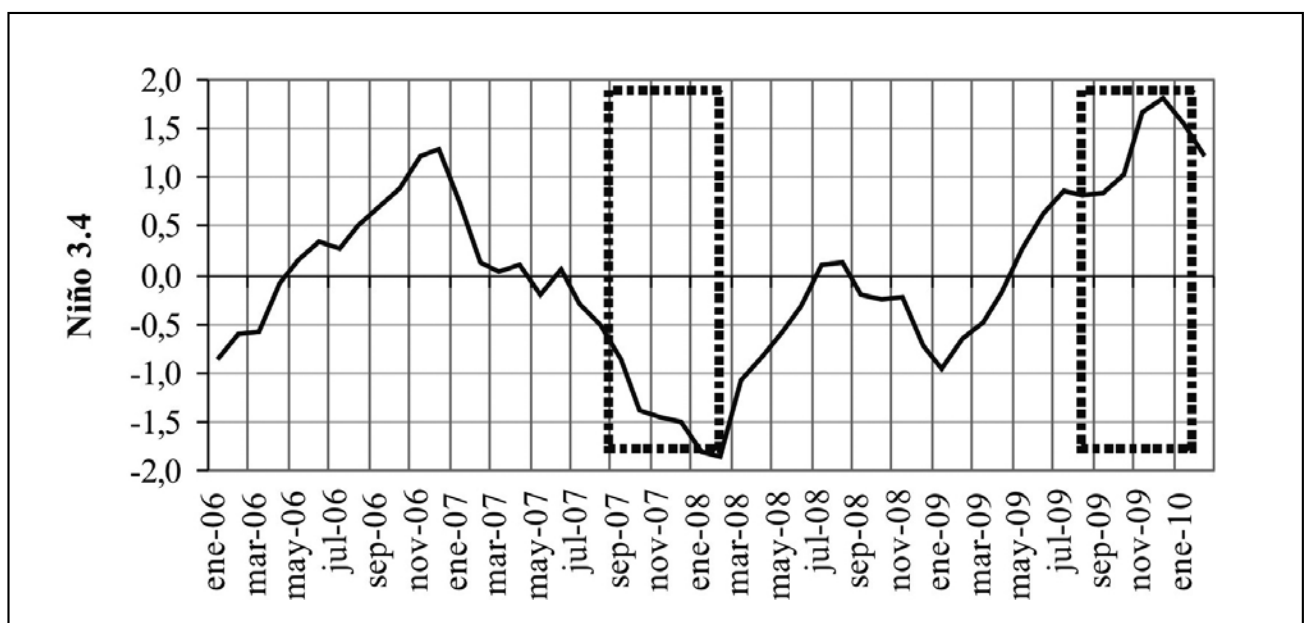


Figura 1. Índice Niño 3.4 de anomalías de temperatura enero 2006-enero 2010.

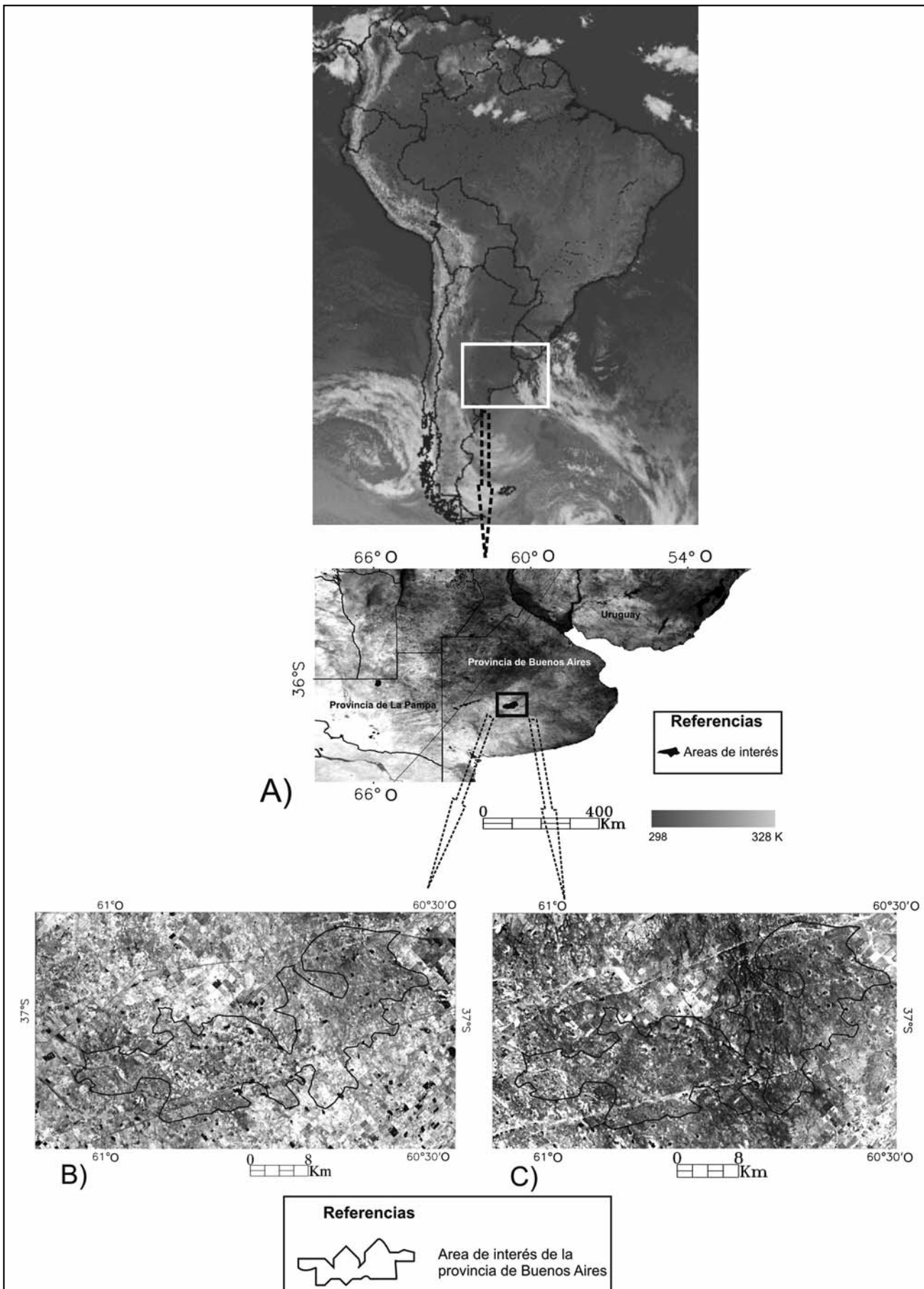


Figura 2. A) Ubicación de las AOI sobre una imagen de temperatura de superficie, B) Imagen Landsat 5 del 21/07/2007, C) Imagen Landsat 5 del 01/12/2010.

En menor proporción hay árboles muy dispersos alejados de los cursos de agua, característicos de la formación parque (Nin 1981).

#### Temperature Vegetation Dryness Index

El TVDI es un índice capaz de proveer información sobre el estado hídrico y energético de la superficie combinando la LST y NDVI y no es dependiente de datos complementarios a los obtenidos desde satélite. Mientras el NDVI brinda información sobre el estado de crecimiento y condición de la vegetación, la LST refleja la disponibilidad de humedad del suelo. El NDVI es un indicador conservativo del estrés hídrico, pues la vegetación se mantiene en buenas condiciones ante un estrés hídrico inicial; en cambio la LST puede aumentar rápidamente (Goetz 1997). La combinación de estas dos variables permite conocer la disponibilidad superficial de agua en el suelo.

Este índice está basado en el espacio de dispersión LST-NDVI. La relación entre estas dos variables generalmente muestra una fuerte correlación negativa (Gillies et al. 1997). Frecuentemente el diagrama de dispersión entre LST y los índices de vegetación muestran una forma triangular (Price, 1990, Carlson et al. 1995), si un amplio rango de cobertura de vegetación y de humedad del suelo está contenido en los datos (Figura 3). Así, el TVDI puede ser definido como (Sandholt et al., 2002):

$$TVDI = \frac{LST - LST \min}{LST \max - LST \min} \quad (1)$$

donde  $LST$  es la temperatura (K) observada para un píxel dado;  $LST \min$  es la mínima temperatura de superficie en el triángulo y define el límite húmedo;  $LST \max = a \times EVI + b$  es la máxima temperatura observada para un valor dado de EVI y  $a$  y  $b$  son parámetros de superficie propios de la imagen que

definen el límite seco como una relación lineal entre los datos (Figura 3).

En la Ecuación 1 utilizamos el índice EVI en vez de NDVI, originalmente propuesto por Sandholt et al. (2002), pues presenta ventajas con respecto al segundo por incorporar coeficientes que consideran el efecto de suelo en la señal captada por el satélite. Filtrando previamente los píxeles con agua y nubes en la imagen, se estimó el TVDI para cada mes con los valores de LST y EVI medios de cada AOI. Del diagrama de dispersión entre LST y EVI se extrajeron las máximas temperaturas para pequeños intervalos de EVI y luego el límite seco se calculó como una regresión lineal entre ambos. La  $LST \min$  fue estimada como el promedio de las temperaturas mínimas para los intervalos de EVI.

#### RESULTADOS

Al analizar los 14 pares de imágenes LST y EVI (Figura 4), se observó que los valores de EVI en LP en general fueron mayores en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, con valores entre 0,11 y 0,34. La LST no mostró una tendencia clara, con valores que oscilaron entre 293 y 319 K. En BA desde agosto a octubre el EVI fue mayor en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, con el comportamiento inverso en enero y febrero; los valores oscilaron entre 0,22 y 0,53. La LST fue similar en ambos eventos, siendo mayor en enero y febrero de 2008; los valores oscilaron entre 293,8 y 314,2 K. En Ur el EVI fue mayor en agosto y septiembre de 2007, con el comportamiento inverso de noviembre a febrero, con oscilaciones entre 0,27 y 0,63. La mayor parte de los meses la LST fue superior durante La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010, oscilando los valores entre 290,7 y 317,5 K. En las tres AOI se observa una tendencia a mejores condiciones de la vegetación en agosto, septiembre y octubre de 2007 que en 2009; la LST en general fue menor en enero y febrero de 2010 que en 2008.

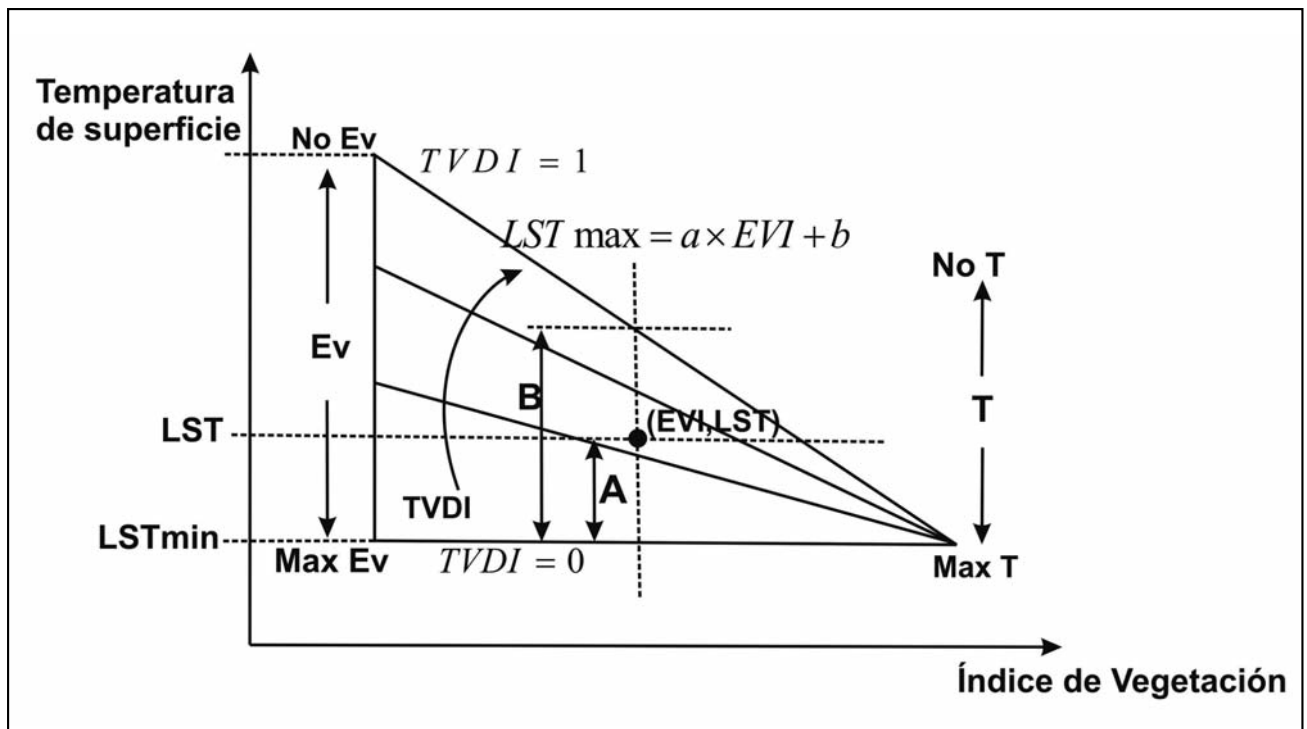


Figura 3. Definición del TVDI. Para un píxel dado (EVI, LST), el TVDI puede ser estimado como la proporción entre A y B (adaptado de Sandholt et al., 2002).

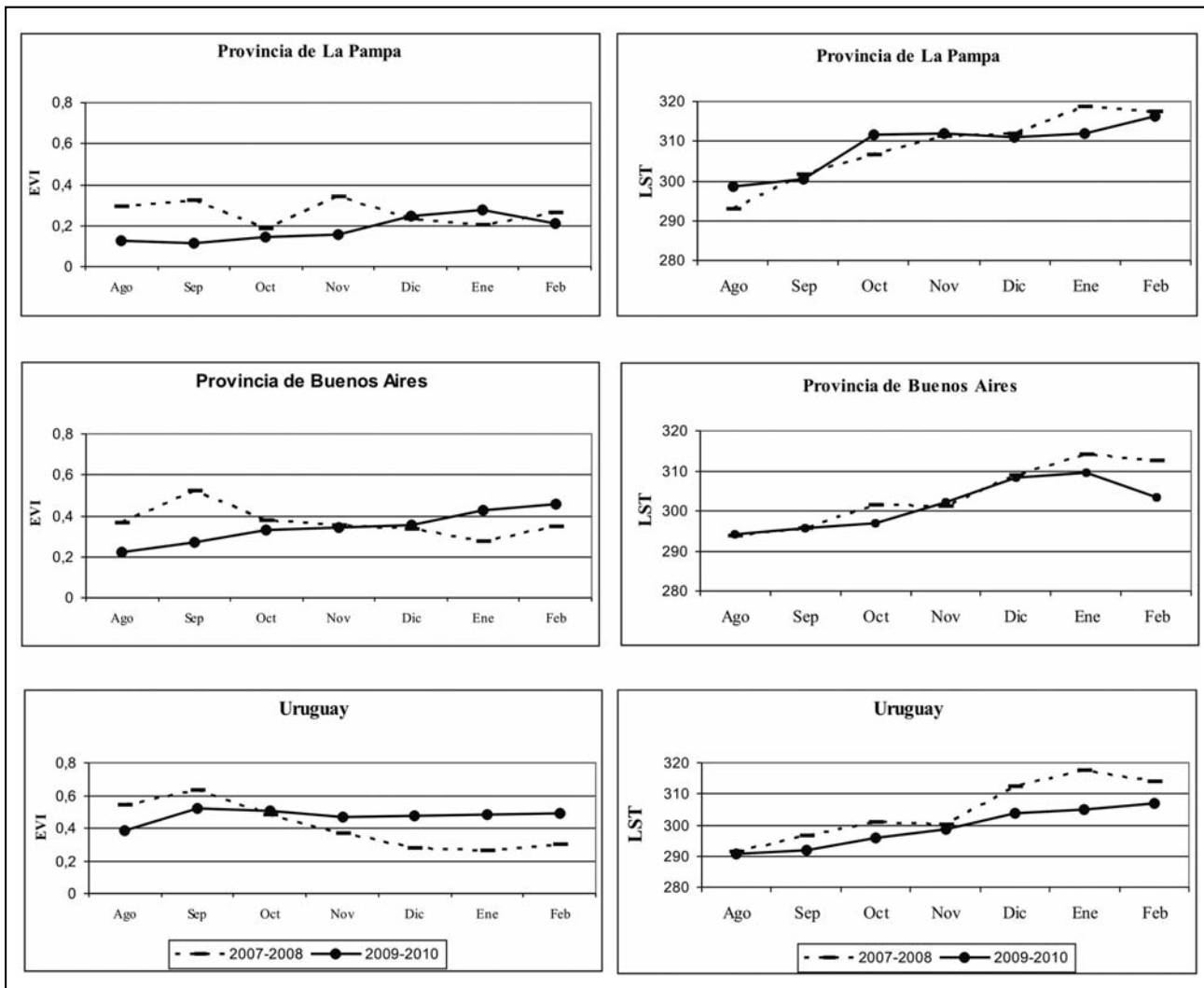


Figura 4. Valores medios de EVI y LST para las AOI analizadas.

De los gráficos de dispersión de LST en función de EVI se calcularon los límites secos y húmedos para cada mes. La Tabla 1 muestra los parámetros a y b de los límites secos y la Tabla 2, los parámetros de los límites húmedos calculados.

Los parámetros del límite seco para cada mes se muestran que el periodo 2007-2008 está caracterizado por una tendencia a LST máximas crecientes desde agosto a febrero, con descensos en octubre y febrero. El periodo 2009-2010 se caracterizó por LST máximas crecientes desde agosto a noviembre, con descensos en diciembre, enero y febrero. Coincidentemente con la bibliografía, se encontró una fuerte correlación negativa entre LST y EVI, con coeficientes de determinación que oscilan entre 0,88 y 0,99.

En el periodo 2007-2008 la  $LST_{min}$  se incrementó desde agosto a enero, con un descenso en febrero. En 2009-2010, se incrementó desde agosto a diciembre, con decrementos en enero y febrero. Para mostrar la evolución temporal del TVDI en las AOI y que esos resultados puedan ser comparables, se seleccionaron la  $LST_{max}$  de enero de 2007 ( $LST_{max} = 34,59EVI + 333,4$ ) y la  $LST_{min}$  de agosto de 2007 (287,3 K) como límites extremos del triángulo. Considerando esos límites, con la Ecuación 1 se estimó el TVDI para cada mes en las tres AOI (Figura 5).

En la Figura 5 se observa que mes a mes hay una tendencia general a mayores valores de TVDI en LP que en BA y

Ur, de acuerdo al régimen de humedad semiárido a sub-húmedo ó húmedo, respectivamente. En la LP el TVDI mostró una tendencia a menores valores en La Niña 2007-2008 que en El Niño 2009-2010 para los meses de agosto, octubre, noviembre y enero. En BA se observó un comportamiento similar en los meses de agosto, octubre, noviembre y febrero. Ur mostró un comportamiento algo diferente con valores en octubre, diciembre y febrero de El Niño menores a La Niña.

## DISCUSIÓN

En las tres AOI analizadas se observó una tendencia a mejores condiciones en la vegetación (altos valores de EVI) de agosto a septiembre-octubre de 2007 que en 2009. Posteriormente, excepto en la provincia de La Pampa, estas condiciones desmejoraron durante 2007-2008. Para este último periodo, el índice Niño 3.4 muestra valores menores a -1 a partir de octubre, marcando un evento La Niña. En 2009-2010, dicho índice toma valores superiores a +1 a partir de noviembre, marcando un evento El Niño. Como es frecuente en el fenómeno ENOS, los eventos La Niña y El Niño analizados comenzaron a desarrollarse a partir de otoño alcanzando su madurez en verano. Posiblemente los cambios observados en la vegetación estarían asociados a las teleconexiones de ENOS en la región pampeana.

Tabla 1. Parámetros obtenidos del límite seco y coeficientes de determinación para agosto-febrero de La Niña 2007-2008 y El Niño 2009-2010 (Holzman y Rivas 2011).

Meses	$LST \max(K)$ 2007-2008	$LST \max(K)$ 2009-2010
Agosto	$LST \max = -16,433EVI + 298,7$ $R^2 = 0,91$	$LST \max = -24,53EVI + 304,4$ $R^2 = 0,93$
Septiembre	$LST \max = -30,759EVI + 309,7$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -23,63EVI + 309,3$ $R^2 = 0,98$
Octubre	$LST \max = -14,806EVI + 307,5$ $R^2 = 0,88$	$LST \max = -34,34EVI + 319,8$ $R^2 = 0,97$
Noviembre	$LST \max = -21,904EVI + 317,5$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -38,8EVI + 330,4$ $R^2 = 0,97$
Diciembre	$LST \max = -22,545EVI + 321,7$ $R^2 = 0,92$	$LST \max = -26,8EVI + 326,4$ $R^2 = 0,96$
Enero	$LST \max = -34,59EVI + 333,4$ $R^2 = 0,98$	$LST \max = -29,47EVI + 327,8$ $R^2 = 0,99$
Febrero	$LST \max = -33,491EVI + 329,6$ $R^2 = 0,99$	$LST \max = -28,7EVI + 324,1$ $R^2 = 0,99$

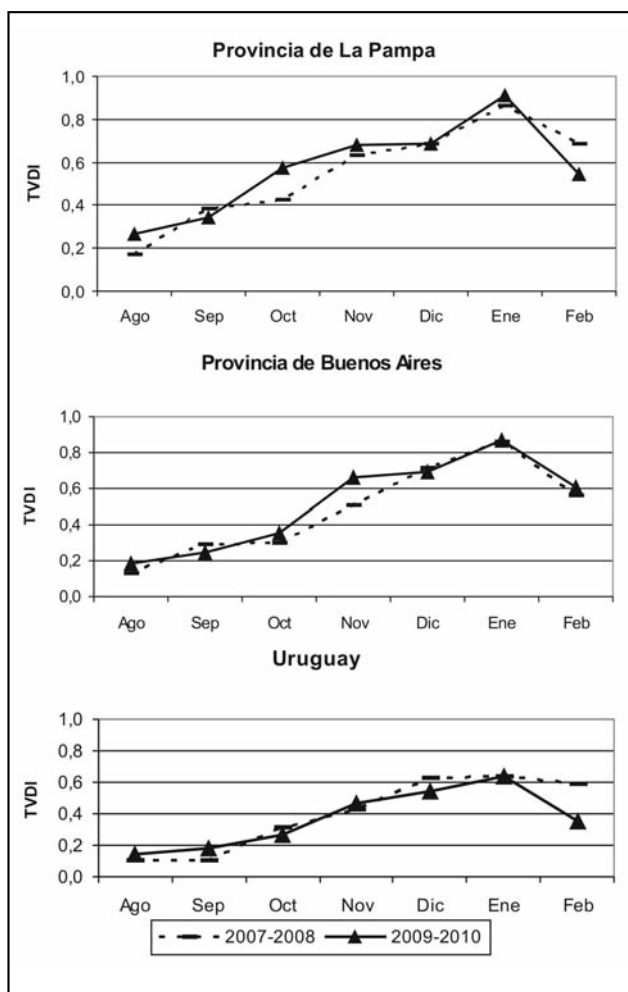


Figura 5. TVDI de agosto a febrero para las tres AOI analizadas.

Tabla 2.  $LST_{min}$  obtenidas para agosto-febrero de La Niña 2007-2008 y El Niño 2009-2010 (Holzman y Rivas 2011).

Meses	$LST \min(K)$ 2007-2008	$LST \min(K)$ 2009-2010
Agosto	287,3	289,2
Septiembre	289,2	291,6
Octubre	292,2	294,2
Noviembre	296,6	297,9
Diciembre	300,0	305,8
Enero	301,2	301,7
Febrero	299,9	298,7

Observando la Figura 3, si durante El Niño hubo mejores condiciones hídricas que en La Niña, es esperable que las  $LST$  (Figura 4) fueran menores durante el primero, por la mayor disponibilidad de agua en el suelo para los procesos de transpiración y evaporación. La  $LST$  no mostró, en la escala de tiempo considerada, ese comportamiento diferencial que podría esperarse durante los dos eventos. Se observó tendencia a valores menores en El Niño sólo en Uruguay y en la provincia de Buenos Aires en enero y febrero.

Teniendo en cuenta que el TVDI engloba no sólo los cambios en el estado de la vegetación, sino los de la  $LST$ , siendo capaz de mostrar las consecuencias de una escasez hídrica reciente, se lo puede considerar como un indicador más adecuado de la disponibilidad de agua en el suelo que aquellas dos variables en forma aislada. Como se muestra en la Figura 5, en la mayor parte de los meses analizados, el TVDI indicó condiciones de menor disponibilidad de agua (valores altos de TVDI) durante El Niño que en La Niña en la provincia de La Pampa y Buenos Aires. Aunque en todos los meses las diferencias no



fueron muy marcadas, en Uruguay se observó una leve tendencia a mayores valores de TVDI en la etapa madura de La Niña que en El Niño.

Cabe preguntarse si la tendencia poco clara del TVDI en la provincia de La Pampa podría deberse a que el bosque de caldén es un ecosistema con mayor resiliencia frente a cambios importantes en las condiciones hídricas que los pastizales de la provincia de Buenos Aires y Uruguay, por lo que no estaría mostrando rápidamente esos cambios. Por otro lado, las condiciones desde el punto de vista hidrológico (tipos de suelos, precipitaciones, tipo de vegetación) en Buenos Aires son similares a las de Uruguay, por lo que el comportamiento diferente observado en el TVDI en estas áreas de interés podrían atribuirse a la mayor influencia de ENOS en Uruguay. No obstante, es necesario hacer un análisis de más eventos ENOS e investigar el comportamiento temporal de estas áreas durante esos eventos. Cabe destacar que el presente trabajo se centró en el estudio de sistemas naturales; en el futuro sería conveniente el análisis del comportamiento de la Temperatura de Superficie y del Índice de Vegetación Mejorado en las áreas cultivadas en relación a ENOS.

### CONCLUSIONES

La influencia de dos eventos ENOS en las condiciones hídricas de superficie en la región pampeana fue estudiada a través de imágenes satelitales productos del sensor MODIS de

Temperatura de Superficie e Índice de Vegetación Mejorado para las primaveras y veranos de los periodos 2007-2008 y 2009-2010.

El índice TVDI se presenta como una herramienta para evaluar las teleconexiones de ENOS en las condiciones hídricas de superficie en la región estudiada. Mediante este índice, no se evidenció la tendencia que podría esperarse sobre mayor disponibilidad de agua en el suelo en las áreas naturales analizadas durante El Niño respecto a La Niña, excepto en Uruguay. Es imprescindible realizar un estudio de más eventos ENOS para confirmar las tendencias del TVDI observadas en las tres zonas consideradas, como así también conocer el patrón espacial de dicho índice en las zonas cultivadas de la región. El índice podría ser utilizado para conocer la distribución espacial de las condiciones hídricas de superficie y su relación con otros componentes del ciclo hidrológico, como así también servir de apoyo para la planificación y gestión de múltiples actividades como la de grandes obras hidráulicas y la gestión de riesgos de sequía e inundación, entre otras.

### AGRADECIMIENTOS

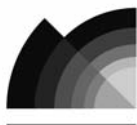
Los autores desean expresar su agradecimiento a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PRH 0032), a la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) y a la CIC por los fondos otorgados para el desarrollo de este trabajo.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASNER, G.P. Y A.R. TOWNSEND, 2000.  
Satellite observations of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. *Geophysical Research Letters*. Volumen 27: 981-984.
- BATISTA B.W; M.A. TABOADA; R.S. LAVADO; S.B. PERELMAN Y R.J.C. LEÓN, 2005.  
Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. *En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas-Un homenaje a J.C. León (editores Oesterhled M; M.R. Aguiar; C.M. Ghera y J.M. Paruelo). Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Argentina. 113-129.*
- BOULANGER, J.P.; J. LELOUP; O. PENALBA; M. RUSTICUCCI.; F. LAFON Y W. VARGAS, 2005.  
Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics*. Volumen 24: 393-413.
- CANO, E., 1980.  
Inventario Integrado de los Recursos Naturales de La Pampa. *INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam Buenos Aires, 493 pp. Argentina.*
- CARLSON, T.N.; R.R. GILLIES Y T.J. SCHMUGGE, 1995.  
An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil-water content. *Agricultural and Forest Meteorology*. Volumen 77: 191-205.
- COMPAGNUCCI, R.H Y E. A. AGOSTA, 2008  
La precipitación de verano en el centro-oeste de Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (ENOS) e interdecádico "tipo" ENOS. *GEOACTA*. Volumen 33: 107-114.
- GILLIES, R.R.; W.P. KUSTAS Y K.S. HUMES, 1997.  
A verification of the "triangle" method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*. Volumen 18, 15: 3145-3166.
- GOETZ, S.J., 1997.  
Multisensor Analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*. Volumen 18: 71-94.

- GOWARD S.N.; G. D. CRUICKHANKS Y A. S. HOPE, 1985.  
Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape.  
*Remote Sensing of Environment. Volumen 18, 2: 137-146.*
- HANG Y.; Y. WANG Y Y. ZHAO, 2010.  
Estimating soil moisture conditions of the Greater Changbai Mountains by Land Surface Temperature and NDVI.  
*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Volumen 48, 6: 2509-2515.*
- HOLZMAN M.E. Y R.E. RIVAS, 2011.  
ENSO effects on hydric conditions of Pampa Region: a preliminary evaluation using LST and EVI.  
*XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasil.*
- KOGAN, F. N. Y G. WEI, 2000.  
Using AVHRR for detection of El Niño/La Niña impacts in land ecosystems.  
*Remote Sensing and Environmental. Volumen 26: 1165-1168.*
- LAVADO, R.S., 1992.  
Río de La Plata Grassland. Soils.  
*En: Coupland, (Ed. R.T.). Ecosystems of the World 8A : Natural Grasslands, Elsevier. Amsterdam. 377-380.*
- LEMCOFF, J.H., 1992.  
Río de La Plata Grasslands. Climate.  
*En: Coupland, (Ed. R.T.). Ecosystems of the World 8A: Natural Grasslands, Elsevier. Amsterdam. 376-377.*
- MORAN M.S.; T.R. CLARKE; Y. INOUE Y A. VIDAL, 1994.  
Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index.  
*Remote Sensing of Environment. Volumen 49, 3: 246-263.*
- NEMANI, R., PIERCE, L., RUNNING, S. Y GOWARD, S.N., 1993.  
Developing satellite-derived estimates of surface moisture status.  
*Journal of Applied Meteorology. Volumen 32, 3: 548-557.*
- NIN, R., 1981.  
Un estudio de los árboles y arbustos nativos de las márgenes del Río Yí desde el Paso San Borjas hasta la desembocadura del arroyo Maciel.  
*Tesis ingeniería agronómica, Facultad de Agronomía, 63 pp. Montevideo.*
- POVEDA, G.; A. JARAMILLO; M.T. GIL; N. QUICENO Y R.I. MANTILLA, 2001.  
Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture and vegetation index in Colombia.  
*Water Resources Research. Volumen 37: 2169-2178.*
- POVEDA, G. Y L.F. SALAZAR, 2004.  
Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia.  
*Remote Sensing of Environment. Volumen 93: 391-401.*
- PRICE, J.C., 1990.  
Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration.  
*Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Volumen 28: 940-948.*
- RIVAS, R.; F. CARMONA Y D. OCAMPO, 2011.  
Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana.  
*Editorial Martín, 125 pp. Argentina.*
- RIVAS, R. Y J. HOUSPANOSSIAN, 2006.  
Obtención de mapas de estrés hídrico a partir de datos captados por los sensores AVHRR y MODIS.  
*VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Paraguay.*
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C. Y G. MOSCATELLI, 1989.  
Mapa de suelos de la Pcia. De Buenos Aires.  
*SAGyP-INTA, 525 pp. Buenos Aires.*
- SANDHOLT I.; K. RASMUSSEN; J. ANDERSEN, 2002.  
A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status.  
*Remote Sensing and Environmental. Volumen 79, 2-3: 213-224.*
- SCIEN, B., 2000.  
Episodios ENSO y su relación con las anomalías de precipitación en la pradera pampeana.  
*GEOACTA Volumen 25: 100-113.*
- WAN, Z., 1999.  
MODIS Land Surface Temperature-Algorithm theoretical basis document.  
*(http://modis.gsfc.nasa.gov)*
- VIGLIZZO, E.F.; A.J. PORDOMINGO, M.G. CASTRO; F.A. LÉRTORA Y J.N. BERNARDOS, 2004.  
Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina.  
*Agriculture, Ecosystems and Environment. Volumen 101: 39-51.*





## Comportamiento de morteros y hormigones con la adición de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados

### *Behaviour of mortar and concrete with the incorporation of soil contaminated with hydrocarbons and heavy metals*

Señas, L. <sup>1</sup> - Priano, C. <sup>1</sup> ✉ - Maiza, P. <sup>2-3</sup> - Marfil, S. <sup>2-4</sup>

Recibido: 22 de Diciembre de 2011 • Aceptado: 19 de Marzo 2012

#### Resumen

*El objetivo del presente trabajo es evaluar el comportamiento de una matriz cementicia con la incorporación de un suelo que contiene hidrocarburos y metales pesados, y si ésta es capaz de retenerlos, o son lixiviados hacia el medio.*

*Se elaboraron morteros cementicios y hormigones, en los que se reemplazó parte del agregado fino con distintos porcentajes del suelo con hidrocarburos. Se determinaron las características físicas de los materiales y propiedades mecánicas como resistencia a flexión y compresión desarrolladas a diferentes edades.*

*Se estudió la microestructura mediante cortes delgados y microscopio, y se realizaron ensayos de lixiviación en muestras de mortero de edad superior a 90 días.*

*Si bien la inclusión del suelo produjo una disminución de la resistencia a compresión del hormigón, ésta puede considerarse aceptable para elaborar un material de relleno. Además, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, el método propuesto es viable para la estabilización de los suelos analizados.*

**Palabras claves:** mortero, hormigón, hidrocarburos, lixiviación.

#### Abstract

*The objective of this work is to evaluate the behavior of a cementitious matrix with the incorporation of a soil with hydrocarbons and heavy metal and if it can hold them or they are leached to the environment.*

*Cementitious mortar and concrete were elaborated with the replacement of part of the fine aggregate by different percentage of soil with hydrocarbons. The physic characteristics of the materials and the mechanic properties (flexural and compressive strength) developed at different ages were determined.*

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur.  
Av. Alem 1253. 8000 Bahía Blanca.  
Te: 0291-4595101. Int. 3223..

✉ cpriano@uns.edu.ar

<sup>2</sup> Dpto. de Geología UNS. San Juan 670. 8000 Bahía Blanca.  
0291-4595101. Int. 3021.

<sup>3</sup> Investigador Principal CONICET.

<sup>4</sup> Investigador Independiente CIC.

*The microstructure was studied by thin section and microscope and leaching tests were made in mortar samples of age upper than 90 days.*

*Even though the soil included decreased the compressive strength of the concrete, it can be considered acceptable to elaborate a filler material. Besides considering the results obtained in the leaching test, this method is able to stabilize the soils studied.*

**Keywords:** mortar, concrete, hydrocarbons, leaching.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos de la industria petrolera que contaminan el suelo, se pueden desplazar subterráneamente por gravedad o capilaridad, por ello es necesario desarrollar procedimientos que impidan la movilidad hacia capas más profundas del terreno, especialmente en aquellos que puedan alcanzar la capa freática.

Una opción de remediación es la estabilización, que sirve para detener el movimiento o la lixiviación de los contaminantes. Esta técnica se emplea para prevenir o reducir significativamente la migración de los productos orgánicos e inorgánicos en suelos y aguas subterráneas (Ortiz Bernad *et al.* 2006).

Las técnicas de estabilización/solidificación, se realizan a través de procesos físicos y químicos, ya sea convirtiéndolos en formas menos solubles, tóxicas (estabilización) o encapsulando el material contaminado en una estructura sólida de gran integridad estructural (solidificación) (Suthersan, 1997). El término 'inmovilización' incluye métodos físicos y químicos tanto para solidificar como para estabilizar los residuos. (Wilson *et al.* 2002). La lixiviación puede ser definida como el proceso por el cual un componente del residuo es removido mecánica o químicamente incorporándose una solución, por el pasaje de un solvente como el agua (La Grega *et al.* 1996). Se pueden utilizar dos procedimientos de estabilización: métodos de tratamiento in-situ, que no requieren la remoción del suelo o métodos de tratamiento ex-situ, que requieren la remoción del residuo, o bien la excavación de los suelos (Sepúlveda, 2002).

Los suelos contaminados con bajos porcentajes de hidrocarburos derivados del petróleo, se pueden estabilizar si se los mezcla con cemento y obtener suelo-cemento, o además incorporarle arena y piedra para obtener mortero u hormigón. Hay que diferenciar del procedimiento llamado encapsulación, el cual se realiza utilizando silicatos. Se usa sílice para microencapsular hidrocarburos en una matriz de sílice impermeable, no porosa y amorfa. La estabilización mencionada es apropiada para ser utilizada en suelos que contienen residuos inorgánicos de metales pesados y bajos niveles de hidrocarburos, ya que las altas concentraciones de contaminantes petroleros en la matriz del suelo pueden interferir con los procesos de fragüe y ganancia de resistencia del cemento (Wiles, 1997).

Tanto la estabilización in-situ como ex-situ, son procedimientos de realización sencilla, llevados a cabo con equipos comúnmente disponibles en el mercado. Cuando el proceso de estabilización se lleva a cabo in-situ, es difícil llegar a una mezcla uniforme. El tratamiento ex-situ permite un mejor control, ya que el suelo es mezclado con cemento y agregados en una planta dosificadora.

El proceso de estabilización, usando una matriz de cemento para la disposición de residuos requiere del estudio del comportamiento del producto final, a través de la realización de ensayos físicos y químicos, para salvaguardar el medio

ambiente de la polución indeseable. El factor más importante es determinar si la técnica propuesta es efectiva en el tratamiento de una clase particular de residuo y la reducción en un corto o largo término de su lixiviación.

En el presente trabajo se estudió un caso particular de un suelo con hidrocarburos y metales pesados de la zona sur de la Patagonia Argentina (Provincia de Santa Cruz). Se utilizó un método "ex-situ" para la estabilización a través de la inclusión en matrices cementicias. Se evaluó el desempeño del material obtenido y el impacto en el medio ambiente.

Si los hidrocarburos y metales pesados presentes en el suelo en estudio quedan contenidos dentro de la matriz cementicia, ésta puede ser utilizada como base o sub-base en pavimentos destinados a tránsito o acopio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron dos materiales cementicios: morteros y hormigones, los cuales se proyectaron y evaluaron en dos etapas consecutivas. En la primera se analizó el comportamiento de las inclusiones en morteros y de acuerdo a los resultados obtenidos, se fijaron las pautas para continuar a una escala superior de aplicación en obras civiles como el hormigón.

En la elaboración de ambos materiales se utilizó cemento portland compuesto, proveniente de una fábrica de la provincia de Chubut. Se determinó la densidad absoluta (IRAM 1624) y el peso de la unidad de volumen suelta.

Se utilizó canto rodado como agregado grueso y arena natural como agregado fino, ambos provenientes de yacimientos ubicados en cercanías de los suelos a tratar. Se determinaron los siguientes parámetros: densidad a granel y porcentaje de vacíos (IRAM 1548), densidad relativa (IRAM 1520) y módulo de finura (IRAM 1627).

Los morteros y hormigones se elaboraron con agua desmineralizada.

Las características de los materiales utilizados en la elaboración de los morteros y los hormigones se indican en la Tabla 1 y la granulometría de la arena utilizada, en la Tabla 2.

El suelo incorporado como reemplazo del agregado fino proviene del sustrato de un repositorio de desechos de la industria petroquímica. Estos residuos contienen metales pesados (plomo, cromo, zinc, cobre, bario) e hidrocarburos. Los análisis químicos se realizaron en un laboratorio que cumple con la norma ISO 17205 y está acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación. Los resultados se detallan en la Tabla 3.

### Morteros cementicios

Se dosificaron diferentes morteros y se moldearon seis juegos de tres probetas prismáticas de 4x4x16 cm cada uno, siguiendo la metodología indicada en la norma IRAM 1622.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados.

Tipo	Cemento CPC40	Agregado fino Arena natural	Agregado grueso Canto rodado	Suelo c/hidrocarburos y metales pesados
Densidad	2950 kg/m <sup>3</sup>	---	---	1479 kg/m <sup>3</sup>
Densidad a granel	1400 kg/m <sup>3</sup>	1520 kg/m <sup>3</sup>	1770 kg/m <sup>3</sup>	973 kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa	---	2,59	2,66	---
% de vacíos	---	41	33	---
Módulo de finura	---	2,92	6,81	---
Humedad	---	---	---	15 %

Tabla 2. Granulometría de la arena.

Tamiz	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100
Acumulado que pasa (%)	100	99	88	59	38	20	4

Tabla 3. Análisis químico del suelo con hidrocarburos.

Parámetros	Método	Unidad	Contenidos
pH relación 1:1	EPA 9045 C	UpH	6,5
Conductividad de la pasta	SAMLA	µS/cm	312
Hg	EPA 7471 B	mg/kg	< 0,5 ND
Pb	EPA 3050 B/7420	mg/kg	< 20,0
Cd	EPA 3050 B/7130	mg/kg	< 10,0
Cr total	EPA 3050 B/7190	mg/kg	20,3
Zn	EPA 3050 B/7950	mg/kg	43,1
Cu	EPA 3050 B/7210	mg/kg	13,5
As	SM 3030 G/3500-As B	mg/kg	< 10,0
Ba	EPA 3050 B/7080	mg/kg	67,8
Se	EPA 3050 B/7740	mg/kg	< 2,0
Hidrocarburos totales	EPA 3550 C/418.1	mg/kg	29,3
Naftaleno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Acenaftileno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Acenafteno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Fluoreno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Fenantreno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Antraceno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Fluoranteno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Pireno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Benzo(a)antraceno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Criseno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Benzo(b)fluoranteno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Benzo(k)fluoranteno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Benzo(a)pireno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Dibenzo(a,b)antraceno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Benzo(g,h,i)perileno	EPA 3550 C/8310	mg/kg	< 0,1
Humedad	SM 2540 G	% p/p	10,5

Las muestras denominadas MP corresponden a los morteros patrón (sin reemplazo de arena por suelo). En las siguientes dosificaciones se reemplazó 10% (M10), 20% (M20), 40% (M40) y 50% (M50) en peso, de la arena por suelo con hidrocarburos. Siempre se mantuvo la relación agua/cemento  $a/c = 0,50$ , y la fluidez constante (ASTM C-230). Esto se realizó así para poder comparar los resultados obtenidos con los del patrón. Además, se moldeó otra batería de probetas con igual fluidez que las anteriores, pero con una relación  $a/c = 0,62$  y un reemplazo del 50% (M50\*), con la finalidad de observar el comportamiento cuando se usa un menor tenor de cemento. Las correspondientes dosificaciones se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Dosificaciones de los morteros.

Muestra	% suelo a/c	cemento (kg)	arena (kg)	suelo (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
MP	0% 0,50	501	1502	----	2253
M10	10% 0,50	544	1180	131	2127
M20	20% 0,50	554	965	241	2037
M40	40% 0,50	575	620	413	1895
M50	50% 0,50	580	485	485	1840
M50*	50% 0,62	485	504	504	1795

En la Figura 1 se muestra un conjunto de las probetas prismáticas con diferentes porcentajes de suelo.

Se estudió la evolución del fraguado de los morteros con distinto porcentaje de reemplazo, para evaluar la influencia del suelo con hidrocarburos, en el tiempo de principio y fin de fragüe (norma IRAM 1619).

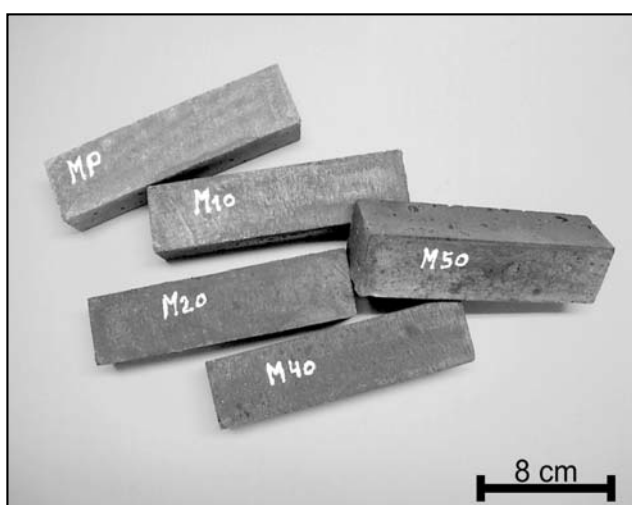


Figura 1. Conjunto de probetas prismáticas.

Se realizaron ensayos de flexión y compresión sobre las barras prismáticas de cada una de las diferentes dosificaciones, a la edad de 3; 7; 28; 45; 90 y 180 días (IRAM 1622).

Se realizó un análisis petrográfico con microscopio Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151A incorporada, monitor de alta resolución, procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1 y programas computarizados para tratamiento de imágenes.

Todos los morteros elaborados (patrón y con diferentes porcentajes de reemplazo con suelo con hidrocarburos), fueron sometidos a un proceso de lixiviación en autoclave (tipo Morrey) a 150°C y 150 atmósferas de presión, en agua destilada durante 24 hs. Finalizado este proceso, se recuperó el líquido para el análisis de los elementos en solución. Los análisis químicos se realizaron en Actlabs (Canadá) por ICP-OES.

Luego del ensayo, cada mortero fue lavado, llevado a peso constante y pesado. Además se controló el pH de la solución.

### Hormigones

Se dosificaron diferentes hormigones y se moldearon probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para cada uno de ellos (IRAM 1534).

Las muestras denominadas HP corresponden a los hormigones patrón (sin reemplazo de arena por suelo). En las siguientes dosificaciones se reemplazó 10% (H10), 20% (H20), 40% (H40) y 50% (H50) en peso, de la arena por suelo con hidrocarburos. Siempre se mantuvo la relación agua/cemento  $a/c = 0,50$  y un ámbito de consistencia entre 6 y 8 cm. Además, se moldeó otra batería de probetas con igual asentamiento que las anteriores, pero con una relación  $a/c = 0,62$  (HP\*) y un reemplazo del 50% (H50\*), con la finalidad de observar el comportamiento cuando se usa un menor tenor de cemento. Las correspondientes dosificaciones se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Dosificaciones de los hormigones.

Muestra	% suelo a/c	cemento (kg)	arena (kg)	suelo (kg)	Canto rodado (kg)
HP	P 0,50	330	819	----	1050
H10	10% 0,50	330	737	82	1050
H20	20% 0,50	330	655	164	1050
H40	40% 0,50	330	491	328	1050
H50	50% 0,50	330	410	410	1050
HP*	P 0,62	282	867	---	1050
H50*	50% 0,62	282	433	433	1050

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ensayos en morteros

La incorporación del suelo, en cualquiera de los porcentajes utilizados, aumentó el tiempo de principio y fin de fragüe con respecto al mortero patrón, en alrededor del 10%. Una vez iniciado el proceso de endurecimiento, éste continuó con

normalidad. En todas las muestras, el principio de fragüe se mantuvo aproximadamente en 2 horas y el fin de fragüe se extendió hasta 4 horas y 15 min.

Los resultados de los ensayos a flexión y compresión para todos los morteros, a las edades de 3, 7, 28, 45, 90 y 180 días, se detallan en las Tablas 6 y 7 y en las Figura 2 y 3, respectivamente.

Tabla 6. Módulo de rotura a flexión para todas las dosificaciones y diferentes edades.

Morteros	Módulo de rotura a flexión (MPa)					
	Edades (días)					
	3	7	28	45	90	180
MP	4,8	5,4	6,4	6,6	7,0	8,7
M10	4,4	4,7	5,6	5,9	6,6	7,2
M20	3,8	4,1	5,2	5,5	5,9	6,8
M40	3,0	3,6	4,6	5,2	5,6	6,3
M50	2,7	3,3	4,2	4,8	4,9	5,2
M50*	2,4	3,2	3,9	4,1	4,5	4,9

Tabla 7. Resistencia a compresión para todas las dosificaciones y diferentes edades.

Morteros	Resistencia a compresión (MPa)					
	Edades (días)					
	3	7	28	45	90	180
MP	22,5	27,7	41,1	42,4	43,4	47,5
M10	19,7	27,1	36,6	38,9	41,4	45,8
M20	16,1	22,8	30,3	33,2	33,7	41,5
M40	11,0	15,4	25,8	29,7	32,0	35,9
M50	10,7	15,1	22,1	26,2	26,9	35,4
M50*	10,5	15,0	16,3	20,0	24,1	27,4

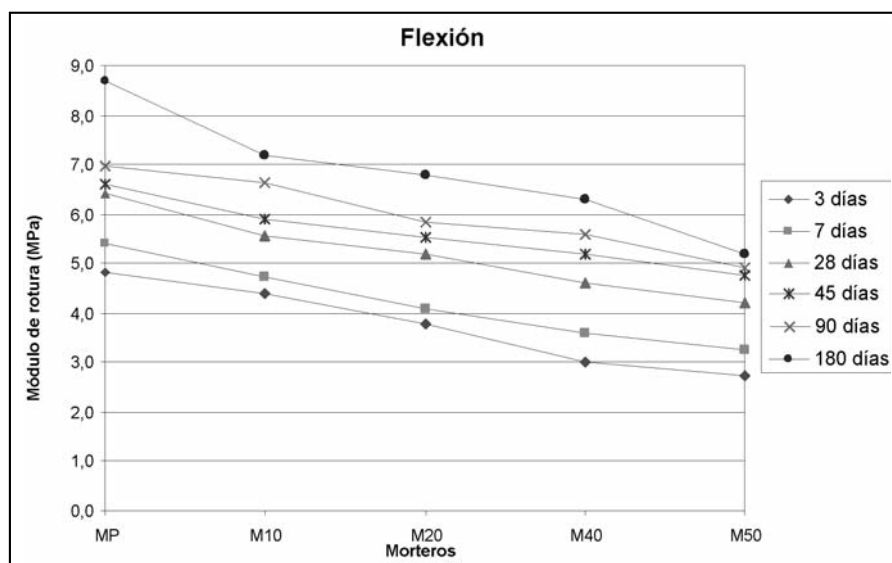


Figura 2. Módulo de rotura a flexión para todos los morteros y diferentes edades.



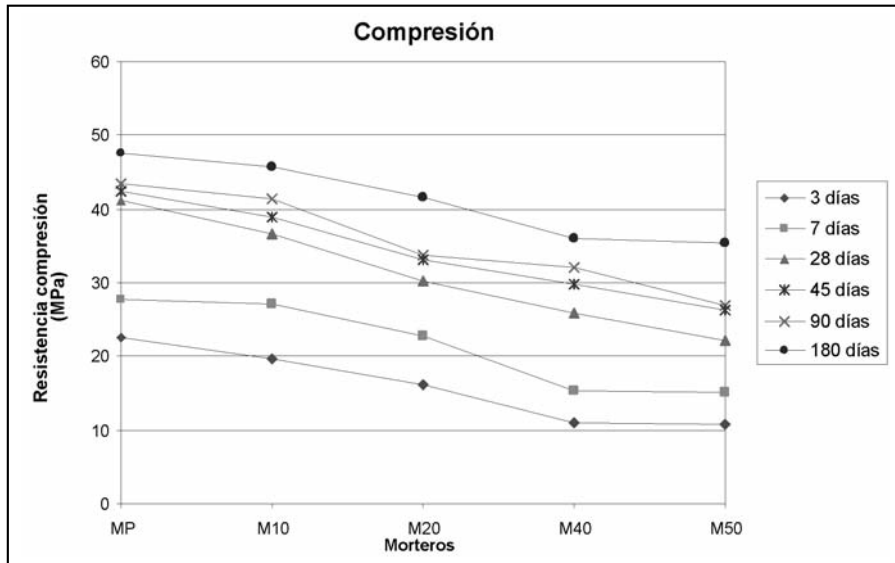


Figura 3. Resistencia a compresión para todos los morteros y diferentes edades.

Las resistencias en ensayos de flexión y compresión disminuyeron con el aumento del porcentaje de suelo incluido en la matriz, para todas las edades.

La ganancia de resistencia en el tiempo es más lenta a medida que es mayor el porcentaje de suelo incorporado. Los morteros ensayados a tres días dieron pérdidas del orden de 50% respecto al patrón, en cambio estas diferencias disminuyeron hasta el 25% a la edad de 180 días.

En la Figura 4 se observa la zona de fractura de las probetas ensayadas a flexión. La distribución de las partículas de suelo con hidrocarburos incluidas en la matriz cementicia, es homogénea.

**Ensayos en hormigones**

Los resultados de los ensayos a compresión para todos los hormigones, a las edades de 7, 28 y 45 días, se detallan en la Tabla 8 y en la Figura 5.

Tabla 8. Resistencia a compresión para todas las dosificaciones y diferentes edades.

Hormigones	Resistencia a compresión (MPa)		
	Edades (días)		
	7	28	45
<b>HP</b>	21,5	29,4	29,9
<b>H10</b>	19,5	26,7	28,6
<b>H20</b>	19,0	23,9	27,0
<b>H40</b>	18,2	22,4	25,3
<b>H50</b>	16,6	22,3	24,8
<b>HP*</b>	18,4	22,6	25,8
<b>H50*</b>	11,3	16,4	20,9

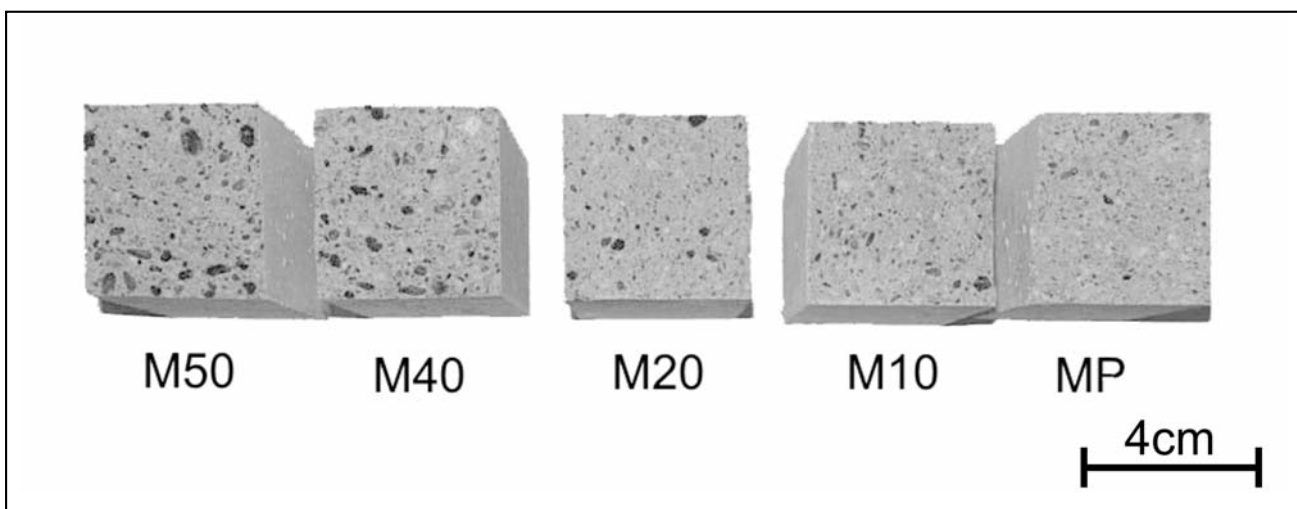


Figura 4. Morfología de la zona de fractura de los diferentes morteros.

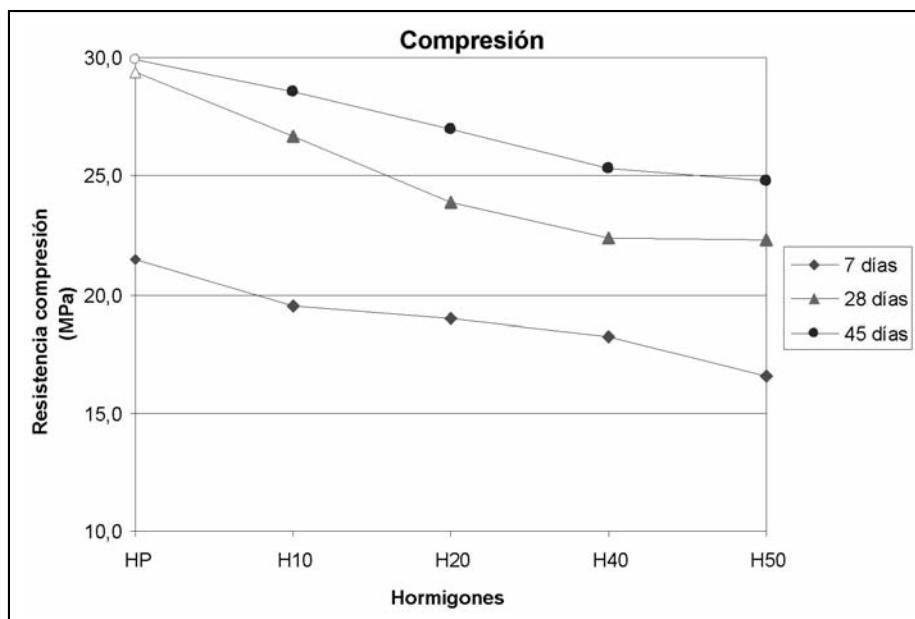


Figura 5. Resistencia a compresión para todos los hormigones y diferentes edades.

Del análisis de los resultados surge que la inclusión del suelo, generó una disminución de la resistencia a compresión en todas las edades de ensayo, mayor a medida que se aumentó el porcentaje de reemplazo. Esta pérdida es del 5% en el H10 y 17% en el H50.

En el hormigón, el volumen del mortero es aproximadamente del 60% y el resto lo constituye el agregado grueso, por lo tanto es razonable que los valores de pérdida de resistencia sean menores que en el mortero para la misma relación a/c y el mismo porcentaje de reemplazo.

Se observa que la pérdida de resistencia respecto al patrón a la edad de 28 días es superior que la registrada a 45 días, para ambas relaciones a/c = 0,50 y 0,62. Se hace notar que se utilizó cemento compuesto con puzolanas y que las resistencias finales se obtienen a mayores edades.

En la Figura 6 se observan partículas de suelo con hidrocarburos en la zona de fractura, producida en el ensayo de compresión de una probeta cilíndrica. Estas inclusiones permanecen adheridas a la matriz cementicia, lo que indica un buen vínculo en la zona de interfase con el mortero.

#### Petrografía

La arena utilizada está constituida principalmente por rocas volcánicas (más del 50%) entre las que predominan las andesíticas sobre las riolíticas. En menor proporción se identificaron: cuarzo, feldespatos, rocas graníticas, cuarcitas, vidrio volcánico y escasos piroxenos. En la Figura 7.a se muestra la composición de la arena (con luz paralela). La Figura 7.b es la misma con nicóles cruzados.

En la Figura 8.a se muestra la microestructura del mortero patrón. La Figura 8.b corresponde al M10. No se observaron variaciones en el mortero respecto del patrón. En el mortero M20, (Figura 8.c) si bien no hay modificaciones en la microestructura, aparecen algunas microfisuras muy finas y vacías. Se observa material carbonoso (opaco) atribuible a materia orgánica. En las

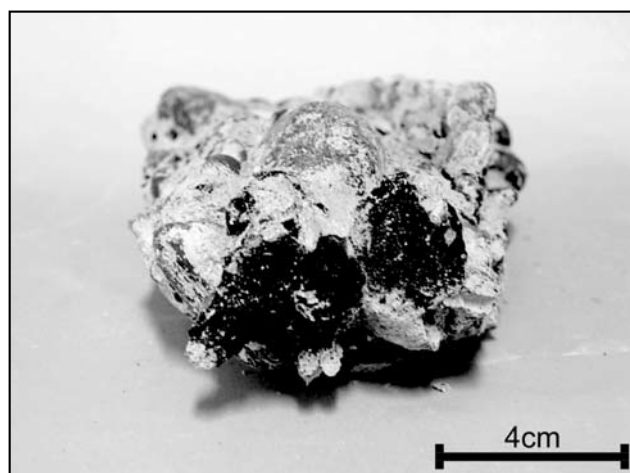


Figura 6. Aspecto de la zona de fractura de una probeta de hormigón.

muestras M40 (Figura 8.d) se observa un mayor contenido de partículas opacas correspondientes a la adición. Al incorporar 50% de material, se observa la textura del mortero modificada por la materia orgánica (Figura 8.e). Hay microfisuramiento que en algunos casos afecta las partículas del agregado fino (Figura 8.f).

#### Ensayos de lixiviación

En la Tabla 9 se indica la composición química de la solución de lixiviación analizada. No se detectó la presencia de As, Be, Bi, Cd, Co, Ag, Ce, Cr, Ba, Pb, Ni, P, Sn, Se, Ti, Tl, Y, W, Sb, Fe, Al.

En la solución luego del ensayo de lixiviación, se identificaron además de compuestos orgánicos, K, Si, Na, Ca, S y muy escasa cantidad de Mg, Mn, Cu, Li, Mo, Sr, U, V y Zn.

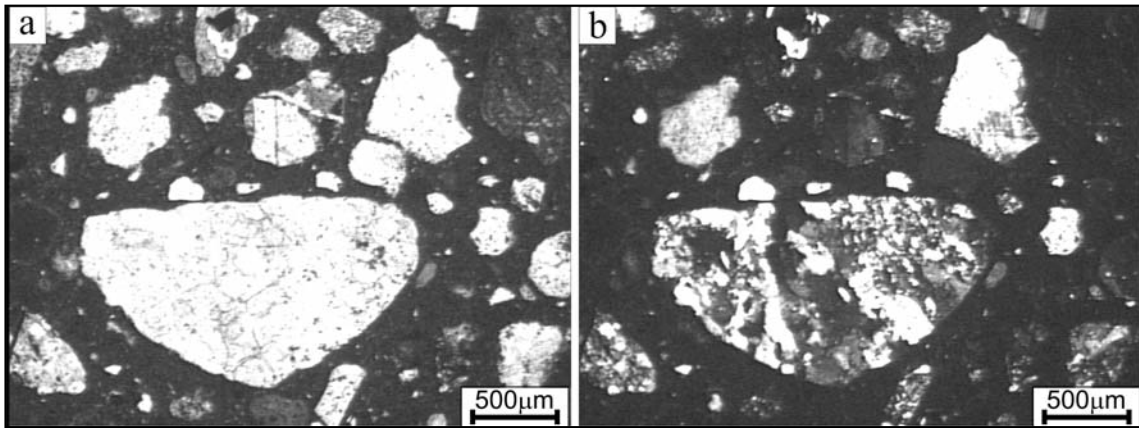


Figura 7. Composición mineralógica del agregado fino. a. Con luz paralela. b. Con nicoles cruzados.

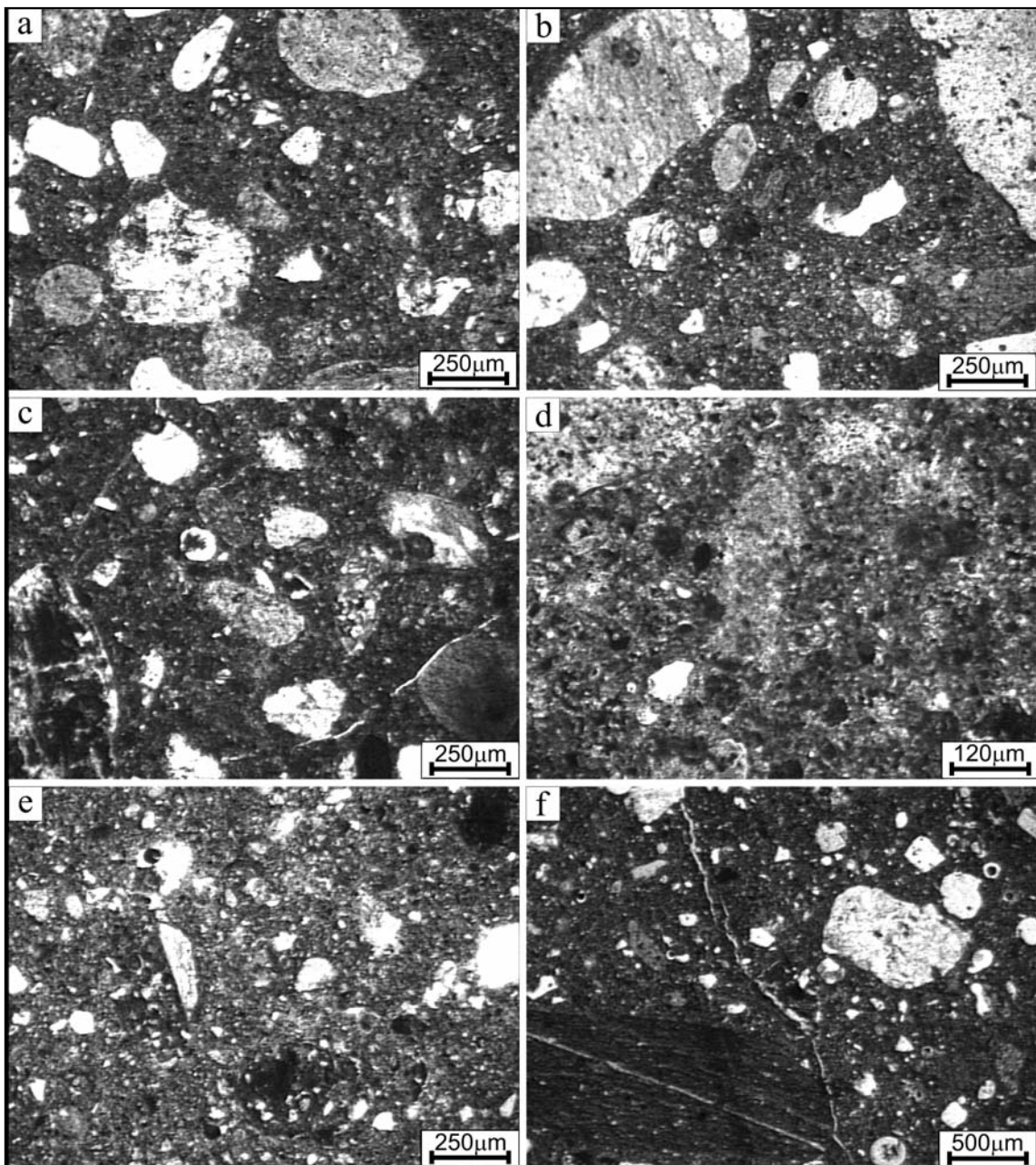


Figura 8. Petrografía de los morteros sobre secciones delgadas con luz paralela. a. Mortero patrón. b. M10. c. M20. d. M40. e. y f. M50.

Tabla 9. Análisis químicos de la solución luego del ensayo de lixiviación. NPOC: Carbono orgánico total.

	NPOC	K	Mg	Mn	Si	Ca	Cu	Li	Mo	Na	S	Sr	U	V	Zn
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l
<b>Límite de detección</b>	0,01	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	2	0,05	5	0,1	1	10	0,05	10	5
<b>MP</b>	0,00	2,6	0,2	0,00	169,1	4,5	0	0,00	16	75,2	31	40	0,16	240	< 5
<b>M10</b>	22,3	23,4	0,2	0,00	237,1	3,1	0	0,12	53	134,6	40	20	0,24	270	112
<b>M20</b>	77,8	18,4	0,4	0,10	208,1	2,7	3	0,15	26	130,6	41	10	0,23	220	20
<b>M40</b>	69,9	19,8	0,2	0,01	136,1	0,1	6	0,00	19	124,6	34	0	0,23	160	168
<b>M50</b>	163,0	34,3	0,2	0,01	137,1	1,2	5	0,00	23	203,6	49	20	0,30	40	6
<b>M50*</b>	142,0	33,0	0,1	0,00	178,1	1,0	8	0,10	19	150,6	41	30	0,25	30	5

Con excepción del V que disminuye a partir del 20% de adición, el contenido del resto de los elementos mencionados se incrementa con el contenido de suelo. Sin embargo para una adición del 50% el incremento en la relación agua/cemento disminuye el contenido de elementos lixiviables. El comportamiento del Zn es aleatorio.

En la Tabla 10 se muestran los resultados de la pérdida de peso luego del ensayo de lixiviación y el pH medido en la solución.

Tabla 10. Pérdida de peso y pH medido en la solución.

Muestra	Pérdida de peso (%)	pH
<b>MP</b>	1,71	7,5
<b>M10</b>	1,95	8,0
<b>M20</b>	2,59	8,0
<b>M40</b>	3,21	8,0
<b>M50</b>	3,32	7,8
<b>M50*</b>	4,63	7,5

A partir de los resultados de los ensayos de lixiviación se determinó un incremento en la pérdida de peso de los morteros con el aumento en el contenido de adición y de la relación a/c.

El pH de la solución luego de concluido el ensayo, se mantuvo en valores que oscilan entre 7,5 y 8.

### CONCLUSIONES

En todos los casos estudiados, la inclusión de suelo con hidrocarburos en los morteros, modificó levemente el principio y fin de fragüe.

Las resistencias mecánicas, tanto en morteros como en hormigones, disminuyeron para todas las edades, a medida que aumentó el porcentaje de suelo incluido en la matriz.

La ganancia de resistencia en el tiempo es más lenta a medida que es mayor el porcentaje de suelo incluido. Los morteros ensayados a tres días dieron pérdidas del orden de 50% respecto al patrón, en cambio estas diferencias disminuyeron hasta el 25% a la edad de 180 días.

De los estudios petrográficos realizados sobre cortes delgados de los morteros puede concluirse que si bien se observaron modificaciones en la microestructura a partir del 20% de adición, estas características no afectan su calidad y están principalmente relacionadas con la presencia de materia orgánica en la pasta cementicia.

A partir del 20% de adición se observó la aparición de microfisuras. Afectan solo a la pasta y se presentan vacías. En el mortero con 50% de reemplazo, en algunos casos, también se presentan afectadas las partículas del agregado.

A pesar de las rigurosas condiciones del ensayo de lixiviación, la pérdida de peso es poco significativa. La movilidad de los elementos mayoritarios, especialmente Ca y Mg, es muy baja, factor que podría atribuirse como una contribución a la inmovilización de los hidrocarburos.

A pesar que la inclusión del suelo produjo una disminución de la resistencia a compresión del hormigón, ésta puede considerarse aceptable y, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, el método propuesto es viable para la estabilización de los suelos analizados.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur, a la Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires y al CONICET por el apoyo brindado.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ASTM C230-08, 2008

Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.  
*American Society for Testing and Materials, 6 pp.*

IRAM 1520, 2002

Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 14 pp.*

IRAM 1534, 2004

Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 15 pp.*

IRAM 1548, 2003

Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 11 pp.*

IRAM 1619, 2006

Cemento. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 10 pp.*

IRAM 1622, 2006

Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 25 pp.*

IRAM 1624, 2005

Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 9 pp.*

IRAM 1627, 1997

Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones.  
*Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 23 pp.*

LA GREGA, M., BUCKINGHAM, P. EVANS, J., 1996,

Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos.  
*Mc Graw Hill, Vol II: 743-807, España.*

ORTIZ BERNAD, I., SANZ GARCÍA, J., DORADO VALIÑO, M., VILLAR FERNÁNDEZ, S., 2006,

Técnicas de recuperación de suelos contaminados.  
*Informe de vigilancia tecnológica. CITME, CEIM, Universidad de Alcalá, 108 pp, Madrid.*

SEPÚLVEDA, T., TREJO, J., 2002

Tecnologías de remediación para suelos contaminados.  
*62 pp, México.*

SUTHERSAN, S., 1997

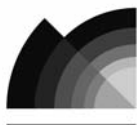
Remediation engineering: design concepts.  
*Ed. CRC Lewis Publishers, 362 pp, Boca Ratón.*

WILES, C., 1997

Solidification and stabilization technology.  
*Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal, Freeman, H. (Editor)  
2ª Ed. McGraw-Hill, chapter 7: 31-46, New York.*

WILSON, D., BALKAU, F., THURGOOD, M., 2002

Solidificación y Estabilización. Manual de Formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo.  
*Disponible en: <<http://www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu>>.*



## Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina

### *Soil amplifying effect on vulnerability to seismic hazard for Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina*

Abascal, Liliana <sup>1</sup>✉ - González Bonorino, Gustavo <sup>2</sup> - Bujalesky, Gustavo G. <sup>2</sup> - Coto, Claudio <sup>2</sup>

Recibido: 01 de Enero de 2012 • Aceptado: 26 de Marzo 2012

#### Resumen

*La Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina-Chile) está situada en un entorno de intensa actividad sísmica merced a la interacción de las placas tectónicas Antártica, Scotia y Sudamericana. Dos zonas sismotectónicas en esta región: la fosa de subducción en el extremo austral de Chile y la falla Magallanes-Fagnano, que cruza la isla de este a oeste, representan una amenaza sísmica para la población local. Considerando únicamente el sector argentino de la Tierra del Fuego, sin embargo, la mayor amenaza proviene de la falla Magallanes-Fagnano, la cual ha generado eventos sísmicos de magnitud  $M=8$  en tiempos históricos. Tolhuin, una pequeña población de 3000 habitantes en rápido crecimiento, está a 1 km de la traza de esta falla. Las construcciones de Tolhuin en gran parte no han tenido el control de sismorresistencia que requiere el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Por otra parte, la urbanización de Tolhuin apoya sobre un espeso paquete de sedimentos glaciogénicos del Cuaternario cuyas características geotécnicas sugieren que puede amplificar a más del doble una vibración sísmica, de acuerdo a una simulación con EERA (Equivalent-linear Earthquake Analyses). Aplicando la metodología Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters (RADIUS) propiciada por las Naciones Unidas, este estudio analiza la vulnerabilidad edilicia de Tolhuin ante un Terremoto Máximo Considerado de  $M=8,0$ . Los resultados muestran la importancia de tomar en cuenta la probable amplificación local por el efecto suelo. El presente trabajo constituye un primer esfuerzo concertado para dotar a la provincia argentina de Tierra del Fuego de herramientas cartográficas y conceptuales útiles para planificar el crecimiento urbano tomando en cuenta la prevención sísmica.*

**Palabras clave:** RADIUS, riesgo sísmico, vulnerabilidad edilicia, EERA.

#### Abstract

*The island of Tierra del Fuego (Argentina-Chile) lies in a region of intense seismic activity due to the interaction of the Antarctica, Scotia and South American tectonic plates. Two seismotectonic zones in this region: the subduction trench in southernmost Chile and the Magallanes-Fagnano fault, that*

<sup>1</sup> Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Río Grande, Tierra del Fuego.

✉ liliana\_abascal@hotmail.com

<sup>2</sup> CADIC-CONICET, Bernardo Houssay 200, Ushuaia, Tierra del Fuego

crosses the island from east to west, represent a seismic hazard for the island population. Focusing on the Argentine sector of Tierra del Fuego, however, the greater threat comes from the Magallanes-Fagnano fault, which has generated seismic events in historical times of magnitude  $M=8$ . Tolhuin, a small population of 3000 inhabitants undergoing fast growth, is located 1 km from the trace of the Magallanes-Fagnano fault. Buildings in Tolhuin largely have not had seismic safety controls required by the INPRES (the Argentine seismic building code regulator). In addition, the urbanization of Tolhuin rests on a thick package of Quaternary glacial sediments with the potential for amplifying seismic vibrations by a factor of more than 2, judging from a simulation with EERA (Equivalent-linear Earthquake Analyses). Applying the Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters (RADIUS) methodology, supported by the United Nations, this study analyses the seismic vulnerability of constructions in Tolhuin under the effect of a Maximum Considered Earthquake of magnitude  $M=8.0$ . The results show the importance of considering the probable local amplification through site effects. This study constitutes a first effort to provide the Argentine province of Tierra del Fuego with cartographic and conceptual tools useful in planning urban growth taking into consideration seismic hazard.

**Keywords:** RADIUS, seismic risk, building vulnerability, EERA.

## INTRODUCCIÓN

La Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina-Chile) se encuentra expuesta a la actividad sísmica originada por la interacción de las placas tectónicas Antártica, Scotia y Sudamericana (Figura 1). La Figura 2 muestra la distribución de 3993 eventos sísmicos con magnitudes entre 3,1 y 7,8, tomados de <http://www.iris.washington.edu/SeismicQuery/events.htm>. La geometría de las estructuras sismogénicas y la distribución de los epicentros permiten definir seis zonas sismotectónicas (Figura 2; Tabla 1). En el oeste, la placa Antártica subduce bajo la de Scotia en la fosa de Chile austral (zona 1, Figura 2). Esta zona de subducción termina hacia los 58°S, remplazada por la Zona de Fractura Shackleton (ZFS; zona 2) en la cual predomina el movimiento transcurrente sinistral. La ZFS interseca la Dorsal de Scotia Sur (DSS; zona 3), que marca el límite entre las placas Antártica y Scotia y muestra movimiento dominante transcurrente sinistral. En el este la generación de sismos está asociada con la dorsal centro-oceánica y la zona de subducción de las islas Sandwich del Sur (zona 4). Casi paralela a la DSS, hacia el norte corre la Dorsal Scotia Norte (zona 5), conformada por un conjunto de fallas, también de movimiento transcurrente sinistral (Pelayo y Wiens 1989). La porción subaérea de esta dorsal es la falla Magallanes-Fagnano, que atraviesa la Isla Grande de Tierra del Fuego de este a oeste, y que se distingue aquí como zona 6 (Figura 2; Winslow 1982; Lodolo et al. 2003).

La amenaza de un terremoto es inversamente proporcional a la distancia que separa el sitio de interés del epicentro sísmico. En términos muy generales, a una distancia de 100 a 200 km la onda sísmica ha perdido cerca del 90% de su energía inicial (e.g., Reiter 1991). Así, la gran distancia que separa las zonas 2, 3, 4 y 5 del sector argentino de Tierra del Fuego, permite descartarlas como potenciales contribuyentes a la amenaza sísmica para la población fueguina. La fosa de Chile austral está más cerca (zona 1, Figura 2). Allí, las placas Antártica y Scotia convergen a una velocidad de aproximadamente 1,1 cm/año (Pelayo y Wiens 1989), generando sismos de magnitudes generalmente inferiores a  $M=6$ , probablemente debido a la baja velocidad de convergencia (Barrientos 2007). Por ello esta zona no parece ser fuente de sismos potencialmente dañinos para la Tierra del Fuego argentina (González Bonorino et al. 2011). La falla Magallanes-Fagnano, por su parte, cruza el territorio argentino de la isla de Tierra del Fuego y tiene una actividad sísmica continua. Esta actividad está documentada por

los frecuentes sismos de baja magnitud con epicentros agrupados en proximidad a la traza de la falla (Febrer et al. 2001; Sabbione et al., 2007; Buffoni et al. 2009) y por el desplazamiento horizontal sinistral de entre 0,66 y 0,96 cm/año medido por métodos geodésicos (DeMetz 2010; Smalley et al. 2003).

Varios sismos fuertes tuvieron epicentros asociados con la traza de la falla Magallanes-Fagnano. El 1 de febrero de 1879 tuvo lugar un movimiento sísmico que se sintió en gran parte de la Patagonia austral. Martinic (2008), en base a una reconstrucción de la distribución de las intensidades sísmicas, estimó la magnitud de ese evento en  $M=8$ . En la era instrumental se registraron varios terremotos fuertes. El 13 de julio de 1930 ocurrió un evento con  $M=6$ ; el 17 de diciembre de 1949 hubo uno con  $M=7,8$  ('foreshock'), seguido pocas horas después por otro con  $M=7,8$  ('mainshock'), y días más tarde, el 30 de enero de 1950, por una réplica con  $M=7$ ; otro sismo importante ocurrió el 15 de junio de 1970 con  $M=7$  (Pelayo y Wiens 1989; Jaschek et al. 1982). Costa et al. (2006) estimaron que la falla Magallanes-Fagnano podría haber tenido desplazamientos horizontales de entre 4 y 5 metros a lo largo de cientos de kilómetros; tal movimiento debió dar origen a sismos fuertes. La falla Magallanes-Fagnano tiene ramificaciones; es un conjunto de fallas paralelas que distan entre sí unos pocos kilómetros, y no una traza única. La traza media de la falla Magallanes-Fagnano pasa a unos 80 km de Río Grande, unos 30 km de Ushuaia, y a menos de 1 km de Tolhuin, una pequeña población de 3000 habitantes (censo INDEC 2010) situada en la cabecera oriental del lago Fagnano (Figura 1).

El presente trabajo evalúa el riesgo sísmico para la estructura edilicia de Tolhuin, tomando en consideración la posible amplificación de la aceleración sísmica por causa del espeso sustrato sedimentario sobre el cual apoya la urbanización. Los resultados son aplicables a la planificación de la expansión urbana.

## CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y SISMOLÓGICO

El sector argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego cubre una superficie de 21.571 km<sup>2</sup>. La ruta nacional N° 3 es la única vía terrestre de comunicación entre Ushuaia, Tolhuin y Río Grande. Un corte en esa ruta dejaría incomunicados a estos centros urbanos. Ushuaia y Río Grande tienen servicio de aeropuerto internacional. La conexión por tierra con el continente es precaria, ya que depende de un servicio de ferry en territorio de, y administrado por, Chile.

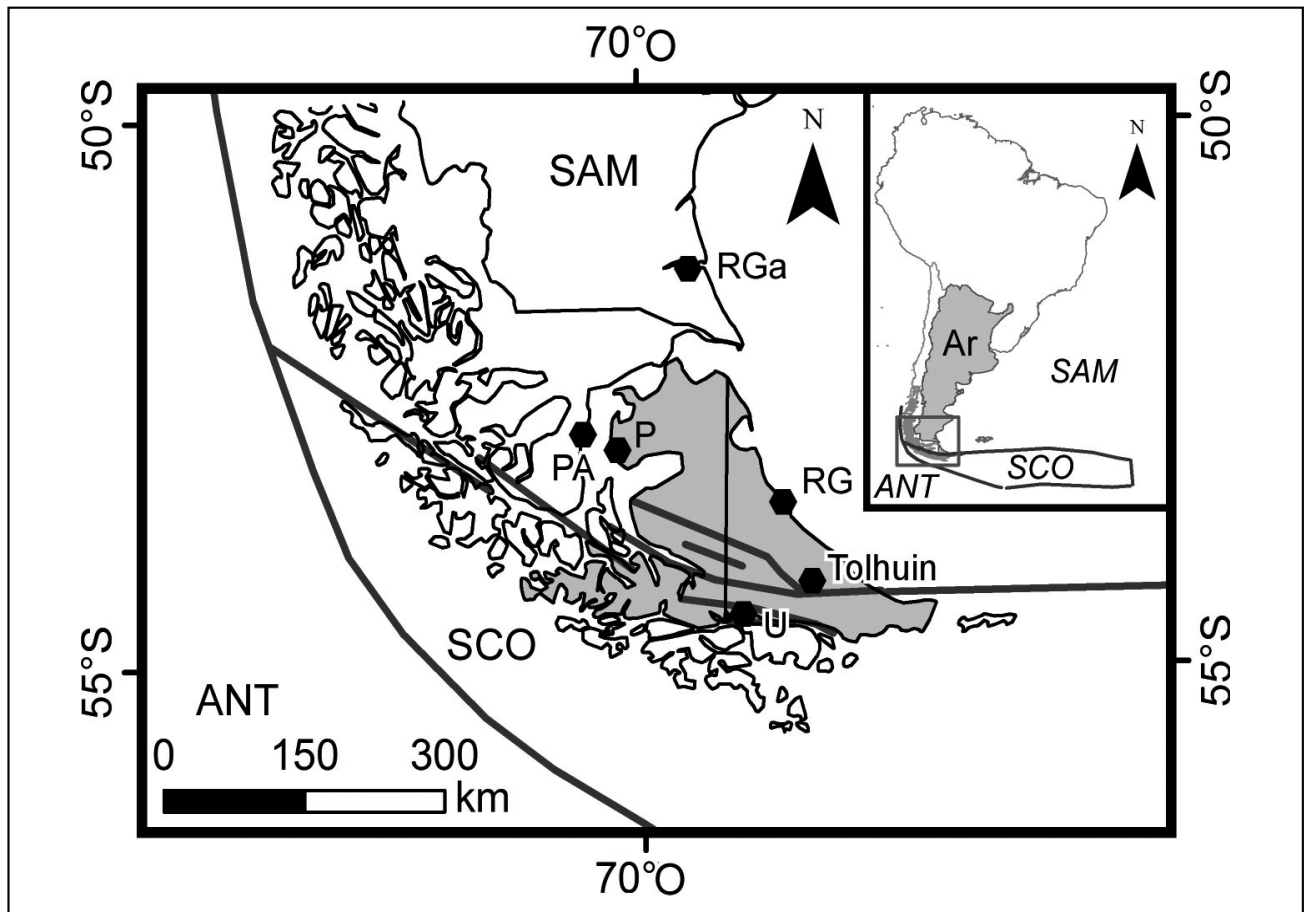


Figura 1. Mapas de ubicación a escalas continental (esquina superior derecha) y regional. Se indican las principales poblaciones y estructuras sismogénicas. La Isla Grande de Tierra del Fuego está grisada. Abreviaturas: poblaciones - RGa, Río Gallegos; RG, Río Grande; U, Ushuaia, en la Argentina, y PA, Punta Arenas y P, Porvenir, en Chile; placas tectónicas - SAM, Sudamericana; SCO, Scotia; ANT, Antártica.

Tabla 1. Zonas sismotectónicas.

Numeración	Designación	Ambiente geológico
1	fosa de Chile austral	subducción placa Antártica bajo Sudamericana
2	zona de Fractura Shackleton	límite placas Antártica y Scotia
3	dorsal Scotia Sur	límite placas Antártica y Scotia
4	dorsal Sandwich del Sur	límite placas Scotia y Antártica
5	dorsal de Scotia Norte	límite placas Scotia y Sudamericana
6	falla Fagnano-Magallanes	límite placas Sudamericana y Scotia

La conformación geográfica actual de Tierra del Fuego, con montañas en el sur y llanuras y mesetas en el norte, ha sido el resultado de una prolongada sedimentación marina y continental, seguida por deformación tectónica de los estratos depositados, y luego erosión de las cumbres produciendo nuevo detrito sedimentario, evolución que lleva ya más de 200 millones de años. La última gran glaciación, en el Cuaternario, dio lugar a erosión y sedimentación, principalmente glacial y glaci-fluvial, y al relleno de los bajos con turbales y depósitos fluviales. Estos depósitos recientes ocupan las cotas más bajas, comúnmente por debajo de 30 m s.n.m., y están alojados en surcos glaciarios exhondados en roca en el sector montañoso y

cubren gran parte del sector septentrional de la isla. Estos depósitos han sido el sustrato preferido para la urbanización de Río Grande y de Tolhuin, y de gran parte de la de Ushuaia.

Para los fines de la prevención sísmica a escala provincial, se discriminó el sustrato en roca, suelo firme y suelo blando (Figura 3). El suelo firme está conformado por mantos de arena limosa con rodados dispersos, colectivamente denominados drift glacial, acumulados como morenas en los márgenes del hielo y como till de alojamiento, y en este caso compactados por el peso del hielo. El espesor de estos mantos puede superar 100 m (Meglioli 1992). Por datos de la literatura un drift



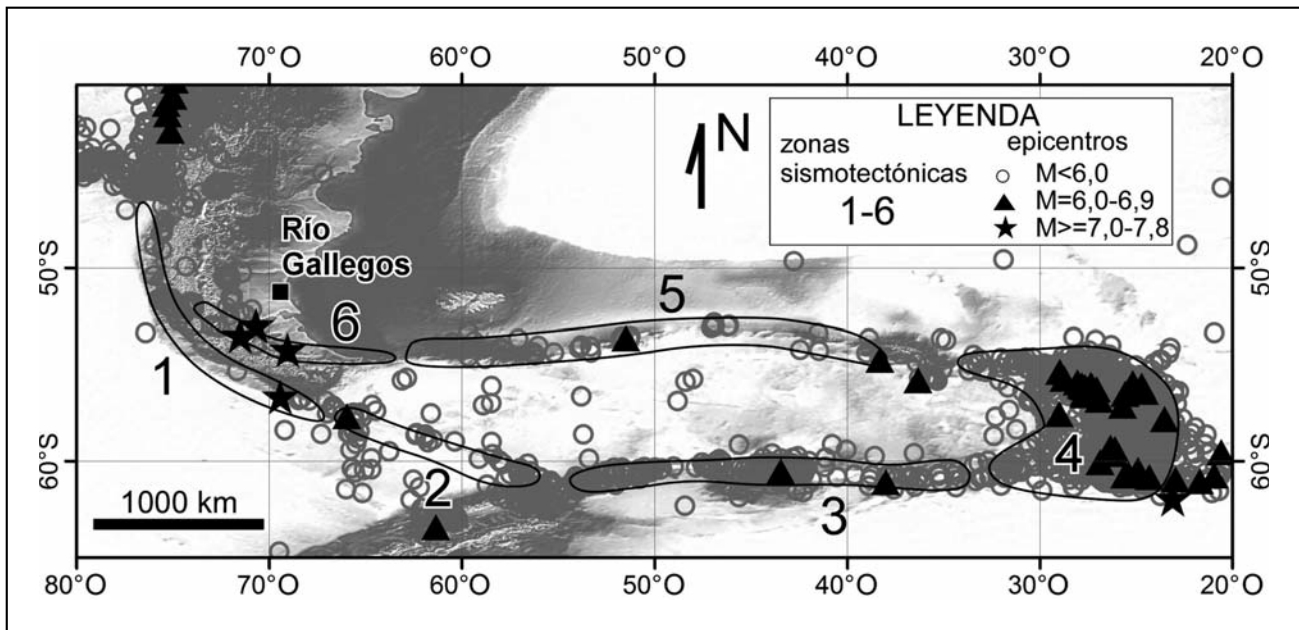


Figura 2. Distribución de epicentros en Patagonia y el arco de Scotia (base de datos IRIS <http://www.iris.washington.edu/SeismicQuery/events.htm>). Las réplicas ('aftershocks') fueron filtradas con la opción que da el formulario de SeismicQuery. El mapa regional de fondo es un subconjunto del mapa global de elevación y batimetría incluido en la distribución de ESRI ArcView 9. Se indican con números las seis zonas sismotectónicas identificadas.

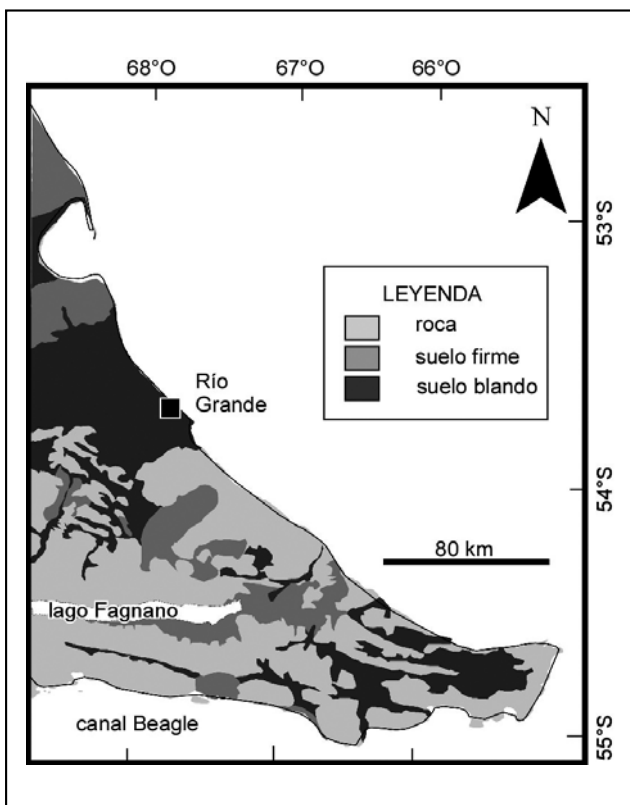


Figura 3. Tipos y distribución de suelos a escala provincial. Aproximadamente el 50% de la superficie de la Tierra del Fuego argentina, y casi todas las tierras bajas, están cubiertas por suelos firmes y blandos.

glacial suele tener velocidades de corte  $V_s \leq 450$  m/seg (e.g., Bradley et al. 1998; West 2002). Ensayos SPT en drift sumergido en la bahía Ushuaia dieron valores de N entre 20 y el rechazo (más de 50 golpes para penetrar 30 cm; Instituto Superior de Recursos Hídricos 1998; FÚNCOR 1997). La combinación de estos valores permite clasificar el drift como transicional entre suelo firme y muy firme (según la clasificación del National Earthquake Hazards Reduction Program; FEMA 2003). El suelo blando corresponde a limos y arcillas glacialustres y fluviales, y a depósitos de turba. Por datos de la literatura los suelos blandos, suelos tipo E (clasificación del NEHRP en FEMA 2003), pueden tener  $V_s < 180$  m/seg y valores de  $N < 15$ ; ensayos SPT locales tomados de informes inéditos del Instituto Provincial de la Vivienda de Tierra del Fuego y de consultores privados, compilados para este estudio, dieron una media de  $N=20$  para el suelo somero. La clasificación de los suelos a escala provincial tiene el propósito de definir la peligrosidad sísmica para construcciones que apoyen, o eventualmente puedan apoyarse en esos diferentes tipos de substrato.

#### ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA SÍSMICA CON LA DISTANCIA AL EPICENTRO

Entre 1997 y 1998 se llevó a cabo el proyecto SEPA (Seismic Experiment in Patagonia and Antarctica), con la instalación de cinco estaciones sismológicas en la Patagonia austral de Argentina y Chile. Empleando los registros de estas cinco estaciones temporarias, Lawrence y Wiens (2004) aplicaron inversión de ondas de cuerpo y Rayleigh para inferir la conformación del subsuelo. De acuerdo a este estudio Patagonia muestra un Moho bien definido entre 28 y 34 km de profundidad, y una capa sedimentaria de baja velocidad de espesor entre 0 y 4,3 km. Otra fuente de información sobre la corteza de Patagonia es el modelo CRUST 2.0, una compilación de 360 perfiles columnares que permiten visualizar variaciones globales en las propiedades de la corteza con una resolución de  $2^\circ \times 2^\circ$  (Bassin et al. 2000). De acuerdo al modelo CRUST 2.0 el espesor de la corteza en

Patagonia mide entre 20 y 40 km. Los valores compilados indican que la corteza en Tierra del Fuego tiene un espesor inferior al promedio continental, reflejando corteza joven y adelgazada tectónicamente (Febrer et al. 2001). Smalley et al. (2003) postularon que la falla Magallanes-Fagnano posiblemente esté sellada a una profundidad de aproximadamente 15 km. Buffoni et al. (2009) reconstruyeron las profundidades focales de sismos de baja magnitud probablemente asociados a la falla Magallanes-Fagnano y determinaron que la mayoría está a profundidades inferiores a los 10 km, hecho que concuerda con la conclusión de Smalley et al. (2003) de que la sismogénesis estaría confinada a los 15 km superiores de la corteza. La generación de sismos con hipocentros someros es típica de las fallas transformes y se asocia con el límite inferior de la corteza frágil y la condición comúnmente dúctil de la corteza inferior (cf., Gregg et al. 2006).

Una relación de atenuación de amplia difusión es la de Campbell (1997). Esta relación está basada en terremotos poco profundos con epicentros en la zona de subducción en el oeste de los Estados Unidos, con magnitudes entre 4 y 9,5, y con distancias al epicentro entre 0 y 100 km. De acuerdo con esta ecuación la aceleración horizontal decae por debajo de 0,1g (aproximadamente el límite superior de vibración sísmica dañina para una estructura edilicia) a los 100 km de distancia al epicentro (Figura 4).

#### AMENAZA SÍSMICA PROVINCIAL

Descartando las réplicas de 1949 y 1950, hubo tres terremotos con  $M > 6$  entre 1879 y 2011, o sea una recurrencia de 0,023 eventos por año. Adoptando un modelo de Poisson para los tres eventos no correlacionados se puede estimar la probabilidad de sismos con  $M > 6$  en los próximos cien años. La probabilidad de que no ocurra ningún sismo en tal lapso es menor al 10%. La probabilidad de que ocurra exactamente 1 sismo de  $M > 6$  alcanza un 30% en los próximos 50 años, para luego disminuir a medida que aumenta la probabilidad de que ocurra más de uno (Figura 5). En un estudio geotécnico orientado a la ampliación del puerto de Ushuaia se adoptó, para fines de prevención sísmica, un Terremoto Máximo Considerado de magnitud  $M = 8,5$  (Instituto Superior de Recursos Hídricos 1998). Este valor probablemente es demasiado elevado. Una compilación de terremotos con  $M > 7,0$ , generados por fallas transcurrentes, revela que este tipo de falla aparentemente no ha generado eventos de magnitud superior a  $M = 7,9$  (Tabla 2), en tanto que los sismos generados en zonas de subducción han alcanzado  $M = 9,5$  (e.g., Chile, 1960). Esta limitación se debe probablemente a la menor superficie de fricción por unidad de largo disponible en las fallas transcurrentes. Los registros históricos no garantizan, sin embargo, haber documentado la magnitud máxima posible de una falla. En el presente trabajo se adopta una magnitud  $M = 8,0$  para el Terremoto Máximo Considerado, un 2% superior a la mayor registrada por instrumento.

La combinación de los factores de amplificación del suelo con la ley de atenuación de la energía sísmica, permite generar un mapa de intensidades sísmicas suponiendo un epicentro y una magnitud conocidos del Terremoto Máximo Considerado. Para este estudio se supuso un epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano y sobre el límite con Chile (Figura 6). Tal ubicación es próxima al epicentro del primer sismo ocurrido en diciembre de 1949 ('foreshock'). La aceleración máxima horizontal (PGA, 'Peak Ground Acceleration') generada por la modelización fue transformada a la escala de intensidad de Mercalli Modificada (MMI) empleando la ecuación de Trifunac y Brady (1975):

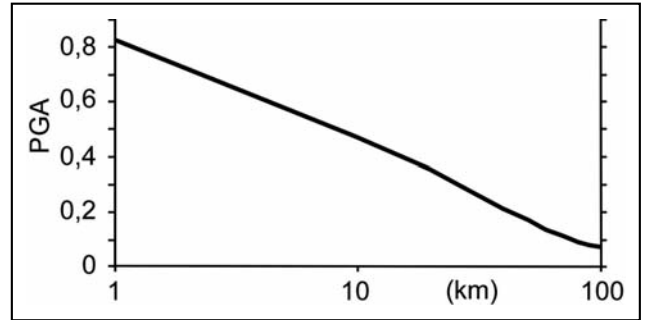


Figura 4. Disminución de la aceleración máxima horizontal (PGA) con la distancia al epicentro (basado en Campbell 1997).

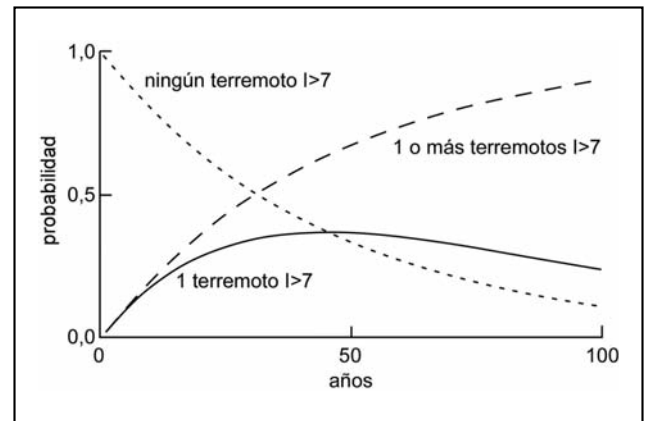


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de sismos con  $M > 7$  en Tierra del Fuego, empleando un modelo de Poisson.

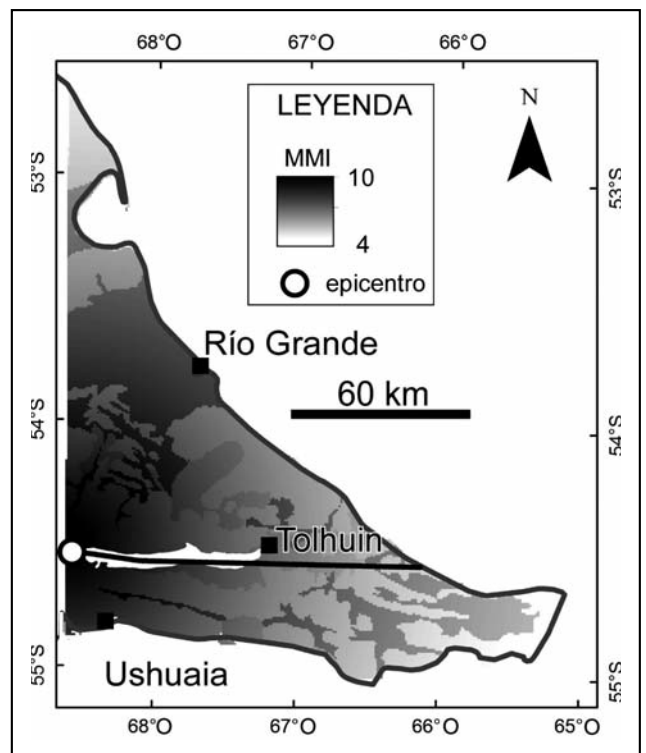


Figura 6. Distribución de la intensidad sísmica para un evento hipotético de  $M = 8,0$  con epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano en el límite con Chile (círculo blanco). MMI - escala de intensidad de Mercalli Modificada.

Tabla 2. Magnitudes de sismos históricos generados en fallas transcurrentes. Fuente: [http:// earthquake.usgs.gov](http://earthquake.usgs.gov)

Falla	Región	Año	Magnitud
Denali	Alaska, EEUU	1912	7,2
Denali	Alaska, EEUU	2002	7,9
Port-au-Prince	Haití	2010	7,0
Erzincan	Turquía	1939	7,8
Denizli	Turquía	1976	7,3
Izmit	Turquía	1999	7,6
Van	Turquía	2011	7,2
Sistema falla San Andreas			
Fort Tejon	California, EEUU	1857	7,9
Owens Valley	California, EEUU	1872	7,4
Kern County	California, EEUU	1952	7,3
Landers	California, EEUU	1992	7,3

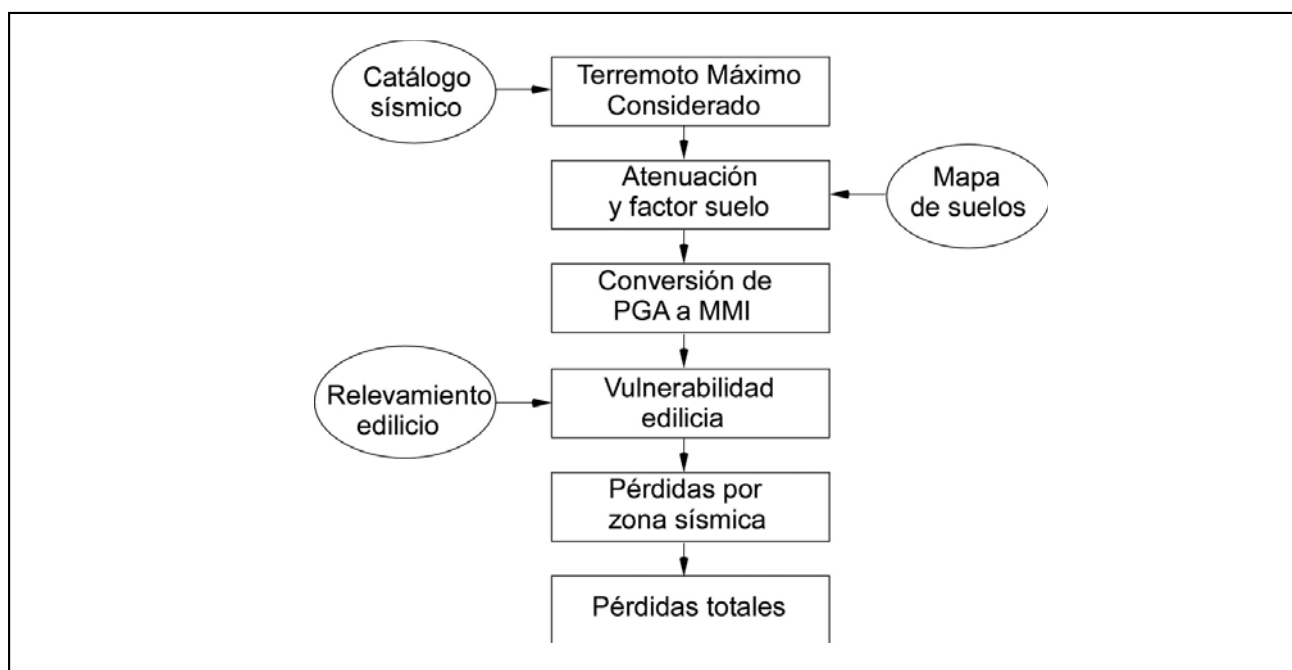


Figura 7. Diagrama de flujo del método RADIUS.

$$MMI = 3,333 * (\log(PGA * 980) - 0,014) \quad (1)$$

La intensidad se atenúa radialmente desde el epicentro pero muestra importantes anomalías locales en función del efecto amplificador del suelo (Figura 6; Abascal y González Bonorino 2008). En sustrato rocoso la intensidad decae de MMI=10 a MMI=7 en aproximadamente 50 km. Donde el suelo es firme a blando, en cambio, el mismo rango de disminución ocurre a unos 80 km del epicentro.

#### EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EDILICIO PARATOLHUIN

En esta primera evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin, la microzonificación ha sido trabajada en un nivel inter-

medio de detalle, analizando conjuntos de edificios y de suelos. El marco conceptual del estudio está basado en una iniciativa de las Naciones Unidas para lograr una mayor seguridad para los habitantes de ciudades implantadas en territorios susceptibles de actividad sísmica dañina. Esta iniciativa se ha denominado Método RADIUS, por Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic Disasters y se implementa como planilla MSEXcel. Este programa es gratuito y puede descargarse en: <http://www.geohaz.org/radius>. La aplicación del Método RADIUS comprende varias etapas (Figura 7).

Paso 1. Definir el escenario sísmico: epicentro, magnitud y profundidad de los posibles sismos. Paso 2. Calcular la atenuación sísmica, ya sea en base a fórmulas preexistentes, o a datos locales. Paso 3. Calcular la amplificación de la onda sísmica debido a condiciones locales de espesor y características geotécnicas del suelo. Paso 4. Convertir valores de aceleración

máxima del suelo (PGA) a valores de la escala Modificada de Mercalli (MMI). Paso 5. Aplicar funciones de vulnerabilidad según tipo de edificación.

Los pasos 1 y 2 se trataron al considerar la amenaza sísmica provincial. Al analizar la amenaza a escala urbana es necesario incorporar las nociones de vulnerabilidad y de riesgo. La vulnerabilidad involucra nociones físicas, sociales, y económicas. Riesgo es "La destrucción o pérdida esperada en base a la convolución de la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a esa amenaza. Matemáticamente puede ser expresado como la probabilidad de exceder un nivel determinado de daño económico y social, en un sitio específico y un período dado" (Spence 1990).

### RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO

La urbanización de Tolhuin está emplazada sobre depósitos glaciales diversos a cotas que varían entre 0 y 100 metros sobre el nivel del lago Fagnano (SEGEMAR 2002). La mayor parte de la planta urbana se encuentra por encima de la cota de 75 metros. La variación altitudinal hace que diversas zonas de la urbanización apoyen sobre sustratos diferentes, en función de la estratigrafía. La estratigrafía del sustrato se conoce merced a un pozo de 120 m de profundidad y un sondeo geoelectrico en el mismo sitio del pozo; la boca de pozo está a unos 100 metros por encima del nivel del lago, sobre la ruta n° 3 (CFI 1996). El techo del basamento hidrogeológico se encuentra a 200 m de profundidad y corresponde a estratos consolidados y tectónicamente deformados de arenisca y conglomerados de la Formación Río Claro (Terciario inferior; Caminos 1980) con valores de resistividad entre 30 y 40 ohm.m (Figura 9). Por encima, hasta los 105 m b.b.p. (bajo boca de pozo), domina material de muy baja resistividad (<50 ohm.m) que por exposiciones en superficie se identifica como limo arcilloso con abundantes rodados dispersos, o diamictita. Entre 64 y 105 m b.b.p. el registro geoelectrico indica una predominancia de arena. Entre 22 y 64 m b.b.p. alternan capas de arena, de diamictita y de arcilla. En el tramo superior la diamictita está cubierta por un manto de grava y arena con abundantes restos vegetales, de 2 a 4 m de espesor, interpretado como derrubio de falda.

La topografía de detalle del área urbanizada revela un perfil escalonado (Figura 10A). Una plataforma superior, donde se extiende el casco céntrico, corresponde al techo del depósito de derrubio. Una terraza a cotas entre 50 y 60 m sobre el nivel del lago podría estar incidiendo en el intervalo arenoso registrado en pozo a profundidades entre 64 y 105 m b.b.p. (CFI 1996). Otra terraza, más angosta, ocurre a cotas entre 10 y 20 m, labrada en diamictita, y ha sido interpretada como de origen lacustre (Figura 10B; SEGEMAR 2002).

La caracterización geotécnica de los suelos en Tolhuin se basó en ensayos de resistencia al corte (Standard Penetration Test, SPT, y California Bearing Ratio, CBR), análisis granulométricos, determinación de densidad, y medición del índice plástico. Los ensayos fueron hechos en aproximadamente una docena de calicatas, con profundidades entre 1,5 y 2,0 metros, y catorce pozos a lo largo de la ruta nacional n° 3 nueva, con profundidades entre 2,5 y 7 metros (Figura 8).

El ensayo CBR da la capacidad de carga del subrasante en caminos pavimentados. Cuanto mayor sea el valor de CBR mayor es la resistencia que ofrecerá el subrasante a la carga estática del pavimento y dinámica del tráfico vehicular. Se trata de un ensayo empírico que mide la resistencia a la penetración en el suelo de un cilindro de dimensiones estandarizadas. Seis ensayos dieron un promedio del índice CBR=20% (DNV 2004).

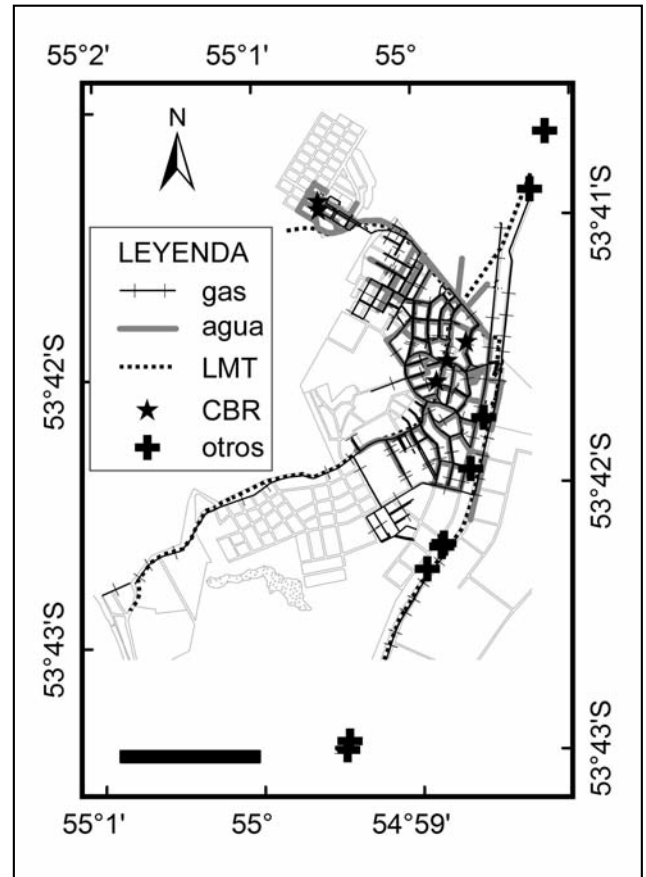


Figura 8. Plano de microzonificación sísmica para Tolhuin, con tendidos críticos y ubicación de sitios con ensayos geotécnicos. SEV8 indica el sitio del sondeo geoelectrico vertical y del pozo de 120 metros de profundidad. La planta urbana está grisada.

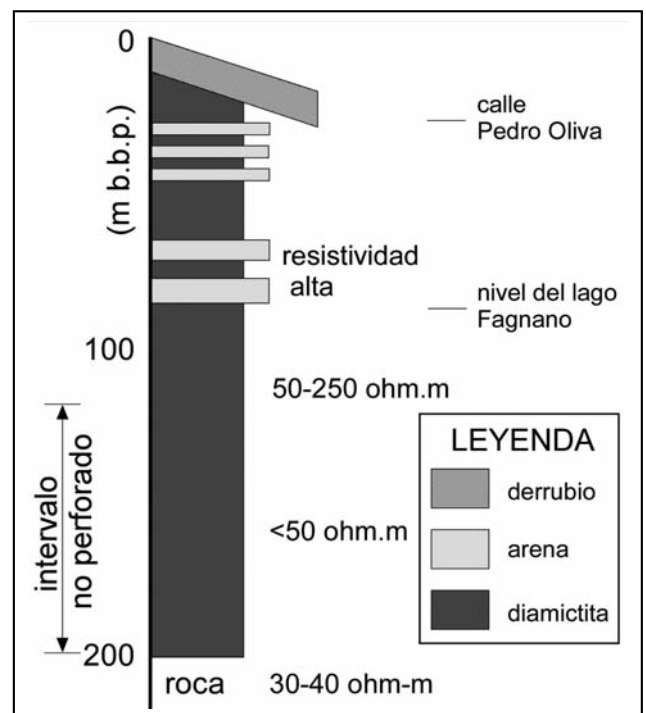


Figura 9. Columna estratigráfica del sustrato de Tolhuin. Basado en datos del pozo profundo (CFI 1996) y datos propios.

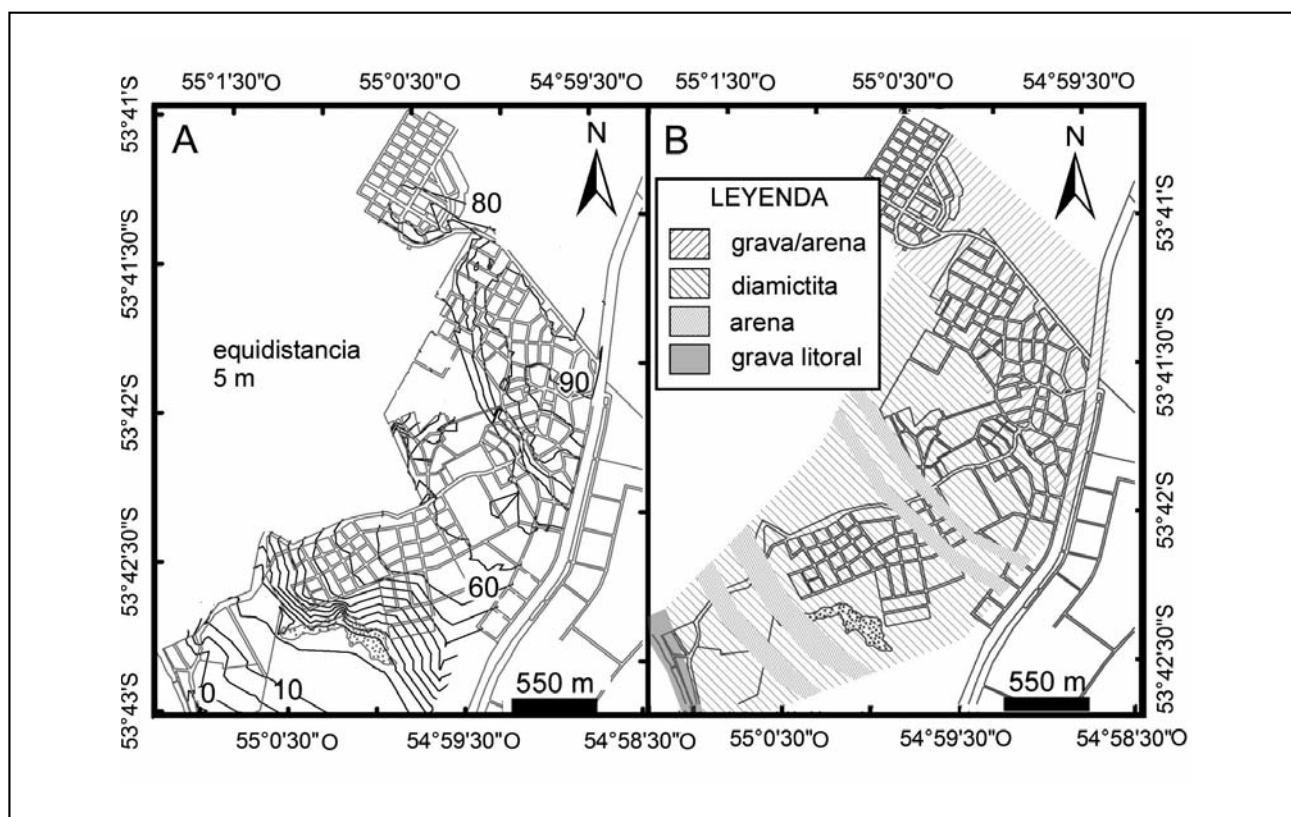


Figura 10. A) Curvas de nivel con equidistancia 5 metros para la zona urbana y suburbana de Tolhuin; las cotas están referidas al nivel del Lago Fagnano. B) Distribución de los principales tipos texturales de suelos sobre los que apoya la urbanización de Tolhuin.

Los ensayos de penetración por el método SPT siguieron las normas patrón en geotecnia. Estos ensayos fueron hechos in situ. Con el fin de independizar las mediciones de SPT de la profundidad a la que se toma la muestra, el valor de N se normaliza en función del esfuerzo efectivo de sobrecarga. Seis ensayos dieron una media de  $N=23$  (informes inéditos del Instituto Provincial de la Vivienda de Tierra del Fuego).

#### EFFECTO AMPLIFICADOR DEL SUELO

El factor de amplificación de un suelo, también denominado el efecto local, es la modificación en la amplitud de la vibración sísmica de un sitio sobre la superficie terrestre por efecto de la interposición de un espesor de sedimento poco consolidado. En términos generales, una onda sísmica aumenta de amplitud al atravesar una capa deformable en su trayectoria hacia la superficie. Para valores de la máxima aceleración horizontal (PGA) en roca inferiores a 0,1g, o <10% de la gravedad terrestre, aproximadamente, el efecto del suelo es despreciable. Para valores de PGA de hasta 0,5g, aproximadamente, una columna de suelo de más de unos 10 metros de espesor suele tener potencial para amplificar la aceleración sísmica. La amplificación puede resultar en valores de aceleración dos a tres veces superiores a los que se registrarían sobre un sustrato de roca dura. La mayor amplificación ocurre a la frecuencia natural del suelo, o frecuencia fundamental, con un período asociado que se denomina período característico del sitio, el cual depende de las condiciones geotécnicas y el espesor del suelo.

Si una edificación tiene un período natural similar al período natural del suelo sobre el cual apoya, el conjunto pue-

de entrar en resonancia y se incrementa la amenaza sísmica para la estructura edilicia. La respuesta de un edificio a una aceleración impuesta en su base está fuertemente controlada por la altura del edificio. En Tolhuin la casi totalidad de los edificios, tanto los públicos como los privados, son de una sola planta. El período de onda característico para tales construcciones puede estimarse por:

$$T=0,1N \quad (2)$$

donde N=número de pisos de la construcción. Así, pues, para Tolhuin,  $T=0,1$  segundos, y la frecuencia natural  $f_n=10$  Hertz.

El efecto del suelo en la aceleración máxima horizontal se estimó mediante el programa de computación EERA ('Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses'; Bardet et al. 2000; descarga gratuita en: <http://www.ce.memphis.edu/7137/eera.htm>). Este programa requiere el ingreso de un terremoto de diseño y de un perfil de suelo con propiedades geotécnicas que permitan calcular  $G/G_{max}$ , la relación de módulos dinámicos de corte ('dynamic shear moduli'). Como terremoto de diseño se empleó uno de magnitud 6,5, ocurrido en Loma Prieta, California, asociado a una zona de subducción. El módulo de elasticidad de la columna de suelo se obtuvo de los ensayos geotécnicos. Los valores de SPT y de CBR permiten aproximar valores de la velocidad de corte ( $V_s$ ) y con  $V_s$  estimar el módulo elástico del suelo. Existe una buena correlación estadística entre los valores del índice CBR y la velocidad de cor-

te (shear wave velocity), hasta alrededor de 400 m/seg (Rosyidi et al. 2006). La ecuación representativa de esta correlación es:

$$\text{CBR} = 0.0006 (V_s)^{1,99} \quad (3)$$

Existe también una moderada correlación entre los valores de SPT y de  $V_s$ , representada por la ecuación (Andrus et al. 2003):

$$V_s = 72,9 (N60)^{0,224} Z^{0,13} \quad (4)$$

donde Z es la profundidad de la muestra y N60 es el valor normalizado de SPT. Se obtuvieron valores de  $V_s$  entre 200 m/seg y de 224 m/seg, a partir de los promedios de CBR y de SPT, respectivamente. Estos valores de velocidad de corte pueden aplicarse al tramo somero del perfil, poco compactado. Para la diamictita compactada que aflora a lo largo del faldeo se adoptó  $V_s=450$  m/seg, tomado de Bradley et al. (1998). Las intercalaciones de arena en el tramo superior se agruparon en un único banco de 10 m de espesor, al cual se aplicó  $V_s=270$  m/seg. Los valores de  $V_s$  empleados en la simulación están indicados en la Figura 11A. Con estos datos se corrió una simulación con EERA sobre el tramo de 50 metros superiores de la columna del sustrato de Tolhuin. El resultado sugiere que la amplificación podría incrementar a más del doble la aceleración horizontal (Figura 11B). El valor máximo de aceleración es sensible al comportamiento de la intercalación de arena. La simulación permite concluir la conveniencia de mejorar el conocimiento de la estratigrafía y de las características geotécnicas de las distintas unidades del suelo.

#### Vulnerabilidad edilicia

La información sobre tendidos y edificios críticos, topografía y características geotécnicas de los suelos y sus espesores

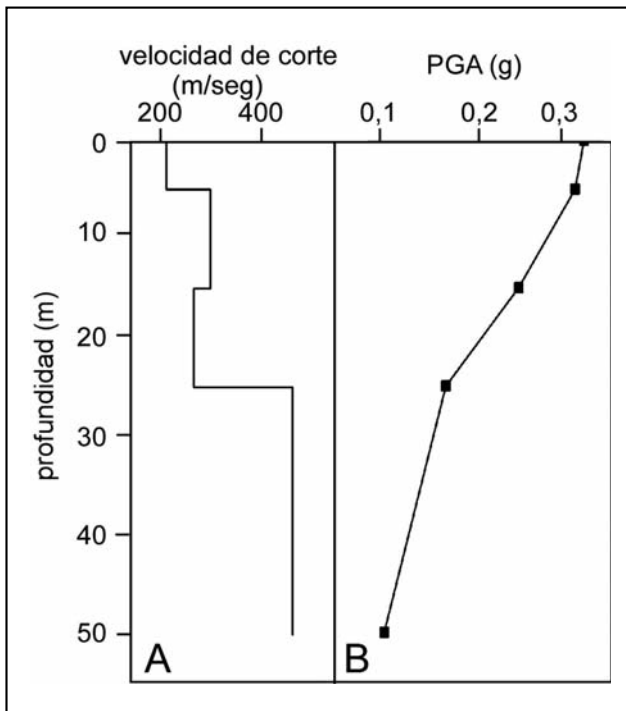


Figura 11. A) Velocidades de corte adoptadas para el perfil de suelo. B) Amplificación resultante de la simulación con el programa EERA.

tiene como objetivos: a) facilitar el acceso rápido a sitios de posibles cortes de suministro; b) prever, en base a informes de Defensa Civil o de vecinos, la posibilidad de daño a tendidos críticos; c) determinar con antelación a la emergencia la dificultad de acceso debida a la topografía; y d) prever la dificultad de acceso por falta de caminos abiertos para llegar a viviendas aisladas.

Tolhuin ha pasado de tener 245 viviendas en 1991 (censo INDEC) a tener cerca de 1000 viviendas actualmente, además de un centenar de edificaciones de diversos usos. En una primera aproximación, la condición estructural de las construcciones en Tolhuin se puede simplificar en dos grandes categorías. Por un lado están los edificios construidos por organismos estatales, tales como viviendas construidas por el Instituto Provincial de la Vivienda, y escuelas y algunos edificios de gobierno construidos por organismos bajo control de la Nación, los cuales cumplen con la norma de sismorresistencia implementada por el INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). Por otro lado está el resto de las edificaciones, mayoritariamente viviendas, comercios unifamiliares, y galpones de chapa, las cuales en gran parte fueron construidas sin el control profesional adecuado. Empleando esta simplificada clasificación edilicia, y adoptando los parámetros de amenaza sísmica presentados arriba, se simuló con RADIUS dos escenarios de desastre, respectivamente con epicentros a 80 km y a 10 km de Tolhuin. El escenario de sismo cercano dio  $\text{MMI}=8,8$  y estimó un daño edilicio, medido en número de edificios dañados, con una media de 33,9%. El escenario de sismo lejano se tradujo en  $\text{MMI}=6,0$  y un daño estructural medio estimado en 2,6%. La simulación con EERA dio un espectro de frecuencia de la pseudo-aceleración con período pico entre 0,5 y 0,6 seg. La moda del espectro difiere considerablemente del período fundamental de las edificaciones de una planta que dominan la urbanización de Tolhuin, lo cual disminuye el riesgo de daño edilicio extremo.

#### CONCLUSIONES

La combinación de los factores de amplificación del suelo con la ley de atenuación dio un mapa de intensidades sísmicas, suponiendo un epicentro y magnitud conocidos del Terremoto Máximo Considerado. En este estudio se supuso un epicentro sobre la falla Magallanes-Fagnano y sobre el límite con Chile. El resultado demuestra que la intensidad disminuye radialmente desde el epicentro pero se potencia en zonas cubiertas por suelos duros y blandos. En vista de la amplia distribución de este tipo de sustrato en Tierra del Fuego, sobre todo en cotas bajas, tentadoras para la expansión urbana, y del rápido crecimiento poblacional, que fuerza la expansión urbana, el efecto amplificador del suelo debe tenerse en cuenta. La práctica de definir normativas sobre sismorresistencia basándose únicamente en valores de PGA en roca puede ser inadecuada en Tierra del Fuego.

La ciudad de Tolhuin, situada a menos de 1 km de la traza de la falla Magallanes-Fagnano, es la población que tiene mayor riesgo de sufrir daños graves ante un evento sísmico por la cercanía a la fuente sísmogénica y por las características geotécnicas de los suelos. La aplicación del método RADIUS guió la sistematización de información útil en la valoración de la exposición al peligro sísmico del área urbana de Tolhuin. Los resultados de la simulación con EERA demuestran que el sustrato glaciogénico de Tolhuin puede amplificar a más del doble una vibración sísmica.

En Tolhuin, la edificación ejecutada por entes gubernamentales generalmente cumple con las normas sismorresistentes implementadas por el INPRES. Las edificaciones de particulares, mayormente viviendas familiares, en cambio, en muchos casos no han estado sujetas a un control estructural riguroso. Los resultados de este estudio enfatizan la necesidad de realizar campañas sostenidas de concientización acerca de la conveniencia de construir según normas sismorresistentes, adecuadas para Tierra del Fuego, y trabajar en la definición de un plan de prevención sísmica que proteja la vida y los bienes materiales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al COFECYT (Consejo Federal de Ciencia y Tecnología) por los fondos aportados a través de la convocatoria PFIP-Convenio N° 063 para el desarrollo de la investigación. También agradecemos y destacamos la colaboración de oficinas públicas y empresas al proporcionar información valiosa para la ejecución de este trabajo. Asimismo agradecemos a los árbitros de ASAGAI por los comentarios constructivos que ayudaron a mejorar el manuscrito.

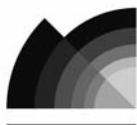
## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABASCAL, L. DEL V. Y G. GONZÁLEZ-BONORINO, 2008.  
Seismic risk associated with the Magallanes-Fagnano continental transform fault, Tierra del Fuego, southern Argentina. *7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts*, p. 13-16.
- ANDRUS, R.D., J. ZHANG, B.S. ELLIS Y C.H. JUANG, 2003.  
Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis. *South Carolina Department of Transportation, SC-DOT Research Project No. 623, Report N° FHWA-SC-03-07*.
- BARDET, J.P., K. ICHII Y C.H. LIN, 2000.  
EERA - A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. *Department of Civil Engineering, University of California, Los Angeles, 37 pp*.
- BARRIENTOS, S.E., 2007.  
Earthquakes in Chile. En Moreno, T. y W. Gibbons (eds.) *The geology of Chile. The Geological Society of London, London, p. 263-289*.
- BASSIN, C., G. LASKE Y G. MASTERS, 2000.  
The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *EOS Transactions AGU. Volume 81, F897*.
- BRADLEY J.C., Z. HAJNAL Y A. PRUGGER, 1998.  
Shear-wave studies in glacial till. *Geophysics. Volume 63: 1273-1284*.
- BUFFONI, C., N.C. SABBIONE, G. CONNON Y J.L. HORMAECHEA, 2009.  
Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas. *Geoacta. Volume 34:75-86, Buenos Aires*.
- CAMINOS, R., 1980.  
Cordillera fueguina. *En Geología regional argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Volumen 2: 1463-1501*.
- CAMPBELL, K.W. 1997.  
Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters. Volumen 68:154-179*.
- CFI, 1996.  
Estudio sobre provisión de agua para la Comuna de Tolhuin. *Programa de Desarrollo de Pequeñas Comunidades, Consejo Federal de Inversiones, 17 p*.
- COSTA, C.H., R. SMALLEY, D. SCHWARTZ, H. STENNER, M. ELLIS, E. AHUMADA Y M.-S. VELASCO, 2006.  
Preliminary seismological observations at an onshore transform boundary: The Magallanes-Fagnano Fault, Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina. Volumen 61: 647-657, Buenos Aires*.
- DEMETS, C., R.G. GORDON Y D.F. ARGUS, 2010.  
Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International. Volumen 181:1-80. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x*.
- DNV, 2004.  
Informe de Ingeniería, IIIa2. Capítulo 1, Suelos y materiales. Ruta Khamy-Kosobo. *Dirección Nacional de Vialidad, 78 p., Buenos Aires*
- FEBRER, J.M., M.P. PLASENCIA Y N.C. SABBIONE, 2001.  
Local and regional seismicity from Ushuaia broadband station observations (Tierra del Fuego). *Terra Antarctica. Volume 8: 35-40*.

- FEMA, 2003.  
NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450).  
*Part 1: Provisions. National Institute of Building Sciences, 340 pp.*
- FUNCOR, 1997.  
Estudio de suelos. Ampliación muelle comercial. Puerto Ushuaia, provincia de Tierra del Fuego.  
*Dirección Provincial de Puertos, 76 p.*
- GONZÁLEZ BONORINO, G., V. RINALDI, L. DEL V. ABASCAL, P. ALVARADO, G.G. BUJALESKY Y A. GÜELL, 2012.  
Holocene paleoseismicity in southern Patagonia (Argentina-Chile; 52°-55°S); the role of the Magallanes-Fagnano transform fault.  
*Journal of Natural Hazards. Volumen 61: 337-349.*
- GREGG, P.M., J. LIN Y D.K. SMITH, 2006.  
Segmentation of transform systems on the East Pacific Rise: Implications for earthquake processes at fast-slipping oceanic transform faults.  
*Geology. Volumen 34: 289-292.*
- INSTITUTO SUPERIOR DE RECURSOS HIDRICOS, 1998.  
Ampliación del puerto de Ushuaia, Tierra del Fuego.  
*Informe Técnico Final, Documento I, Memorias Técnicas, 104 pp. Córdoba.*
- JASCHEK, E., N. SABBIONE Y P. SIERRA, 1982.  
Reubicación de sismos localizados en territorio argentino (1920-1963).  
*Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, Serie Geofísica. Volumen XI, No 1, 79 pp.*
- LAWRENCE, J.F. Y D.A. WIENS, 2004.  
Combined receiver-function and surface wave phase-velocity inversion using a niching genetic algorithm: application to Patagonia.  
*Bulletin of the Seismological Society of America. Volumen 94: 977-987.*
- LODOLO, E., M. MENICETTI, R. BARTOLE, Z. BEN AVRAHAM, A. TASSONE Y H. LIPPAI, 2003.  
Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America).  
*Tectonics. Volumen 22(6), 1076, DOI: 10.1029/2003TC001500.*
- MARTIN, A., 1990.  
Hacia una nueva regionalización y cálculo de peligro sísmico en Chile.  
*Tesis, Universidad de Chile, Santiago, 207 pp.*
- MARTINIC, M., 2008.  
Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia austral y la Tierra del Fuego.  
*Magallania. Volumen 36: 5-18.*
- MEGLIOLI, A., 1992.  
Glacial geology and chronology of southernmost Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina and Chile.  
*Tesis. Lehigh University, 216 pp., Nueva York.*
- PELAYO, A. Y D. WIENS, 1989.  
Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia sea region.  
*Journal of Geophysics Research. Volumen 94: 7293-7320.*
- REITER, L., 1991.  
Earthquake hazard analysis.  
*Columbia University Press, 254 pp., Nueva York.*
- ROSYIDI, S.A., K.A.M. NAYAN, M.R. TAHA Y A. ISMAIL, 2006.  
Estimating G-max & field CBR of soil subgrade using a seismic method.  
<http://www.NDT.net>. Volumen 11, No.6.
- SABBIONE, N., G. CONNON, J.L. HORMAECHEA Y M. ROSA, 2007.  
Estudio de sismicidad en la provincia de Tierra del fuego, Argentina.  
*Geoacta. Volumen 32: 41-50.*
- SEGEMAR, 2002.  
Provincia de Tierra del Fuego - Condiciones geotécnicas. Subárea este del lago Fagnano.  
<http://www.mineria.gov.ar/estudios/lirn/tierradelfuegot-6zona.asp#m2>.
- SMALLEY, R., JR., E. KENDRICK, M.G. BEVIS, I.W.D. DALZIEL, F. TAYLOR, E. LAURÍA, R. BARRIGA, G. CASASSA, E. OLIVERO Y E. PIANA, 2003.  
Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia-South America plate boundary in eastern Tierra del Fuego.  
*Geochemistry Geophysics Geosystems. Volumen 4: 1-19.*



- SPENCE, R.J.S., 1990.  
Seismic risk modeling - A review of methods.  
*Contribution to Verso il New Planning, University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban studies, 155 pp., Cambridge.*
- TRIFUNAC, M.D. Y A.G. BRADY, 1975.  
On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of the recorded ground motion.  
*Bulletin, Seismological Society of America. Volumen 65: 103-145.*
- WEST, T.R., 2002.  
Subsurface investigations of several glacial successions related to engineering construction.  
*Proceedings of the Indiana Academy of Science, Illinois, 15 p.*
- WINSLOW, M.A., 1982.  
The structural evolution of the Magallanes Basin and neotectonics in the southernmost Andes.  
*En Craddock, C. (ed.) Antarctic Geoscience. I.U.G.S., Series B(4): 143-154.*



## Evaluación de la peligrosidad de flujos rápidos del volcán Lanín (Neuquén, Argentina)

### *Hazard assessment of rapid flow slides at Lanín volcano (Neuquén, Argentina)*

Salminci, José G. <sup>1</sup>✉ - Malagnino, Eduardo C.

Recibido: 09 de Mayo de 2011 • Aceptado: 10 de Abril 2012

#### Resumen

*La zona que comprende al volcán Lanín, ubicado entre los lagos Tromen y Huechulafquen, presenta una serie de peligros geológicos, entre los cuales se destacan los relacionados con la estabilidad de pendientes.*

*El objetivo del presente trabajo consistió en una evaluación cualitativa y zonificación de la peligrosidad, la vulnerabilidad y el riesgo geológico, en función de los factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa y de los elementos antrópicos bajo riesgo.*

*Particularmente, se ha estudiado con mayor detalle las situaciones de riesgo generadas por flujos rápidos, debido a que constituyen los procesos geológicos más relevantes por la amenaza que representan.*

*Se ha obtenido como resultado una zonificación correspondiente a diversos grados de peligrosidad a los flujos rápidos, vulnerabilidad y riesgo, representada en una serie de mapas temáticos. Sobre la base de dicha información, se sugiere la relocalización de diversas obras de infraestructura.*

**Palabras clave:** *volcán Lanín, peligrosidad geológica, flujos rápidos.*

#### Abstract

*The area comprised by Lanín volcano, located between Tromen and Huechulafquen lakes, posit a series of geological hazards of which the most important is slope instability.*

*The aim of this work is to perform a qualitative evaluation and a zonification of hazard, vulnerability and geological risk considering the conditioning and unleashing factors of mass wasting and anthropic elements in danger.*

*Risk situations created by rapid flows were studied in detail since they are the most outstanding geomorphologic processes due to the threaten they constitute.*

*As a result, several thematic maps representing a zonification corresponding to distinct hazard degrees of rapid flow, vulnerability and risk were obtained. On the basis of this information it is suggested to relocate several infrastructure works.*

**Keywords:** *Lanín volcano, hazard, rapid flows.*

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires  
Ciudad Universitaria Pab II - CP 1428  
Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

✉ jsalminci@gl.fcen.uba.ar

## INTRODUCCIÓN

La estructura volcánica del Lanín, ubicado dentro del Parque Nacional homónimo en la región sur de la provincia de Neuquén, presenta condiciones que favorecen el desarrollo de flujos rápidos, dadas por el fuerte gradiente topográfico de sus pendientes y la inestabilidad del material volcánico re trabaja do por la acción glaciaria que las componen. A su vez, los grandes volúmenes de agua que periódicamente se desplazan sobre este material, como resultado de la suma de la ablación de los glaciares, de la nieve acumulada y de las intensas precipitaciones que estacionalmente tienen ocurrencia en esta comarca, contribuyen a esta situación de inestabilidad de pendientes.

En este contexto, si bien la presencia de poblaciones humanas y de infraestructura no es de gran magnitud, la zona se caracteriza por el reciente crecimiento de emprendimientos turísticos, la existencia de caminos viales, la presencia de estancias ganaderas, poblaciones indígenas, puestos de Gendarmería Nacional y de Parques Nacionales que constituyen los elementos bajo riesgo.

Los trabajos geológicos recientes realizados en la región corresponden a *Salminci (2007)* y *Mancino (2007)* los cuales basan sus estudios en la determinación de la peligrosidad geológica y a *Lara (2003, 2004)* el cual desarrolla estudios geológicos y volcanológicos en el área.

A partir del análisis geológico se definieron zonas con distinto grado de riesgo, lo que permitió obtener una cartografía temática básica para la planificación y el desarrollo de futuras actividades humanas en el ámbito de influencia del volcán Lanín, minimizando los perjuicios que puedan llegar a ocasionar la ocurrencia de catástrofes naturales.

## UBICACIÓN

El área estudiada se encuentra dentro del Parque Nacional Lanín, departamento de Huiliches, provincia de Neuquén (Figura 1).

La región está comprendida, de norte a sur, entre la margen sur del lago Tromen hasta la margen norte del Huechulafquen incluyendo así al volcán Lanín. Emplazada en la Cordillera Principal Neuquina, está situada sobre el límite internacional con Chile.

Se accede a la comarca desde San Martín de los Andes a través de la ruta nacional N° 234 la cual empalma con las rutas provinciales N° 60 y N° 61.

## MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos de Peligrosidad, Vulnerabilidad y Riesgo definidos en el reporte de la reunión "Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad" de La United Nations Disaster Relief Organization (*UNDRO 1979*) en conjunto con la United Nations Educational Scientific and Cultural Organization se exponen a continuación:

*Peligrosidad (H)*, definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

*Vulnerabilidad (V)*, grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

*Riesgo específico (RS)*, grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la Amenaza y la Vulnerabilidad.

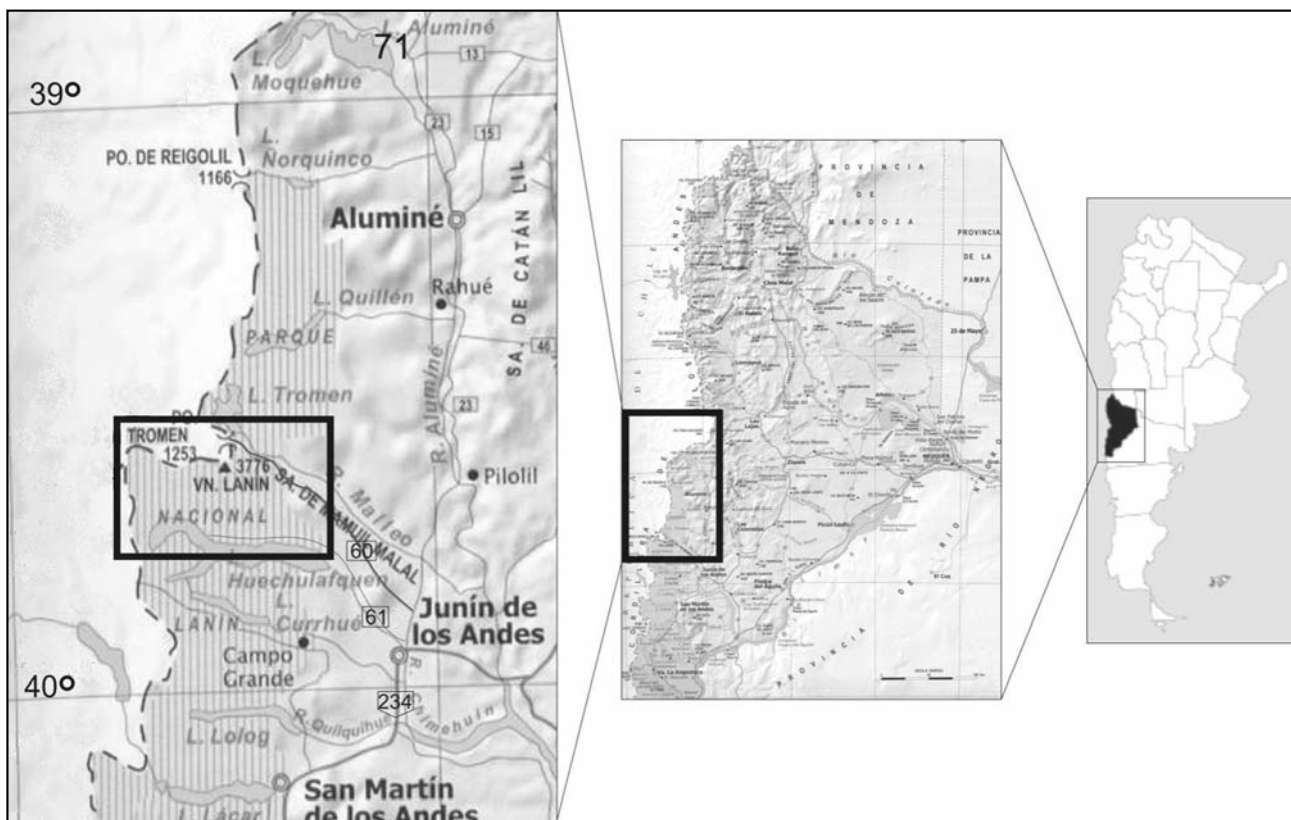


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

En el presente trabajo se utilizarán las definiciones expuestas precedentemente, siguiendo una metodología particular, que se detalla a continuación.

### METODOLOGÍA

La secuencia metodológica para la obtención de los resultados es la siguiente: en primer lugar se localizaron los procesos de remoción en masa dentro de la zona de estudio y se caracterizaron en detalle los fenómenos correspondientes a los flujos rápidos de mayor envergadura.

Para determinar la susceptibilidad y la peligrosidad de flujos rápidos se agruparon los diversos parámetros físico-naturales en factores condicionantes y factores desencadenantes. La susceptibilidad se determinó de forma directa según *Western et al (2003)* la cual está basada en la experiencia de los autores y sobre la base del conocimiento de los factores condicionantes y la zonificación de la peligrosidad de flujos rápidos se desarrolló teniendo en cuenta el análisis de los factores desencadenantes.

Por último, para estimar la vulnerabilidad y el riesgo específico se identificaron los elementos humanos (obras de infraestructura y vidas humanas) bajo riesgo y se los relacionó con los datos de peligrosidad.

A continuación se presenta un diagrama de flujo de la metodología utilizada (Figura 2):

### REMOCIÓN EN MASA

Las características de los depósitos de remoción en masa presentes en el área de estudio corresponden básicamente a Flujos. Se ha identificado un gran número de movimientos de remoción en masa del tipo flujos rápidos desarrollados desde las laderas del Vn. Lanín, los cuales configuran el rasgo más importante y objeto de estudio del presente trabajo. El término flujos rápidos corresponde a los flujos de detritos y hace referencia a la ocurrencia de estos fenómenos con velocidades mayores a 3 m/min correspondientes a los Flujos muy rápidos a extremadamente rápidos de la clasificación de *Cruden y Varnes (1996)*. En la Figura 3 se presenta una imagen satelital con la identificación de los Flujos de mayor importancia.

Evidencias geomórficas de un evento de este tipo es el que denominamos Flujos Rucu Leufú, que tienen su origen en la ladera sur del volcán Lanín, ocupando el valle formado por el arroyo Rucu Leufú. En su recorrido desde la zona de arranque superior, se desplazaron en forma encauzada a lo largo del referido valle Rucu Leufú. Cuando estas acumulaciones, del tipo cenoglomerados, llegaron hasta el lago, se expandieron sobre el extenso conoide ahí presente. Esta última característica geomórfica dio lugar a que el lago presente una angostura y permita su separación en dos cuencas: la mayor y correspondiente al lago Huechulafquen y la más reducida correspondiente al lago Paimún. Es probable que este conoide en su conjunto se

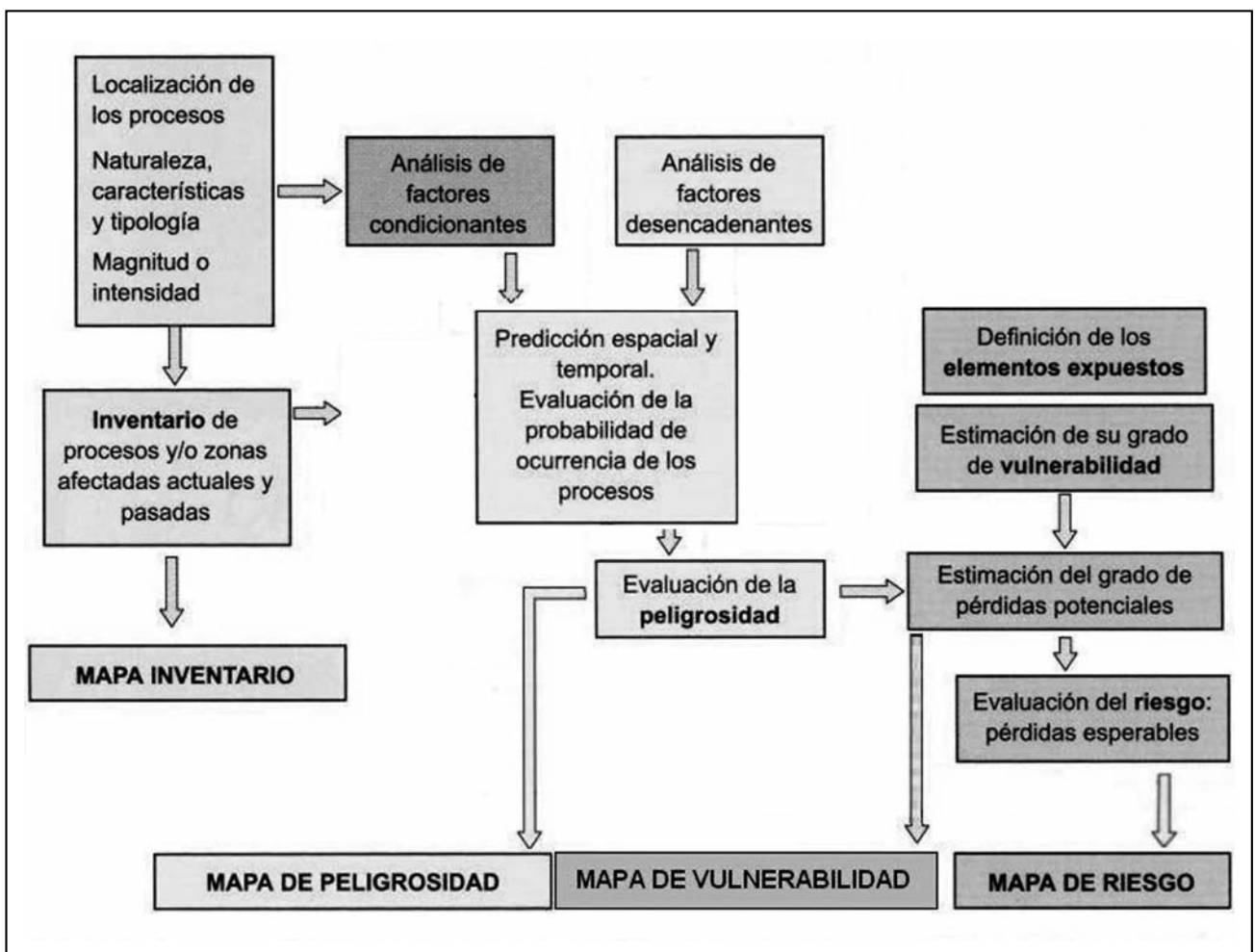


Figura 2. Secuencia metodológica. Modificado de Gonzáles de Vallejo (2002).

componga de acumulaciones relacionadas, en parte con flujos rápidos, en parte con acumulaciones fluviales propias a conos aluviales y en parte con depósitos relacionados con un conoide deltáico.

La proximidad del depósito conglomerádico con la costa de la margen opuesta del lago, señala una alta probabilidad de haber generado un tsunami y posteriormente, condiciones de endicamiento. Sin embargo, no se han encontrado evidencias claras de estas posibles situaciones. La longitud del depósito es de aproximadamente 7400 metros. A continuación se presenta un perfil de detalle, para el cual se estima un espesor total de 7,4 metros. El mismo fue realizado sobre un corte natural en el depósito situado a los S 39°43'09,7'' O 71°30'16,9'', se distingue la recurrencia de varios acontecimientos de flujos rápidos. Los mismos pueden ser divididos en tres facies que denominaremos A, B y C:

La Facies A está formada por una brecha matriz-soportada con bloques de granulometría variada (como máximo hay bloques de 70 cm). de formas sub-angulosas, estructura masiva y de carácter polimíctico. El espesor es, como mínimo, de 3 m. Corresponde a un flujo hiperconcentrado.

La Facies B está constituida por brechas finas matriz-soportadas con laminación horizontal las cuales presentan un

espesor de 50 cm. Este depósito corresponde a un flujo fluido dado por la migración de barras longitudinales.

La Facies C es una brecha clasto-soporada con bloques de hasta 50 cm de formas sub-angulosas, de variada granulometría y con una estructura masiva. El espesor es de aproximadamente 1 m. Corresponde a un flujo hiperconcentrado.

Por encima de la Facies C reaparecen las Facies B y A con espesores de 60 cm y 1,5 m respectivamente. Hacia el tope de la secuencia se distingue una cubierta pedogenética.

Un perfil columnar correspondiente al depósito descrito precedentemente se ilustra en la Figura 5.

Si bien los rasgos geomórficos no permiten precisar si se trata de uno o varios eventos, a partir del análisis estratigráfico realizado sobre los perfiles relevados en el valle del arroyo Rucu Leufú, se pudo determinar que como mínimo existieron tres eventos de remoción en masa del tipo flujos rápidos a lo largo del valle referido. Esta situación define un patrón de recurrencia que permite suponer la permanencia de la inestabilidad de la pendiente a lo largo del tiempo geológico reciente y pronosticar su probable ocurrencia en el futuro ante disparadores naturales adecuados, sobre todo teniendo en cuenta que los factores que los propiciaron no han variado sus características originales.

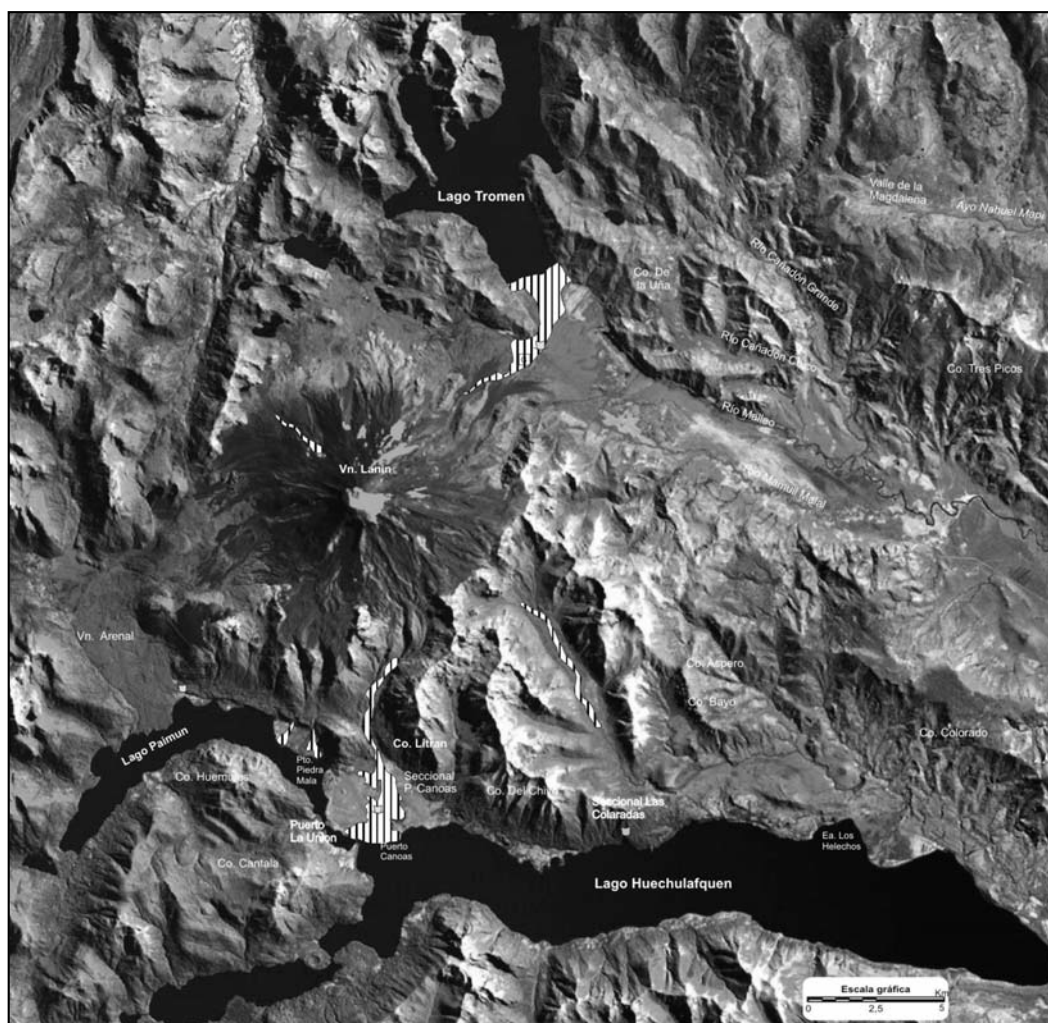


Figura 3. Mapa de identificación de los flujos más importantes.



Figura 4. Vista de la serie de flujos rápidos ubicados sobre valle del arroyo Rucu Leufú.

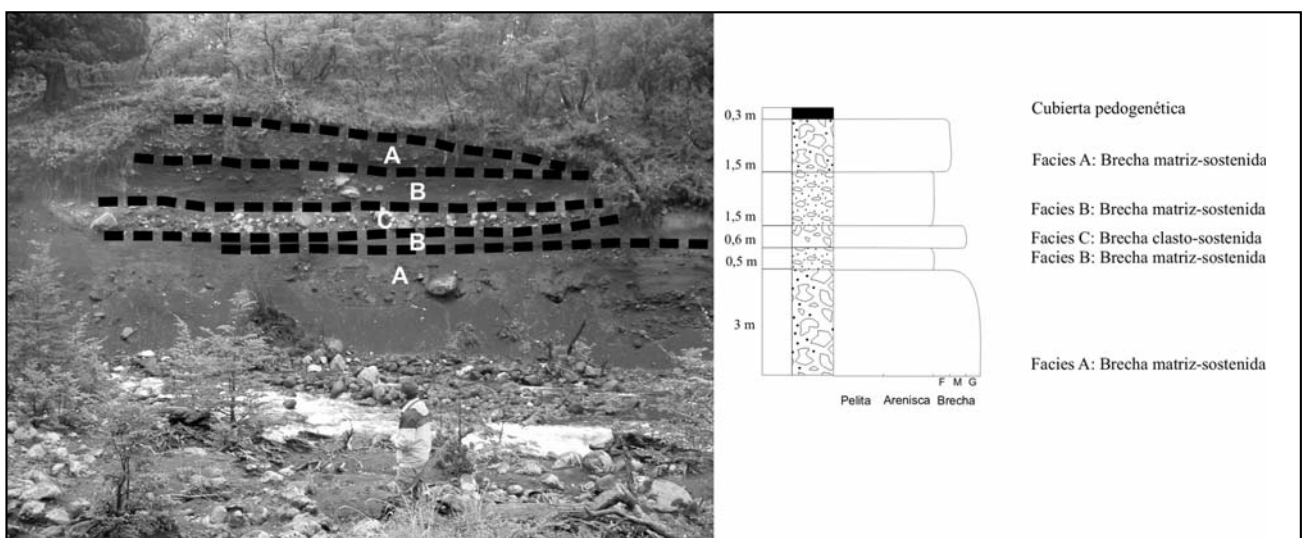


Figura 5. Perfil columnar.

Otros eventos de este tipo se pueden identificar sobre la ladera noreste del volcán Lanín a lo largo del arroyo Turbio, los que llegaron encauzados hasta la margen sur del lago Tromen.

Asimismo, evidencias estratigráficas de eventos recurrentes de flujos rápidos pueden ser observadas en varias localidades. Por ejemplo, a lo largo del valle del arroyo Hueyeltué, en su sección media y proximal se expone un perfil de un depósito correspondiente a flujos densos, según un espesor de 5 metros. Un segundo perfil puede reconocerse a lo largo del arroyo Turbio. En la sección situada a los S 39° 35' 19'' O 71° 25' 55,9'' de este curso fluvial, se expone una acumulación de 3.5 m. de potencia integrada de bloques de variada granulometría que alcanzan tamaños mayores a 1 m, formas sub-angulares preferentemente elongadas, alguno de los cuales son de origen es volcánico, mientras que otros muestran evidencia de transporte glaciario.

Otros fenómenos de remoción en masa presentes en baja proporción corresponden a deslizamientos ubicados sobre la Ruta Provincial N° 61 a metros del Pro. Vda. De Barriga y conos de deyección ubicados a lo largo de del arroyo Hueyeltué.

### FACTORES CONDICIONANTES

Se definen como factores condicionantes o pasivos, a aquellos que son intrínsecos al terreno. Se incluyen los factores topográficos (orografía), los factores biológicos (vegetación) y los factores geológicos (suelo, litología y estructura y geomorfología). Cada uno de ellos se describe a continuación en forma general.

### Topografía

La región se encuentra ubicada en la Cordillera Principal y está compuesta por una serie de cerrilladas de poca extensión, que disminuyen en altitud de noroeste a sudeste (Turner 1973).

El volcán Lanín (3.776 m) es el pico más elevado del área. Está ubicado en la zona central del presente trabajo, y junto con el cerro Colorado (1.785 m) conforman la Sierra de Mamuil Malal de dirección noroeste-sudeste. Este cordón separa las aguas del río Malleo, al norte, y del lago Huechulafquen y río Chimehuín, al Sur.

Un rasgo notable es la presencia de grandes diferencias altimétricas en distancias horizontales relativamente cortas, que dan lugar a altos valores de inclinación de las pendientes, refiriéndonos a valores promedio, y más aun, a valores locales. Esta situación, en consonancia con otros factores, como por ejemplo los de naturaleza geológica, condiciona la materialización de movimientos de remoción en masa del tipo flujos rápidos. El la Figura 6 se presenta un mapa topográfico.

### Vegetación

La vegetación es mayormente arbórea predominando el pehuén o pino (*Araucaria araucana*) hallándose en una comunidad casi pura en el tramo superior del arroyo Rucu Leufú. Otras especies asociadas son el ñire (*Nothofagus antarctica*), la lenga (*N. pumillo*), el coihue (*N. dombeyi*) y el raulí (*N. proceras*). El sotobosque está integrado por coligüe (*Chasquea coleu*), calafate (*Berberis buxifolia*), grosellero (*Ribes magellanicum*), amancay (*Alstroemeria aurantiaca*), etc.

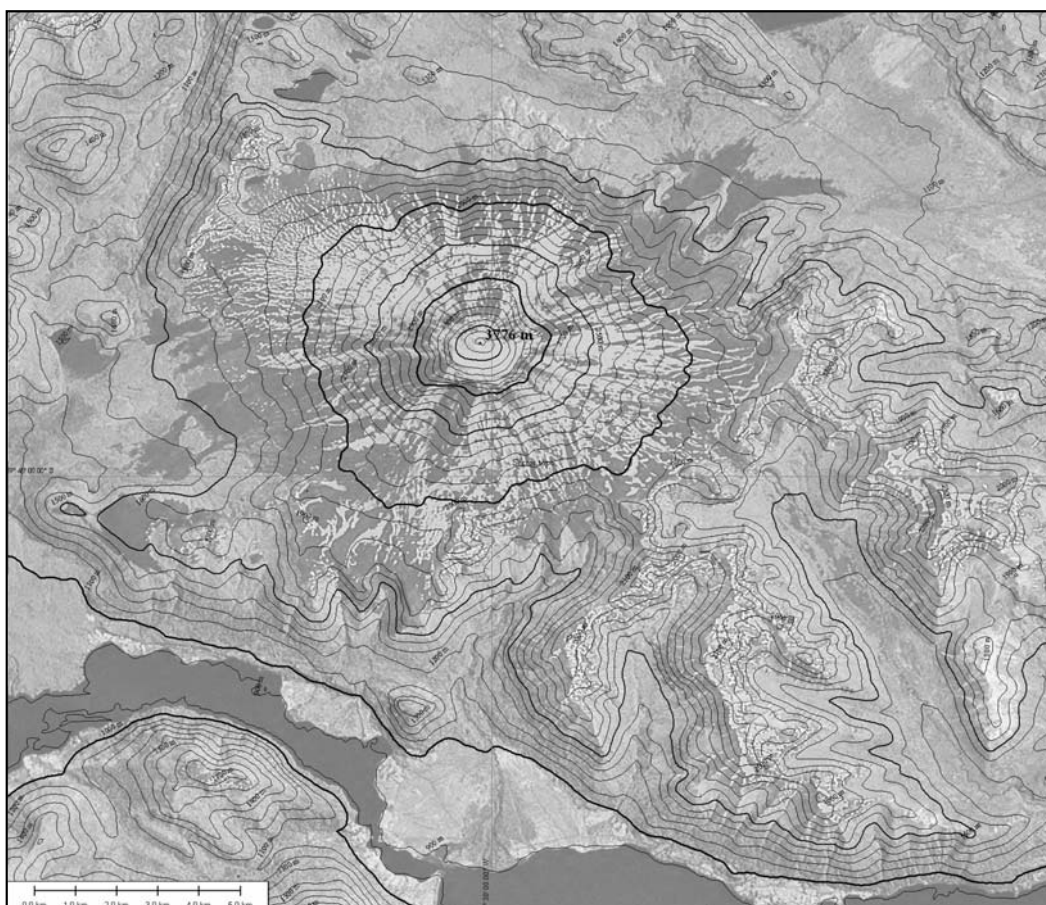


Figura 6. Mapa topográfico del Vn. Lanín con una equidistancia de 100 m.

El límite de presencia arbórea se ubica alrededor de los 1800 m, a partir del cual sólo crecen gramíneas, compuestas, plantas en cojín y arbustos bajos.

En este caso la vegetación da lugar a un aumento de la rugosidad de la ladera y por lo tanto retarda la escorrentía superficial disminuyendo así la erosión. Además, el aumento del tiempo de residencia del agua sobre la pendiente posibilita una mayor percolación del agua al subsuelo subsuperficial, lo que permite su absorción radicular y por lo tanto la posterior evapotranspiración. Esta última situación se traduce en una disminución de la presión poral, factor interno este último que puede actuar como un agente que dispara la caída de la pendiente cuando adquiere una magnitud superior.

#### Suelo

De los cinco factores de formación de los suelos, los más influyentes en el desarrollo de los mismos son: el material original y la topografía.

En cuanto a la distribución existe un importante desarrollo horizontal a lo largo de los valles de los ríos Malleo y Chimehuín. En el sector de bosques hay cierto desarrollo vertical con tendencia al tipo *podzol* faltando el horizonte silíceo (Turner 1973). Desde aproximadamente la zona de Lago Tromen hacia el sur predominan los Andosoles húmicos (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations).

Si bien la presencia de suelos tipo Andosoles debe tenerse en cuenta, en vinculación con procesos de remoción en masa debido al comportamiento tixotrópico que presentan, los suelos en zonas elevadas no tienen un desarrollo vertical significativo. Por otro lado la presencia de vegetación mencionada en el apartado anterior, actúa como agente estabilizador de las pendientes, y dicha presencia de vegetación supera los 1800 m de altura. Al respecto se señala que a continuación de un incendio de la cubierta boscosa, se generalizan sobre las pendientes afectadas los movimientos de remoción en masa de diversa tipología lo cual ratifica la capacidad estabilizadora. Por lo tanto no se considerará a los suelos, en el presente trabajo, como elementos potencialmente susceptibles de ser deslizados.

#### Estructura y Litología

La disposición general que presentan las sucesivas coladas y bancos de piroclastos que fueron emitidos por el volcán Lanín a lo largo de su evolución, dieron lugar a la generación de un aparato de rápido crecimiento con pendientes empinadas situadas sobre un cuerpo en el cual son localmente abundantes las superficies de deslizamiento potencial. Entre estas se destacan como las de mayor importancia a los horizontes estratigráficos que separan a las referidas coladas de las unidades piroclásticas, las que no presentan el mismo grado de tenacidad que las primeras. Si bien estas superficies de discontinuidad pueden presentar en general inclinaciones similares a las laderas del volcán, cuando son cortadas por la acción del proceso fluvial y glaciario, las unidades volcánicas situadas por encima de ellas se desplazan a favor de movimientos de remoción en masa locales, especialmente deslizamientos traslacionales y avalancha de rocas. Los materiales involucrados en estos desplazamientos, en la mayoría de los casos lo hacen a lo largo de los valles existentes dando lugar a flujos rápidos.

Las secuencias volcánicas que forman el cuerpo principal del volcán, se presentan como factor litológico de importancia en cuanto a los valores de inestabilidad presentes, ya que se

trata de coladas que se disponen en forma interestratificada con otros niveles volcánicos menos tenaces, según horizontes de estratificación que por sectores interceptan la de la pendiente topográfica según un valor menor al de esta, condición que da lugar a potenciales movimientos traslacionales.

#### Geomorfología

A continuación se describe la morfología del área de estudio según el proceso geológico actuante, con excepción de la morfología por remoción en masa descrita precedentemente.

#### Morfología volcánica

El rasgo geomórfico sobresaliente es la presencia de un estratovolcán compuesto, predominantemente efusivo, de forma cónica ubicado en el centro de la zona de estudio denominado Lanín. A partir del estudio realizado por Lara et al. (2004), han sido definidas cuatro unidades según criterios geomorfológicos, la primera (Unidad Lanín 1) representaría restos de una estructura ancestral constituida por lavas dacíticas con disyunción columnar que probablemente conforman un antiguo estratocono; la segunda (Unidad Lanín 2), formada por secuencias volcánicas intercaladas con coladas de lava basáltica, forman la sección basal del actual estratovolcán; la tercera unidad (Unidad Lanín 3) corresponde a coladas de lava que forman la estructura del cono y la cuarta unidad (Unidad Lanín 4) está formada por coladas basálticas y depósitos piroclásticos que cubren la unidad precedente.

Como se indicó precedentemente, la referida estructuración dio lugar a la existencia de un edificio volcánico de elevada inestabilidad con laderas susceptibles a la erosión glaciogénica, la fluvial y a la remoción en masa.

#### Morfología glaciaria

En la actualidad, si bien no alcanzan un desarrollo muy importante, existen glaciares activos ubicados sobre el volcán Lanín, caracterizados por encontrarse en una situación de franco retroceso. Esta localizada acción glaciaria ha dado lugar a una serie de formas de erosión y acumulación que han condicionado favorablemente la inestabilidad de las pendientes superiores del volcán. Las formas de erosión corresponden a circos y artesas de poco desarrollo, mientras que las formas de acumulación son morenas marginales y frontales, estas últimas recesionales.

Las formas de erosión glaciaria dan lugar en la sección superior del volcán, a pendientes empinadas aumentando los niveles de inestabilidad iniciales que presentaban sus laderas, mientras que las acumulaciones morénicas desagregadas configuran depósitos susceptibles a movilizarse como flujos ante disparadores adecuados.

#### Morfología fluvial

El diseño fluvial del área es del tipo complejo ya que fue parcialmente interrumpido y modificado por la morfología volcánica y glaciaria que se sobre impuso a la red de drenaje ancestral.

En la zona central-occidental, donde se ubica el volcán Lanín, se dispone un diseño radial centrífugo de densidad media sobre el cono volcánico.

La elevada profundización y expansión lateral que presentan los valles fluviales excavados sobre las pendientes del volcán, especialmente en su sección superior e intermedia, posibilitan la existencia de pendientes empinadas e inestables a lo



largo de las cuales han tenido lugar distinto tipo de movimientos de remoción en masa. Asimismo, la referida red fluvial configura el sistema de conducción a lo largo del cual se desplazaron los reiterados eventos de flujos encauzados que han sido identificados en este estudio.

### FACTORES DESENCADENANTES

Los factores desencadenantes o activos, son aquellos que actúan como mecanismos disparadores de los procesos de remoción en masa. Son capaces de generar grandes cambios en las condiciones físicas presentes en las laderas, en un corto período temporal. Tales cambios afectan a un sistema en equilibrio estático o cuasi estático, llevándolo a una situación de inestabilidad, dando como resultado el desenlace de movimientos gravitacionales. Para el área de estudio, se incluyen los factores climáticos y a los geológicos (marco tectónico: sismicidad y vulcanismo).

#### Climáticos

Los vientos, bajo la influencia del Anticiclón del Pacífico, soplan durante la mayor parte del año desde el oeste. Presentan una elevada carga de humedad ya que atraviesan el Océano Pacífico y a medida que se encuentran con los distintos cordones montañosos, resuelven la humedad en precipitaciones nivales y o pluviales, efecto conocido como de sombra pluviométrica. A medida que avanzan en el antepaís, producen desertización ya que avanzan secos y recogen la humedad del mismo. El resultado de estas condiciones es un régimen de precipitaciones calculado en 3039,6 mm anuales (Turner 1973) (Figura 7).

Se puede considerar que el clima es "montaños", influenciado por presencia de importantes lagos, que sirven como

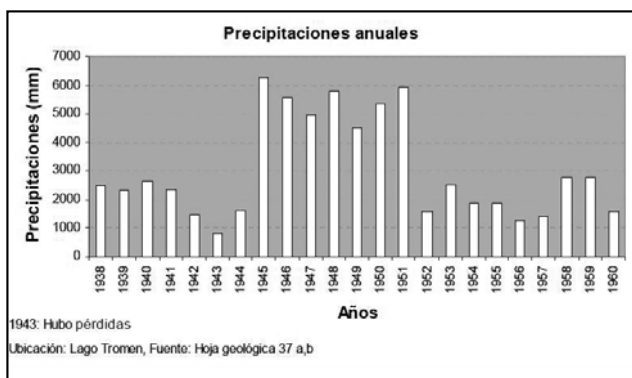


Figura 7. Hidrograma de precipitaciones anuales.

reguladores climáticos locales. Las temperaturas en verano oscilan entre 20 y 30 °C durante el día, para descender a 5 y 0 °C por la noche. En invierno, durante el día rondan los 0 °C y durante la noche llegan hasta -20 °C. Las diferencias de temperatura dan lugar ciclos de congelamiento y descongelamiento favoreciendo la gelificación de los materiales. Además, la gran altura del volcán Lanín (3776 m) en relación al clima, da lugar a la generación de glaciares permanentes hacia la cumbre.

Los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio (La Unión, Lago Huechulafquen y Lago Tromen), indican que las precipitaciones son predominantemente invernales con un pico en el mes de mayo que supera los 400 mm mensuales. Asimismo se remarca un pico de precipitaciones en el mes de noviembre de alrededor de 200 mm mensuales.

Las elevadas tasas de precipitación anual y sobre todo los picos de precipitación mensuales, que se suman al derretimiento de los hielos en períodos estivales, generan una situación de inestabilidad en las pendientes, dada por el sobrepeso de la columna de agua y el aumento de la presión intersticial. A este efecto se le suma la gelificación que quita coherencia al material afectado. Cabe remarcar el carácter periódico en el cual se incrementa la presencia de agua en el sistema, el cual está dado por variaciones estacionales con ocurrencia cíclica anual. En este sentido, se destacan los factores climáticos como uno de los principales factores desencadenante de los flujos rápidos en el área.

#### Geológicos

El marco tectónico nos brinda información acerca del desarrollo de la actividad sísmica y volcánica, dos aspectos que se tendrán en cuenta por su eventual capacidad de actuar como mecanismos disparadores de los procesos de remoción en masa.

La zona de estudio está situada en el segmento sur de los Andes Centrales, lugar donde el ángulo de subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa continental de América del Sur es del tipo normal. Este margen de placa activo, genera los esfuerzos compresivos que dan origen al ascenso de la Cordillera de los Andes, y la fusión de la losa oceánica que regula la actividad volcánica.

Según Folguera y Ramos (2000), el segmento comprendido entre los 39° y los 45° está caracterizado por la subducción levemente oblicua, con un vector de convergencia de 79° de azimut, de la placa de Nazca bajo la placa de América del Sur a los 46° 30' S. Esta componente oblicua produciría movimientos transcurrentes en la zona de arco volcánico, cuyo frente es paralelo a la trinchera oceánica como resultado de la geometría de la zona de Benioff. Estos movimientos están atestiguados por sismos superficiales a los 39° y a los 45°, cuyos mecanismos focales sugieren componentes dextróginas en las fallas meridianas a la región (Cembrano y Lavenu 1997). Este esquema fue extendido hacia el norte hasta los 39°S por Prian et al. (1994), López Escobar et al. (1995) y Lavenu et al. (1997), entre otros.

#### Actividad Sísmica

La actividad sísmica responde al cuadro tectónico descrito precedentemente, donde los terremotos son mayoritariamente de interplaca correspondientes a focos superficiales y de profundidad intermedia, con una densidad de eventos baja y magnitudes que alcanzan los 6 grados en la escala de Richter, en zonas alejadas del área de estudio.

Los terremotos deben presentar altos valores de intensidad para actuar como factor desencadenante de procesos de remoción en masa. Un gráfico de susceptibilidad de deslizamientos inducidos por terremotos tomado de Hays (1990) muestra la relación entre la magnitud y la distancia al epicentro (Figura 8).

De acuerdo con el gráfico de susceptibilidad de Hays (1990) y de los antecedentes sobre los valores de magnitud e intensidad de terremotos ocurridos desde 1920 a la actualidad obtenidos de los registros del INPRES, y teniendo en cuenta las características litológicas, estructurales, morfológicas y topográficas reconocidas en la comarca analizada, se observa que la posibilidad de ocurrencia de avalanchas, flujos y deslizamientos de gran magnitud, donde el evento desencadenante sea exclusivamente un sismo, es muy baja ya que el desarrollo de un movimiento de remoción en masa de gran escala involucraría un terremoto de una magnitud superior a los registrados desde 1920.

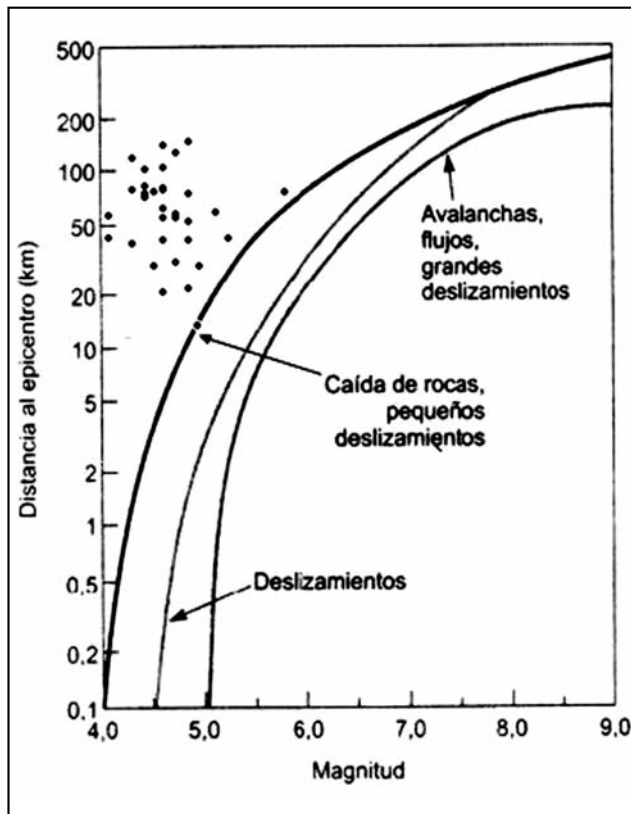


Figura 8. Susceptibilidad de deslizamientos inducido por terremotos tomado de Hays (1990).

A partir del cruce de esta información podemos concluir que la sismicidad es potencial fuente de peligro geológico, sin embargo, puede considerarse razonablemente que los sismos relacionados con el desplazamiento de placas, no constituyen en esta zona el principal factor en la inducción de grandes deslizamientos gravitacionales de masas.

#### Actividad volcánica

La zona de estudio presenta dos sistemas volcánicos desvinculados genéticamente, el volcán Lanín y los Conos El Arenal, cuyas características volcanológicas se detallan a continuación.

El volcán Lanín es un estratovolcán compuesto, edificado en dos etapas desde el Pleistoceno Medio. A partir del análisis estratigráfico y de los rasgos geoquímicos de los productos volcánicos, Lara (2004) infiere un comportamiento cíclico y monótono, en el cual la evolución magmática estaría dominada por la cristalización fraccionada en sistema cerrado de pulsos magmáticos discretos que evolucionarían en un reservorio superficial. La forma de evacuación de los magmas, estaría controlada por el mecanismo de diferenciación, induciendo la salida de magma viscoso desde la zona apical y magmas basálticos desde la periferia del conducto central o desde los centros adventicios. Los episodios de colapso parcial del sector central habrían resultado del vaciamiento acelerado de la cámara magmática.

El sistema El Arenal ha sido estudiado por Corbella y Alonso (1989) los cuales atribuyen las características de los afloramientos a la actividad fratomagmática.

Si bien los volcanes Lanín y Arenal son de tipo activo, teniendo en cuenta la continuidad de las características geodinámicas actuantes y la juventud de las emisiones holocenas, no se

considera al vulcanismo, en el presente trabajo, la principal causa de peligrosidad del área, ni el principal factor desencadenante de flujos rápidos.

Sin embargo se llama la atención sobre los procesos potencialmente peligrosos vinculados a la actividad volcánica como ser los flujos laháricos, la dispersión de cenizas y la probabilidad de colapso. Cabe destacar aquí que hay depósitos vinculados a erupciones del sistema del volcán Lanín con edades de c.a. 600 años (Lara 2004) determinadas en base a estudios cronestratigráficos.

#### ELEMENTOS BAJO RIESGO

Se consideran, en el presente trabajo, elementos bajo riesgo al contexto social y material. Como veremos en el desarrollo de este apartado, tanto la densidad de población estable como la infraestructura son escasas, por lo cual se hará hincapié en el estudio de pequeñas áreas muy sensibles.

Estas áreas corresponden fundamentalmente a las vías de comunicación, áreas destinadas al turismo y puestos de población permanente.

#### Medios de comunicación y transporte

Los dos caminos principales en el área tienen dirección aproximada este-oeste y salen ambos de Junín de Los Andes, que a su vez provienen de San Martín de los Andes a partir de la ruta nacional N° 234. El camino ubicado hacia el norte es la ruta provincial N° 60 m que bordea el río Malleo y se dirige hacia el paso Mamuil Malal (ex Tormen). Es un camino asfaltado.

El camino ubicado al sur es la ruta provincial N°61, bordea al río Chimehuín, el lago Huechulafquen y llega hasta la confluencia de los lagos Paimún y Huechulafquen, lugar al que se denomina "La Unión".

Estas dos vías principales (rutas N° 60 y 61) se verían moderadamente afectadas por procesos de flujos rápidos, sin grandes consecuencias desde el punto de vista ingenieril, pero incidirían en algunos servicios, dentro de los cuales se destaca el cese de tránsito hacia el paso internacional con Chile Mamuil Malal.

#### Población e industria

Debido a que la comarca forma parte del Parque Nacional Lanín, la densidad de población es baja, encontrándose distintas comunidades Mapuches, las cuales subsisten sobre la base del cultivos propios, ganadería ovina, comercio y el turismo, particularmente dirigido al campamentismo. Estas comunidades se dedican, también, a la tejeduría regional y a la recolección de piñones del pehuén (*Araucaria araucana*), durante los meses de febrero y marzo. La recolección les está permitida sólo a las comunidades Mapuches que elaboran productos regionales y los comercializan.

Parte de la población, distribuida en estancias, se dedica mayormente a la ganadería, mientras que Oficiales de Gendarmería Nacional controlan las fronteras, fundamentalmente en el paso internacional Mamuil Malal (ex Tormen).

Por último se encuentran los puestos de los Guardabosques, dependientes de Parques Nacionales, ubicados cerca de las rutas; al sur sobre el arroyo Rucu Leufú y al norte sobre el río Turbio.

La industria de mayor desarrollo es la del turismo, la cual se expande fundamentalmente en los meses de verano, cuando

el clima es benevolente. En otoño y primavera el turismo disminuye, el clima es más frío y se desencadenan precipitaciones nivales. Hacia el invierno la actividad cesa.

La infraestructura para el turismo es baja, ya que se intenta preservar el medio natural. El enfoque es hacia el campamentismo o la visita del parque de un día. Existen pequeños puertos lacustres, de los cuales el Puerto Canoas se utiliza con fines tanto turísticos como para el control de las actividades en el perímetro de la costa.

Las áreas destinadas al campamentismo se ubican sobre la margen norte del lago Huechulafquen y del Paimún y la margen sur del Tromen, en estas zonas se encuentra las viviendas de las comunidades mapuches que residen durante todo el año.

Los senderos de ascenso al volcán son dos, al sur se asciende a través del valle formado por el arroyo Rucu Leufú, y al norte por una importante morena lateral denominada *Espina del Pez*, pasando por tres refugios antes de llegar a la cumbre.

Considerando los datos aquí expuestos, se ponen en evidencia, algunas actividades humanas susceptibles de ser afectadas por procesos de flujos rápidos: Puestos de Guardabosques de Parques nacionales, de Gendarmería, los campamentos, los dos senderos de ascenso al volcán, y el Puerto Canoas.

Asimismo es conveniente destacar que existe una alta probabilidad de que el desarrollo de flujos provenientes del volcán Lanín se extiendan hacia las márgenes del lago penetrando en él, situación que daría lugar a un tsunami. Bajo tales circunstancias, toda la infraestructura y población ubicada en las márgenes se vería seriamente afectada.

## RESULTADOS

A partir del estudio realizado y considerando que los procesos de remoción en masa más relevantes por la amenaza que representan corresponden a flujos rápidos, se determinaron en una primera etapa numerosas áreas con diverso grado de inestabilidad, en las cuales se detectaron morfologías relacionadas con este tipo de peligro geológico y áreas donde estos eventos no se presentan, pero en las cuales son numerosos los factores condicionantes que los promueven. En estos ambientes se evaluaron los niveles de susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo, considerando en este análisis la tipología, magnitud y persistencia de los factores condicionantes y desencadenantes que fueron identificados como los de mayor fluencia de la comarca. Por último se confeccionó una cartografía temática con base geológico-geomorfológica de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.

### Determinación directa de la susceptibilidad y evaluación de la peligrosidad

Sobre la base de criterios geomorfológicos y considerando la identificación de factores condicionantes que dan lugar a situaciones de inestabilidad y caída de las pendientes, se pudieron establecer varios niveles de susceptibilidad para la totalidad de las laderas reconocidas. En este caso se tuvieron en cuenta la naturaleza petrológica de las litologías existentes, el grado de cementación de las unidades clásticas, el tipo de diagénesis en las acumulaciones más modernas, la existencia de diversas superficies de despegue, tales como horizontes estratigráficos y estructuras de fracturación capaces de propiciar la generación de deslizamientos traslacionales, y la disposición espacial que estas superficies guardan en su intersección con las superficies de las pendientes consideradas. Por su parte, la interpretación geomorfológica realizada permitió identificar, especialmente en

el ámbito del volcán Lanín y sus áreas periféricas adyacentes, una serie de morfologías relacionadas con flujos rápidos de diversa densidad que en forma recurrente se desplazaron sobre sus laderas e, incluso, llegaron a irrumpir sobre el lago.

Como consecuencia de la integración de esta información surge que el área con la mayor problemática en cuanto a la inestabilidad de pendientes se refiere, la constituye el volcán Lanín y sus áreas periféricas adyacentes. En este ambiente se ha reconocido que las acumulaciones morénicas situadas sobre las laderas del Lanín constituyen los elementos de pendiente que presentan la mayor susceptibilidad a la inestabilidad. Esta condición se debe a la sumatoria de factores externos e internos, entre los que se mencionan como los más destacados a los siguientes: el elevado grado de inclinación de la pendiente en la cual se encuentran acumuladas, el mínimo a inexistente grado de diagénesis que presentan, el bajo grado de compactación que tienen, los valores de permeabilidad variable, la presencia permanente de agua a partir de la fusión de la nieve y el hielo, lo que permite el mantenimiento de presiones porales elevadas durante la mayor parte del año, con picos estacionales al comienzo de la primavera, y el efecto del estrés transitorio por onda sísmica. Asimismo, se destaca la presencia una estructura y litología que favorecen el desarrollo de remoción en masa, como se mencionó precedentemente.

Se han definido 4 categorías de susceptibilidad: Muy Alta, Alta, Media y Baja, siendo el valor entre cada una de ellas relativo.

**Susceptibilidad Muy Alta:** La zona con este nivel de susceptibilidad se localiza sobre las pendientes Sur y Norte del volcán Lanín. Hacia el sur se observa una serie de flujos rápidos que se desplazaron recurrentemente a lo largo del valle del arroyo Rucu Leufú, los que posteriormente fueron afectados por la erosión fluvial, razón por la cual sus morfologías distintivas están enmascaradas. Estos flujos tienen su zona de arranque en la cabecera del valle, e incluso, en un sector superior más difuso donde se observa un sistema de drenaje incipiente.

Hacia el norte los depósitos correspondientes a un flujo se encuentran ubicados a lo largo del río Turbio. En el sector proximal se encuentra en contacto con morenas y en el sector distal alcanza la margen sur del lago Tromen. Es probable que dicho lago deba su existencia, en parte, a una endicamiento producido por una acumulación de esta naturaleza.

**Susceptibilidad Alta:** Salvo algunos sectores periféricos, la mayor parte de las pendientes que componen al volcán Lanín presentan susceptibilidad alta debido a varios factores. Entre los más destacados se mencionan los valores de inclinación de las pendientes y su relación con la distancia de recorrido, las acumulaciones glaciogénicas y la existencia de planos de despegue. Se destaca especialmente la presencia de un flujo denso que se desplazó por el valle Hueyeltué, ocupándolo en su sección superior y media a lo largo de aproximadamente 10 Km.

**Susceptibilidad Media:** Son clasificadas con este nivel de peligrosidad las pendientes en las cuales se localizan afloramientos de secuencias volcánicas pertenecientes a los volcanes Lanín y El Arenal y a otras litologías de tenacidad variable, pero en las cuales se observa una cubierta de vegetación importante. Se considera por lo tanto que la vegetación actúa como agente estabilizador de las pendientes, atenuando los restantes factores que podrían ser similares a los referidos para las zonas de Susceptibilidad Alta.

**Susceptibilidad Baja:** Este nivel de susceptibilidad se restringe a las zonas donde las pendientes son bajas, las litologías

tenaces, las estructuras poco favorables a desarrollar planos de despegue y donde, en algunos casos, se observa una cubierta vegetal. Arealmente son las superficies de mayor desarrollo, en su mayor parte localizadas en la sección Norte y Este de la comarca relevada.

Dado que el régimen de precipitaciones es constante en el área de mayor susceptibilidad a los flujos, es decir la correspondiente al Vn. Lanín, podemos asumir que el mismo, como factor disparador de los procesos de remoción en masa en general y de flujos en particular son homogéneos arealmente, en este sentido existe una paridad o igualdad entre la zonificación de la susceptibilidad y peligrosidad.

Una forma de acotar el momento en el cual pueden desarrollarse movimientos en masa corresponde a métodos basados en la correlación directa con las lluvias. En áreas propensas al desarrollo de movimientos superficiales y rápidos, las correlaciones con lluvias pueden proporcionar un criterio aceptable de previsión (Corominas, 1987).

En este sentido, si bien el presente estudio es de carácter cualitativo, se destaca la ciclicidad climática descrita en el apartado de Clima, en la cual existen épocas del año donde es mayor la probabilidad de desarrollo de flujos dado que el mecanismo disparador de los procesos de remoción en masa se intensifican. Anualmente esta condición corresponde a los meses mayo y junio en época invernal y a los meses de agosto y septiembre en época primaveral, en esta última se suma el derretimiento del hielo aumentando la cantidad total de agua que afectan superficialmente y por infiltración a esta zona.

El registro anual de precipitaciones en la zona es discontinuo y existe entre los años 1938 y 1980, lo cual no permite realizar estimaciones de ciclicidad plurianual, sin embargo cabe destacar, en función de lo explicado anteriormente, que la probabilidad de desarrollo de flujos aumenta en los meses de mayo y junio y de agosto y septiembre intensificándose en los años donde la precipitación anual es mayor que la media histórica.

Para obtener una zonificación de la peligrosidad, teniendo en cuenta la afectación asociada a la susceptibilidad, la cual afecta no solo el sector medio de las laderas, sino también el sector bajo Chacón (1994) correspondiente en esta caso los valles fluviales, se han definido 4 categorías de peligrosidad: Muy Alta, Alta, Media y Baja, con una correspondencia directa con la susceptibilidad, representadas en el Mapa de Peligrosidad geológica a los flujos rápidos (Figura 8), siendo el valor entre cada una de ellas relativo.

**Peligrosidad Muy Alta:** Hacia el Sur se desarrolla como una faja angosta que en su sector distal se espátula y hacia el norte se desarrolla como una faja que se abre en forma de abanico en el sector distal.

**Peligrosidad Alta:** Corresponde a la mayor parte de las pendientes que componen al volcán Lanín en las cuales la presencia de glaciares y nieve generan aporte de agua líquida durante la mayor parte del año, especialmente durante la época de deshielo.

Si bien se detectaron depósitos correspondientes a la presencia de un flujo denso que se desplazó por el valle Hueyeltué, ocupándolo en su sección superior y media, cabe esperar que el desarrollo futuro fluvial de este tipo de flujos afecte la totalidad de los valles alcanzando los sectores bajos de desembocadura. Se advierte que la época esperable para el desenlace de flujos, es durante el período de deshielo donde se suma el volumen de agua debida al derretimiento de los glaciares y la nieve, al de eventuales precipitaciones pluviales.

**Peligrosidad Media:** En este caso si bien existe presencia de nieve y hielo durante períodos invernales, los mismos presentan volúmenes inferiores y no se da la presencia de glaciares permanentes como en el caso de Peligrosidad alta restringido al Vn. Lanín.

**Peligrosidad Baja:** Los sectores de peligrosidad baja presentan condiciones en las cuales la lluvia como disparador tiene un potencial bajo a nulo al igual que el efecto de fusión de la nieve y el hielo.

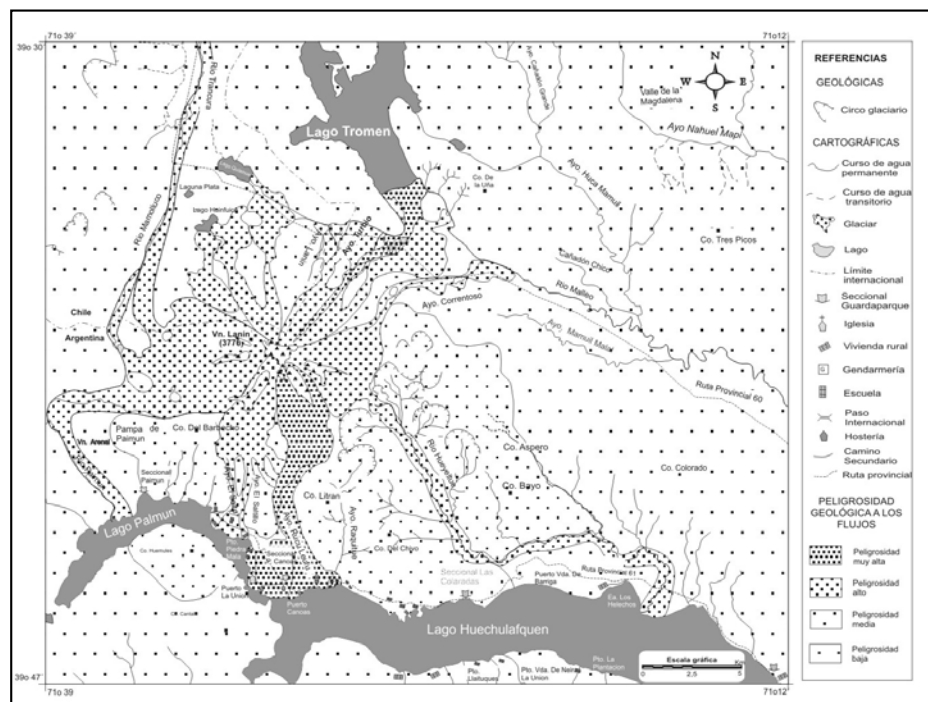


Figura 9. Mapa de peligrosidad geológica a los flujos rápidos.

### Evaluación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad, definida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, depende de la intensidad del fenómeno y de las características de los elementos considerados. La evaluación suele medirse entre 0 (sin daño) y 1 (destrucción total del elemento) ó entre 0% y 100% de daños (González de Vallejo 2002).

Se han agrupado los elementos bajo riesgo descriptos precedentemente, en 4 grupos, teniendo en cuenta la ubicación de los mismos (Tabla 1). Al primer grupo pertenecen las instalaciones ubicadas hacia el norte del volcán Lanín donde se encuentran los puestos de Gendarmería, de Aduana, de Parques Nacionales, una zona de campamento, el paso internacional y la Ruta provincial N°60. El segundo grupo está constituido por los puestos de Parques Nacionales, la oficina de informes, el puerto, el bar, los baños, la iglesia, la escuela, la ruta provincial N° 61. El tercer grupo corresponde a las zonas costeras sobre la margen norte del lago Huechulafquen, las cuales están destinadas a campamentos y donde se ubican las viviendas de las comunidades mapuches. Por último, el cuarto grupo, está formado por dos senderos que sirven para el ascenso pedestre al volcán Lanín, el sendero norte, a través del cual se puede hacer cumbre, posee tres refugios intermedios entre la base y el ápice del volcán y el sendero ubicado hacia el sur, sobre el valle del arroyo Rucu Leufú.

En el presente trabajo, la vulnerabilidad se define sobre la base de la hipótesis de las pérdidas potenciales que ocasionarán los fenómenos si éstos ocurrieran, sobre los elementos bajo riesgo (Tabla 2).

El carácter de la evaluación es cualitativo y corresponden a tres categorías: vulnerabilidad alta, media y baja, representados en el Mapa de Vulnerabilidad (Figura 10).

**Vulnerabilidad Alta:** Las zonas de alta vulnerabilidad incluyen las instalaciones correspondientes a los grupos 1 y 2 mencionados precedentemente, para los cuales se prevén altos niveles de destrucción si se desencadenaran flujos de similares características que los descriptos para los Flujos Rucu Leufú.

**Vulnerabilidad Media:** Las áreas de vulnerabilidad media engloban los grupos 3 y 4 de elementos bajo riesgo. Los elementos del grupo 3 se verían afectados por la ocurrencia de un tsunami y los del grupo 4, presentan baja densidad de tránsito aun en épocas estivales y se verían afectados por la acción directa del desenlace de flujos.

**Vulnerabilidad Baja:** Básicamente se distinguen zonas donde la vulnerabilidad es baja en áreas despobladas y donde la ocurrencia de flujos no alcanzaría las instalaciones.

### Evaluación del riesgo

El cálculo del riesgo específico, definido como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad, se ha obtenido a partir de la multiplicación de los valores de peligrosidad y de vulnerabilidad, dando como resultado 4 grados de riesgo: muy alto, alto, medio y bajo, representados en el Mapa de Riesgo (Figura 11 y Tabla 3).

**Riesgo Muy Alto:** Las áreas de riesgo muy alto corresponden a las zonas donde la peligrosidad es muy alta y la vulnerabilidad alta para los elementos bajo riesgo (grupos 1 y 2). Se ubican hacia la desembocadura del arroyo Rucu Leufú sobre la margen norte del lago Huechulafquen, y sobre el río Turbio hacia la margen norte del lago Tromen.

**Riesgo Alto:** Se encuentra una zona de riesgo alto donde los valores de peligrosidad y la vulnerabilidad son altos para algunos elementos bajo riesgo correspondientes al grupo 2. Se ubica en sectores acotados de la margen norte del lago Paimún.

**Riesgo Medio:** Las zonas de riesgo medio se ubican sobre las laderas norte y sur-este del volcán Lanín y sobre la margen norte del lago Huechulafquen, en dichas áreas se cruzan peligrosidades altas con vulnerabilidades medias y peligrosidades medias con vulnerabilidades altas.

**Riesgo Bajo:** En cuanto al riesgo bajo, se da en las demás zonas donde la vulnerabilidad es baja, independientemente de la peligrosidad.

Tabla 1. Elementos bajo riesgo agrupados.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
<b>Elementos bajo riesgo</b>	Ladera Norte Vn. Lanín y Valle del Río Malleo  Gendarmería Aduana Parques Nacionales Zona de campamento Paso internacional RP N°60	Ladera Sur Vn. Lanín  Parques Nacionales Oficina de informes Puerto, Bar y los sanitarios Iglesia Escuela RP N° 61	Margen Norte L. Huechulafquen y Paimún  Zonas de campamento Viviendas	Vn. Lanín  Senderos de ascenso al volcán Lanín.

Tabla 2. Potencial afección de los distintos grupos ante el desarrollo de Flujos.

Vulnerabilidad \ Elementos Bajo Riesgo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Alta	X	X		
Media			X	X
Baja	Zonas despobladas sin afección ante el desarrollo de Flujos			

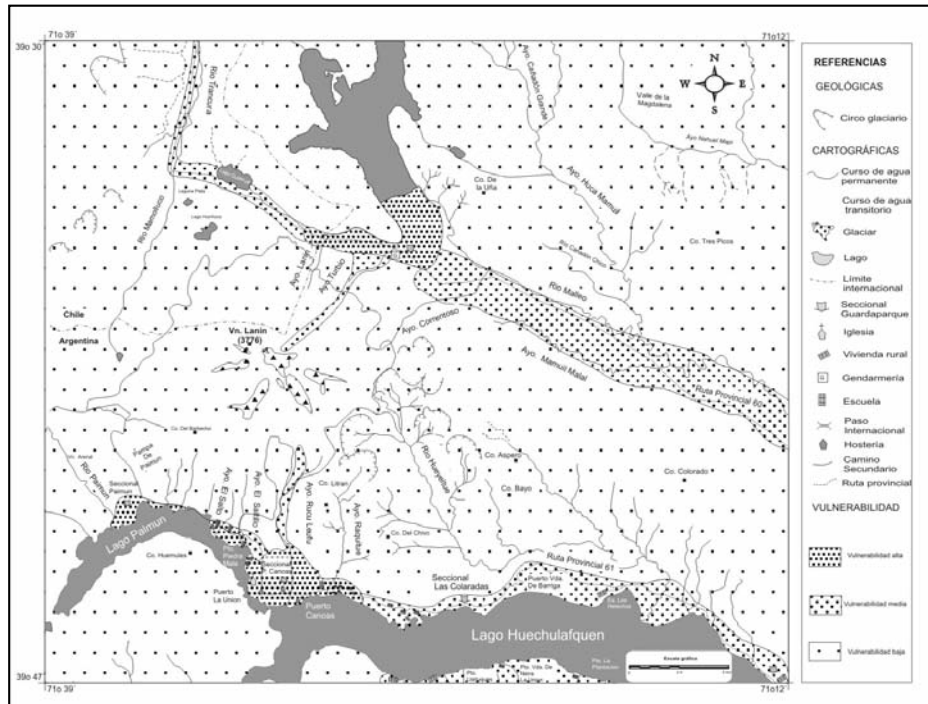


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad.

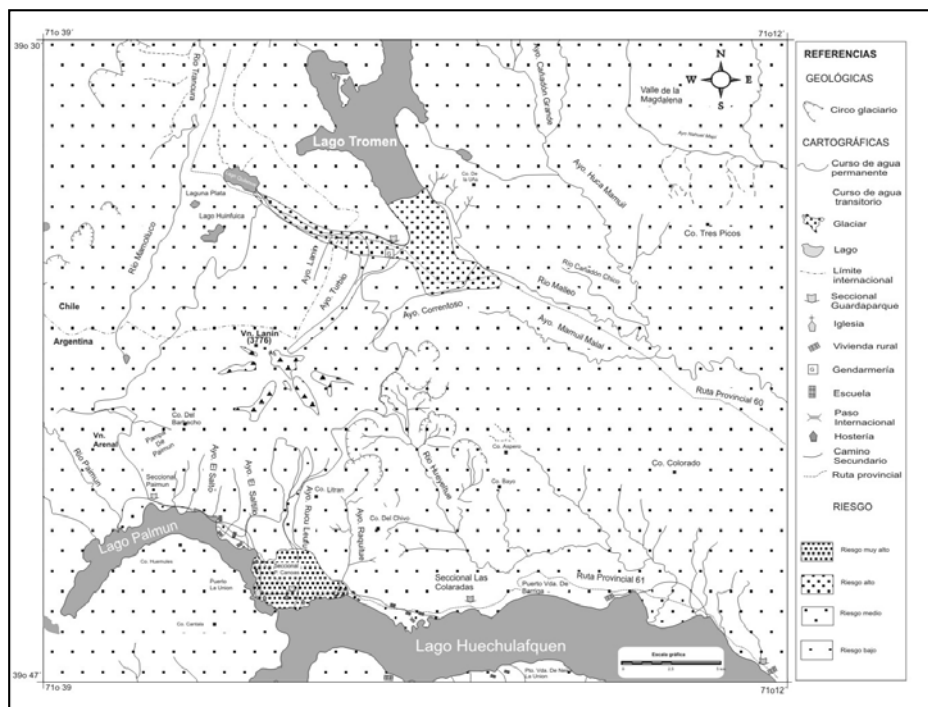


Figura 11. Mapa de riesgo.

Tabla 3. Matriz de valoración del riesgo. La intensidad del gris indica el grado de riesgo: gris oscuro riesgo muy alto a blanco riesgo bajo.

Peligrosidad \ Vulnerabilidad	Alta	Media	Baja
Muy alta	Grupos 1 y 2	Grupo 4	Zonas despobladas y sin infraestructura
Alta	Grupo 2	Grupo 3	
Media	Grupos 1 y 2	Grupo 3	
Baja	Grupo 1 y 2	Grupo 3	

Se ha mencionado previamente que la medición del riesgo es de carácter cualitativo, ya que el trabajo posee una base geológica y no se presentan estimaciones económicas de las pérdidas asociadas a los eventos peligrosos.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como hemos visto a lo largo del presente trabajo, el desarrollo de flujos rápidos se ve favorecido, en el área de estudio, por la inclinación de las pendientes, las diferencias altimétricas en espacios reducidos, el material morénico permeable e incoherente y el volcánico, las precipitaciones, la ablación glaciaria y, en menor medida, los probables eventos eruptivos y sísmicos.

Los flujos rápidos tienden a encauzarse por los valles fluviales, razón por la cual las áreas peligrosas de mayor importancia son, hacia el norte, los cauces de los arroyos Lanín, Turbio y Correntoso y hacia el sur El Saltillo, El Salto, Rucu Leufú y Hueyeltué. La presencia de depósitos correspondientes a diversos eventos de flujos rápidos sobre el arroyo Rucu Leufú, el Hueyeltué y el Turbio, indican la preexistencia de este tipo de movimiento de remoción en masa y se propone dar especial atención en dicha zona.

La vulnerabilidad relacionada con la actividad antrópica, tanto de obras de infraestructura como de poblaciones humanas,

y la amenaza respecto de flujos rápidos, indica una situación desfavorable tanto en la ladera sur, como en la ladera norte del volcán Lanín.

El riesgo asociado a la peligrosidad y a la vulnerabilidad previamente mencionados, nos induce a proponer la relocalización de las obras de infraestructura ubicadas sobre el valle de arroyo Rucu Leufú, más específicamente, las dos cabañas de Guarda parques, El Centro de Informes, el muelle, el comedor, los sanitarios y los campamentos. El análisis realizado permite definir como áreas adecuadas para la reubicación mencionada: el sector comprendido entre la Seccional Las Coloradas y el inicio del Abanico del Ayo Raquitué, atendiendo a un traslado bajo.

Para el sendero de ascenso al volcán Lanín por la ladera sur se recomienda restringir el acceso durante épocas de elevadas precipitaciones incluyendo el período de inicio de deshielos.

Asimismo, la información obtenida permite evaluar la localización acertada de futuras estructuras.

Por otro lado, se sugiere poner en marcha la elaboración de planes de contingencia respecto de la probable interrupción de las rutas, fundamentalmente hacia el norte donde la ruta nacional 60 se dirige hacia el paso internacional Mamuil Malal (ex Tromen).

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CEMBRANO, J. Y A. LAVENU, 1997.  
Coeval Transpressional and Trantensional magmatic arc tectonic in the Southern Andes. *Actas 8º Congreso Geológico Chileno Volumen III: 1613-1616. Antofagasta.*
- CHACÓN J., IRIGARAY C. Y T. FERNÁNDEZ, 1994.  
Large to middle scale landslides inventory, analysis and mapping with modelling and assessment of derived susceptibility, hazards and risks in a GIS. *7th International IAEG Congress. Ed. Balkema (Rotterdam). Vol. VI, 4669-4678. Lisboa.*
- CORBELLA, H. Y M. S. ALONSO, 1989.  
Post-glacial hydroclastic and pyroclastic deposits in the Lanín National Park. North-Patagonian Cordillera, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, 44 (1-4): 127-132. Buenos Aires.*
- COROMINAS, J., 1987.  
Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera. *En: IGME (1987) Riesgos Geológicos, 193-201.*
- CRUDEN, D.M. Y D.J. VARNES, 1996.  
Landslides types and processes. *En: Landslides. Investigation and mitigation. Special Rep. 247. Transportation research Board, US National Council., Turner and Schuster Eds, 36-75 pp. Washington.*
- FOLGUERA, A. Y V.A. RAMOS, 2000.  
Control estructural del volcán Copahue (38°S-71°O): implicancias tectónicas para el arco volcánico cuaternario (36°-39°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina, 55 (3): 229-244. Buenos Aires.*
- FOLGUERA, A., RAMOS, V.A. Y D. MELNICK, 2002.  
Partición de la deformación en la zona del arco volcánico de la cordillera neuquina en los últimos 30 millones de años (36°-39°S). *Revista Geológica de Chile, 29 (2): 227-240. Santiago.*
- GONZÁLES DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C., 2002.  
Ingeniería Geológica. *En: Prevención de Riesgos Geológicos. Ferrer, M. Pearson educación, 607-613 pp. Madrid.*
- HALLER, M.J., 1981.  
Estructura y mineralización en la Cordillera Patagónica. *Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, 125 pp.*
- HERVÉ, M., 1976.  
Estudio geológico de la falla de de Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe. *Antecedentes de un movimiento transcurrente. 1º Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 1339-1356. Santiago.*

- LARA, L., 2003.  
Análisis cuantitativo del peligro volcánico: una aplicación en lahares del volcán Lanín (39°S), Andes del Sur.  
*Congreso Geológico Chileno*.
- LARA, L., 2004.  
Geología del Volcán Lanín, Región de la Araucanía.  
*Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica. Mapa escala 1:50000. 87 : 18. Santiago.*
- LARA, L., NARANJO, J. Y H. MORENO, 2004.  
Lanín volcano (39.5°S), Southern Andes: geology and morphostructural evolution.  
*Revista Geológica de Chile, 31 (2): 241-257. Santiago.*
- LARA, L. Y H. MORENO, 2004.  
Geología del área Liquiñe-Neltume. Servicio Nacional de Geología y Minería,  
*Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica. Mapa escala 1:50000. 83. Santiago.*
- LARA, L.E., RODRIGUEZ, C., MORENO, H. Y C. PÉREZ DE ARCE, 2001.  
Geocronología K-Ar y geoquímica del volcanismo plioceno superior- pleistoceno de los Andes del Sur (39°-42° Sur).  
*Revista Geológica de Chile, 28 (1): 67-90. Santiago.*
- LAVENU, A., CEMBRANO, J., ARANCIBIA, G., DERUELLE, B., LÓPEZ ESCOBAR, L. Y H. MORENO, 1997.  
Neotectónica tranpresiva dextral y volcanismo, falla Liquiñe Ofqui, sur de Chile.  
*Actas 8º Congreso Geológico Chileno, 1: 129-133. Concepción.*
- LÓPEZ, L., CEMBRANO, J. Y H. MORENO, 1995.  
Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic quaternary volcanism (37°-46°S).  
*Revista Geológica de Chile, Vol. 22, No. 2: 219-234. Santiago.*
- MANCINO, C., 2007.  
Geomorfología y peligros geológicos en las márgenes del Lago Huchulafquen, Paimún y Epulafquen, Parque Nacional Lanín, Provincia de Neuquén.  
*Trabajo final de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires (inédito). Buenos Aires.*
- RABASSA, J., EVENSON, E., CLINCH, J., SCLIEDER, G., ZEITLER, P. Y G. STEPHENS, 1990.  
Geología del cuaternario del valle del río Malleo, Provincia del Neuquén.  
*En Revista de la Asociación Geológica Argentina, 45 (1-2): 55-68. Buenos Aires.*
- SALMINCI, J.G., 2007.  
Flujos Rápidos y Peligro Geológico: Estudio del Volcán Lanín.  
*Trabajo Final de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires (inédito). Buenos Aires.*
- TURNER, J.C.M., 1973.  
Junín de los Andes, Provincia de Neuquén.  
*Carta Geológica de Argentina 37 a, b, escala 1:200.000. Boletín de la Dirección Nacional de Geología y Minería. 138. Buenos Aires.*
- UNDRO, 1979.  
Natural Disasters and Vulnerability Analysis,  
*Report of Experts Group Meeting, Geneva.*







## Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal

## Landslides: classification, description and temporal and spatial evolution

Chacón, José ✉

Recibido: 14 de Marzo de 2012 • Aceptado: 19 de Abril 2012

### Resumen

*La clasificación de movimientos de ladera, su identificación y el análisis de su progresión desde la fase preparatoria hasta el agotamiento del movimiento requiere del empleo de conceptos relativos al tipo de movimiento, su tamaño y velocidad, la morfología de la vertiente inestable y de la masa movilizada definidos por parámetros geomórficos relativos al despliegue espacial del movimiento, así como los relativos a la evolución espacial o temporal como la intensidad, capacidad destructiva, actividad y la diacronía. Se presenta un procedimiento integrado para la aplicación de tales conceptos, sea a partir de las propuestas de la Comisión del Inventario Mundial de Movimientos de Ladera organizada por la UNESCO, o bien por contribuciones de diferentes autores internacionales y aportaciones del autor. Se definen y describen tales conceptos, y se muestra un ejemplo de aplicación práctica a un caso de estudio, así como se ofrecen resultados obtenidos en las investigaciones sobre movimientos de ladera en la Cordillera Bética del sur de España.*

**Palabras clave:** *movimientos de ladera, clasificación, identificación, parámetros morfológicos, tamaño, velocidad, grado de desarrollo, intensidad, capacidad destructiva, actividad y diacronía.*

### Abstract

*The classification, identification and analysis of the progressive development of landslides, from the preliminary to the final stage, requires the use of concepts concerning the type of slope movement, the size and velocity of the mass, the morphology of the unstable slope and mobilized mass relative to the spatial landslide distribution as defined by geomorphic concepts of spatial and temporal evolution as the landslide degree of development, intensity, destructive capacity, activity and diachroneity. In this paper an integrated procedure is presented for the application of such concepts, either resulting from the UNESCO Worldwide Landslide Inventory, from international contributions of different authors and results from the author's researches. Such concepts are here introduced and described, with an example of practical application to a study case and related comments about results obtained from researches on landslides in the Betic Cordillera in the South of Spain.*

Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Granada, España

✉ jchacon@ugr.es

**Keywords:** *landslides: classification, identification, morphological parameters, size, velocity, degree of development, intensity, destructive capacity, activity and diachroneity.*

## INTRODUCCIÓN

El relieve físico de la Tierra, desde el punto de vista de su justificación mecánica, expresa un determinado momento del balance continuo y cambiante entre las fuerzas impulsadas por acciones gravitatorias que conducen al arrasamiento del paisaje, y la resistencia que los suelos y macizos rocosos oponen a ser movilizadas. La movilización se produce mediante procesos de meteorización física y química, bajo la acción de los cambios térmicos, lluvia y el viento, todo ello alimentando un proceso erosivo que afecta a volúmenes enormes de partículas y produce el modelado del relieve.

Aquí nos interesaremos, sin embargo por el modelado en masa del relieve mediante los movimientos gravitatorios que se engloban dentro de los términos *movimientos o deslizamientos de laderas y taludes*, en función de que afecten a superficies inclinadas naturales (laderas) o artificiales (taludes). El término *deslizamiento de tierras*, traducción literal del muy extendido en inglés "landslide", es un término general que comprende los diferentes tipos de movimientos de ladera y no debe confundirse con el término *deslizamiento*, que define uno de los tipos particulares de movimiento, por lo que, en su lugar, emplea el término *movimiento de ladera*.

Desde el punto de vista mecánico los tres tipos básicos de movimientos (Figuras 1 y 2), *caídas, deslizamientos y flujos*, se diferencian entre sí al estar los dos primeros relacionados con roturas del terreno dentro del dominio de comportamiento frágil, mientras que el tercero, los flujos, se asocia a deformaciones desarrolladas preferentemente en el dominio plástico o viscoso. Las caídas y deslizamientos se diferencian entre sí porque en los primeros hay una rotura, frágil generalmente, que delimita un bloque de cualquier tamaño seguida después una trayectoria libre

desde el origen hasta el punto de reposo, mientras que en los segundos el desplazamiento se produce sobre una superficie plana o cilíndrica.

La clasificación de los tipos de movimientos de ladera, ha sido objeto de numerosos trabajos, aunque destacan los de *Varnes, (1978); Hutchinson (1988), Cruden y Varnes, (1996)*; y en España las de *Corominas y García Yagüe, (1997)* o *Chacón (2003a, b; 2008)*. Los criterios relativos a la geometría y dinámica de los movimientos se exponen de acuerdo con *Chacón (2003 a,b), Chacón et al, (1996), y WP/WLI. (1990, 1993a, 1993b)* a partir de una experiencia de 30 años de investigaciones sobre movimientos de ladera en la Cordillera Bética del Sur de España. Se emplearán los términos *movimientos de masa, ladera o talud o deslizamientos de tierras* (landslide) para referirse, en general, a todos los tipos de movimientos.

### Tipos de movimientos de ladera

La Figura 2 resume la clasificación de las principales tipologías de movimientos de masa (*Chacón, 2008*). La Figura 3 ofrece la terminología del Glosario Internacional de Deslizamientos de Tierras (*WP/WLI, 1993b*)

Los movimientos básicos presentes en las diferentes tipologías son:

**Caída:** movimiento de descenso vertical desde una posición inicial que incluye el choque y el rebote a lo largo del mismo, hasta alcanzar una posición de reposo. El término "avalancha" se suele emplear para indicar caídas o desprendimientos masivos y simultáneos de grandes volúmenes de fragmentos de rocas o suelos compactos; igualmente se emplea para otros movimientos rápidos de carácter masivo, como algunos casos de flujos de derrubios o deslizamientos planares en fuertes pendientes.

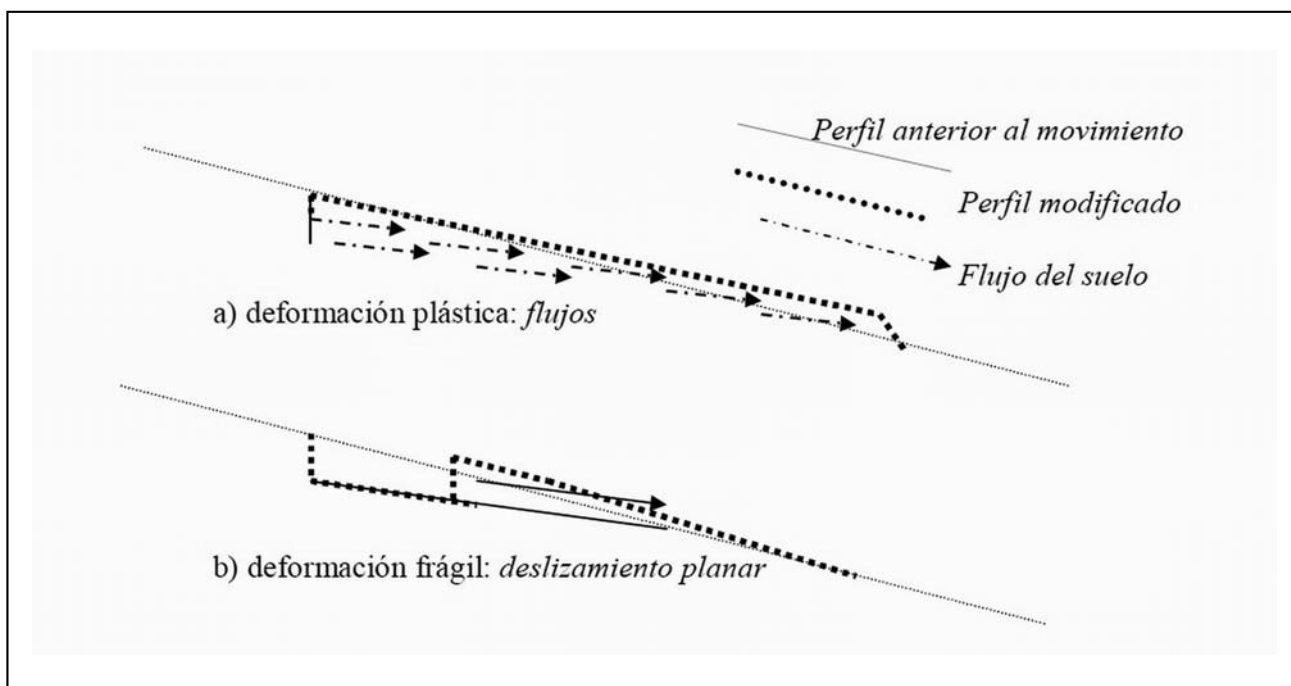


Figura 1. a) Rotura plástica progresiva hacia arriba al aumentar la plasticidad. Cada punto de la masa se desplaza más que el situado inicialmente por debajo. La deformación es íntima en la masa que cambia de forma; b) Rotura frágil de un bloque de suelo cohesivo o roca. Cada punto se desplaza igual cantidad que todos los contenidos en el bloque. La deformación se produce en el plano de rotura y no afecta al interior de la masa que no cambia de forma.

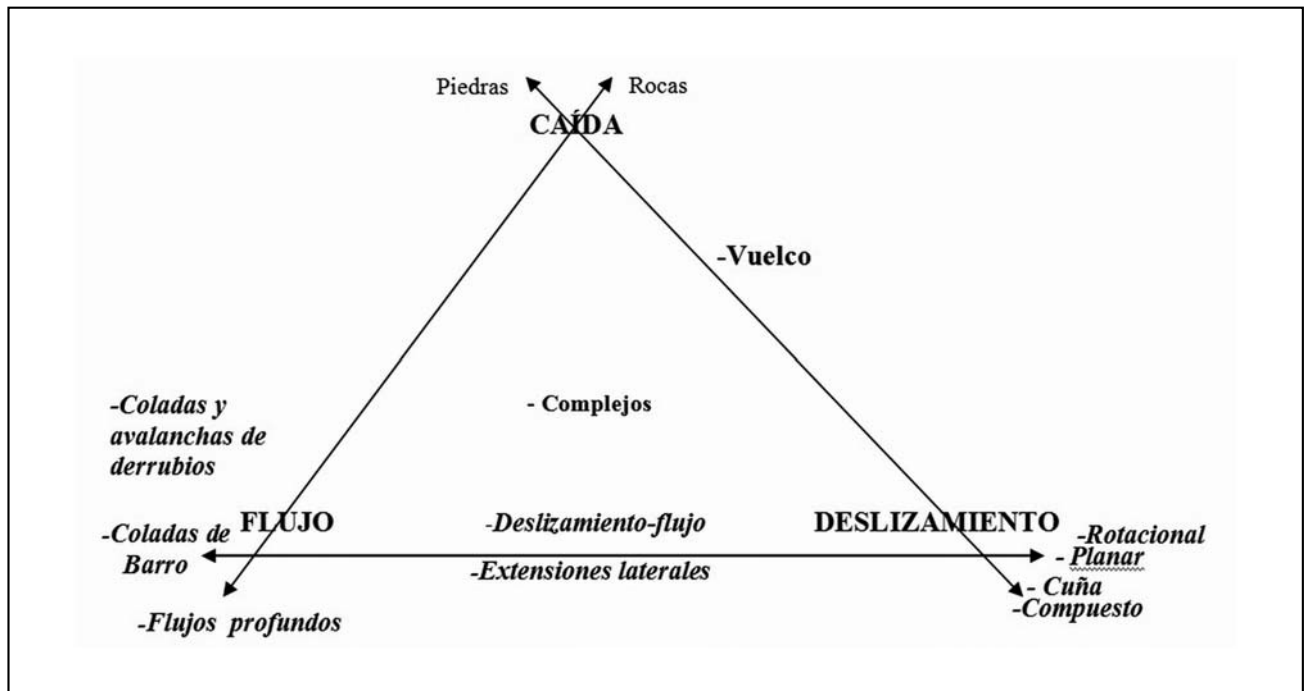


Figura 2. Esquema de clasificación de movimientos de ladera (Chacón, 2008). Los tres tipos básicos en mayúscula y los movimientos resultantes según el material (suelo granular, cohesivo o macizo rocoso) y sus combinaciones.

**Flujo:** respuesta plástica o semiviscosa de suelos geotécnicos o macizos rocosos por desplazamientos relativos entre partículas en ausencia de esfuerzos, con un gradiente de velocidad generalmente decreciente en profundidad hasta desaparecer. Puede producirse en macizos rocosos montañosos y afectar espesores importantes a velocidades lentas o muy lentas. Más frecuentemente afecta a suelos en condiciones muy superficiales y en relación con cambios en la presión de poros y en la consistencia de la fracción fina. La viscosidad de la masa decrece desde los flujos de tierra a las coladas de barro, lo que se expresa en la consistencia de la masa y en la morfología que adoptan en el relieve. Las coladas de derrubios pueden incluir una proporción muy elevada de agua lo que permite que alcancen velocidades rápidas en su propagación por barrancos o cauces en la forma de masas de bloques de rocas, piedras, barro, troncos de árboles y masas de vegetación en un frente que inunda y arrasa el territorio a su paso.

**Deslizamiento:** deformación frágil de masas coherentes de suelos geotécnicos o macizos rocosos por el desplazamiento de la masa sobre una superficie plana, cilíndrica o compuesta, sin que se involucre necesariamente ninguna deformación íntima de la masa. Da lugar a deslizamientos planares, rotacionales y compuestos. Las cuñas de roca son deslizamientos planares entre discontinuidades convergentes. Los vuelcos involucran deslizamiento de capas y rotación hacia la cara libre del talud.

En cualquier caso la rotura circular que subyace a un deslizamiento rotacional viene determinada por la deformación de formaciones homogéneas desde el punto de vista mecánico. Cuando las propiedades resistentes son invariables con la dirección del esfuerzo considerado, la solución de rotura es igualmente isotropa y por lo tanto se dispone en la forma cilíndrica característica de los deslizamientos rotacionales. Sin embargo cuando la unidad litológica presenta alternancias de tramos con resistencia variable o discontinuidades, en el caso de los

macizos rocosos, es más frecuente la rotura plana a través de las superficies menos resistentes de la unidad. Dado que en la naturaleza abundan menos las unidades litológicas netamente isotropas en sus propiedades resistentes, en general, son más abundantes los deslizamientos planares que los rotacionales, si bien también se producen combinaciones entre ambos tipos de movimientos.

**Colapsos:** deformaciones que afectan a taludes y laderas en macizos rocosos y suelos cohesivos por las que se combinan el inicio de un deslizamiento y un desplazamiento súbito o muy rápido de caída hasta una posición de reposo, sin que necesariamente esté determinado por la presencia de discontinuidades desfavorables.

**Vuelcos:** deformaciones en macizos rocosos afectados por discontinuidades muy inclinadas hacia el interior del talud por las que las capas deslizan entre sí y rotan hacia la cara libre provocando caídas o desprendimientos de bloques.

**Complejos:** deformación del talud o la ladera producida por la combinación simultánea y/o sucesiva de algunos de los diferentes tipos de los movimientos básicos anteriores a lo largo del período activo del movimiento. Generalmente asociado a movimientos de magnitud considerable del tipo de los deslizamientos menos superficiales y mayor volumen de masa. Combinaciones entre deslizamiento planar y flujo, e incluso entre una fase inicial de deslizamiento rotacional y una propagación de la masa por deslizamiento planar y fluencia de la masa son frecuentes en formaciones geológicas compuestas por tramos con plasticidad variable. Se han observado también desprendimientos de rocas que dan lugar a la movilización de las formaciones sobre las que se acumula la masa de rocas desprendidas mediante fluencia dando lugar a coladas de derrubios. Este tipo de movimientos complejos son activados por terremotos y/o lluvias.

La **extensión lateral** consiste en el lento desplazamiento de una masa más o menos rígida de terreno sobre un sustrato plástico paralelamente a las fracturas que delimitan bloques de la masa rígida. Durante los desplazamientos los bloques pueden experimentar hundimientos o vuelcos relativos respecto a la posición inicial.

Los movimientos de laderas y taludes, con frecuencia, son difíciles de clasificar correctamente, es fácil por ejemplo confundir un deslizamiento planar y rotacional, o bien un flujo de tierras con un deslizamiento planar, sin una observación muy detallada de sus características.

**Magnitudes, formas del relieve, velocidad, actividad y grado de desarrollo**

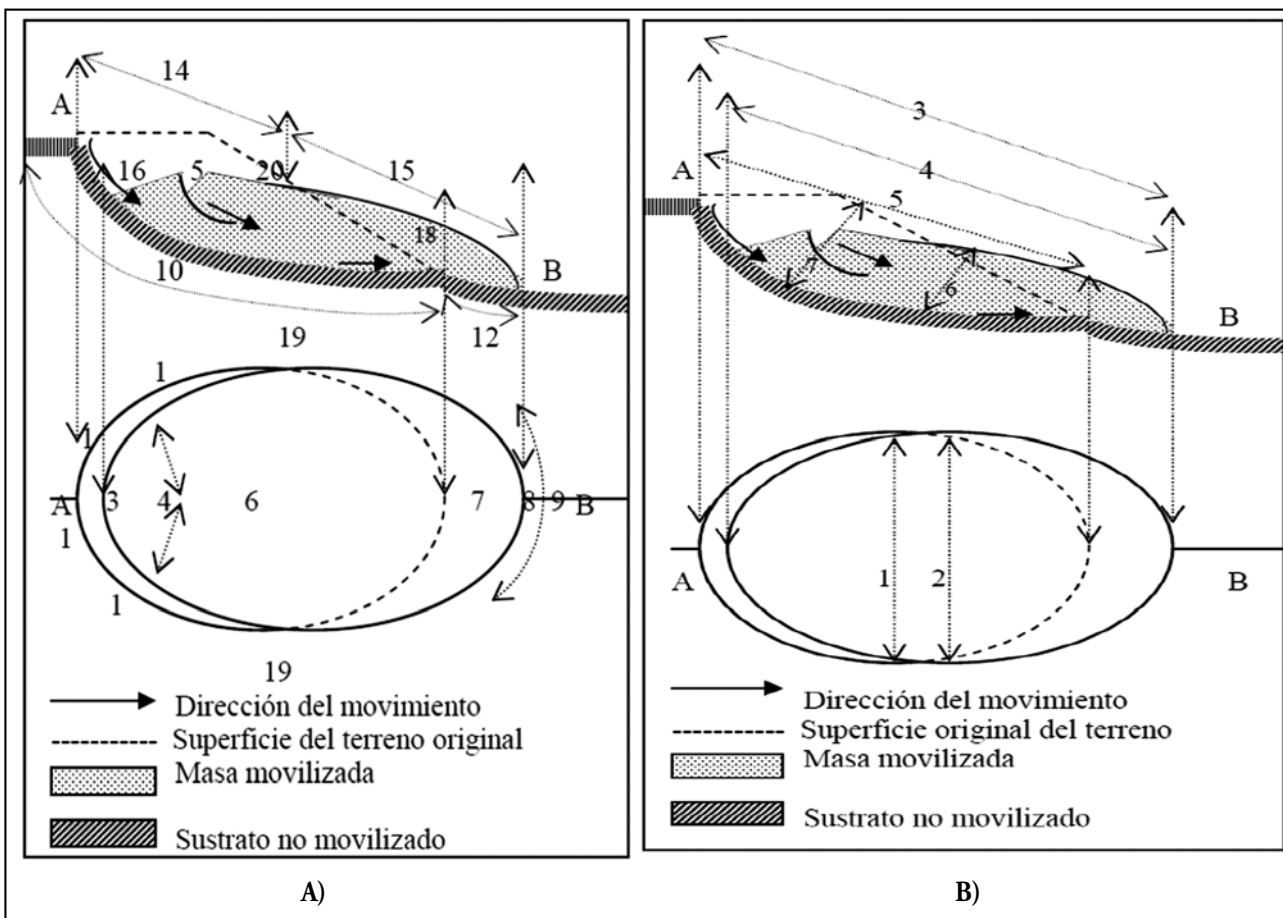
Las **magnitudes** de las masas movilizadas son muy variables y las clasificaciones propuestas dependen de su finalidad. Así una propuesta para movimientos asociados a trazados viarios se presenta en la Tabla 1, mientras que la Tabla 2 ofrece otra aplicable a movimientos de ladera identificados en relieves naturales. Obsérvese que la clase "Excepcionalmente grande" en Tabla 1, corresponde a la magnitud 4 (Mediana) en la clasificación de *Fell (1994)* de la Tabla 2.

**Tabla 1. Clasificación de tamaños de masas movilizadas según Rodríguez Ortiz et al. (1978).**

Tamaño	Volumen (m <sup>3</sup> )
Pequeña	1 -50
Moderada	50 - 5x10 <sup>2</sup>
Grande	5x10 <sup>2</sup> - 5x10 <sup>3</sup>
Muy grande	5x10 <sup>3</sup> - 5x10 <sup>4</sup>
Excepcionalmente grande	>5x10 <sup>4</sup>

**Tabla 2. Clasificación de magnitudes de los movimientos de ladera según Fell (1994).**

Magnitud	Descripción	Volumen (m <sup>3</sup> )
7	Extremadamente grande	> 5 x 10 <sup>6</sup>
6	Muy grande	1x10 <sup>6</sup> - 5x10 <sup>6</sup>
5	Grande	25x10 <sup>4</sup> - 1x10 <sup>6</sup>
4	Mediana	5x10 <sup>4</sup> - 25x10 <sup>4</sup>
3	Pequeño	5x10 <sup>3</sup> - 5x10 <sup>4</sup>
2	Muy pequeño	5x10 <sup>2</sup> - 5x10 <sup>3</sup>
1	Extremadamente pequeño	<5x10 <sup>2</sup>



**Figura 3. Terminología descriptiva general de los movimientos de ladera, a) terminología del Glosario multilingüe, modificada a partir de WP/WLI (1993a, b); b) terminología de las dimensiones recomendadas en el Glosario multilingüe modificada a partir de WP/WLI (1993a, b) y Cruden and Lefevre (1994).**

### Formas del relieve asociadas a los movimientos de ladera

La morfología de los movimientos de ladera tiene como principal referencia la terminología descriptiva del "Landslide multilingual glossary" (WP/WLI, 1993b; Cruden and Lefevre, 1994). Los elementos morfológicos fundamentales para la descripción de los movimientos de ladera, de acuerdo con la Figura 3 A y B, se relacionan a continuación.

En la Figura 3A (WP/WLI, 1993a, b y Cruden and Lefevre, 1994) se distinguen los siguientes elementos del movimiento de ladera:

1. Coronación; 2. Escarpe principal; 3. Techo; 4. Cabeza; 5. Escarpe menor; 6. Masa principal; 7. Pie; 8. Punta; 9. Dedo; 10. Superficie de rotura; 11. Dedo de la superficie de rotura; 12. Superficie de separación; 13. Material desplazado; 14. Zona de remonte o agotamiento; 15. Zona de acumulación; 16. Desmonte; 17. Masa desmontada o desplazada; 18. Acumulación; 19. Flanco; 20. Superficie original del terreno.

En la Figura 3B (WP/WLI, 1993a, b; Cruden and Lefevre 1994), se muestran los parámetros o dimensiones más relevantes:

1. Anchura de la masa desplazada  $W_d$ . 2. Anchura de la Superficie de Rotura  $W_r$ . 3. Longitud total  $L$ ; 4. Longitud de la masa desplazada  $L_d$ ; 5. Longitud de la Superficie de Rotura  $L_r$ . 6. Profundidad de la masa desplazada.  $D_d$ ; 7. Profundidad de la superficie de rotura  $D_r$ .

### La velocidad de los movimientos de ladera.

Los tres tipos de rotura antes descritos (Figuras 2 y 3) involucran mecanismos de desplazamiento o propagación de la masa movilizada que permiten rangos variables de velocidades como las que se describen en la Tabla 3. La clasificación de la

Tabla 4 relaciona la velocidad con los tipos de daños que se pueden esperar en los elementos del territorio afectados.

Se ha de entender que estructuras construidas sobre movimientos extremadamente lentos pueden experimentar daños a medio plazo, por lo que se debe controlar su emplazamiento, así como la actividad del movimiento de ladera. En general, las mayores velocidades se alcanzan en avalanchas de hielo, nieve y rocas en alta montaña en masas moderadas o superiores. Las más lentas en suelos, conocidas como velocidades de reptación, se asocian a pequeñas deformaciones en suelos, inducidas por la infiltración del agua y el reajuste volumétrico de las partículas del suelo durante ciclos de helada y deshielo. Suelen ir acompañadas por ciertas formas características como el desarrollo de "terracitas" o laderas escalonadas, además de texturas propias.

### Actividad, grado desarrollo, capacidad destructiva y diacronía de los movimientos de ladera.

Desde el punto de vista espacial y temporal el desarrollo de un movimiento de ladera, en las diferentes tipologías, desde su inicio a la finalización, suele producirse en diferentes etapas que pueden ser distinguidas particularmente cuando alcanzan cierta magnitud. Resulta conveniente disponer de criterios que permitan el seguimiento del proceso, tanto en lo referente al desarrollo de la masa movilizada y formas asociadas (grado de desarrollo) como a su actividad (régimen y secuencia de velocidades).

### La actividad de los movimientos de ladera

Describe la evolución de la inestabilidad o las etapas de evolución del movimiento desde la aparición precoz de deformaciones en el terreno, la delimitación del escarpe principal y de los escarpes menores, la delimitación de la masa movilizada y su propagación, hasta que se alcanza la estabilización o el agotamiento del proceso (Chacón, 2008).

Tabla 3. Velocidad de los movimientos, modificado a partir de Hansen (1989).

Clases	Velocidad (cm/seg)	otras unidades
Extremadamente rápida	> 300	>10 km/hora
Muy rápida	0.5 - 300	18 m/hora - 10 km/hora
Rápida	0.0017 - 0.5	1.5 m/día - 18 m/hora
Moderada	0.00006 - 0.0017	1.5 m/mes - 1.5 m/día
Lenta	0.000005 - 0.00006	1.5 m/año - 1.5 m/mes
Muy lenta	0.0000001 - 0.000005	0.03 - 1.5 m/año
Extremadamente lenta	< 0.0000001	< 0.03 m/año

Tabla 4. Clasificación de velocidades, ligeramente modificada a partir de la propuesta por la Comisión del inventario mundial de movimientos de ladera de la UNESCO (WP/WLI, 1995) para incluir intervalos de velocidades en varias unidades de medida.

Clase	Descripción	Intervalos (mm/seg)	Otras unidades	Tipos de daños (resumido)
1	Extremadamente rápida	> $5 \times 10^3$	> 5 m/s	Destrucción total de vidas y bienes
2	Muy rápida	50 - $5 \times 10^3$	3 m/min - 5 m/s	Evacuación difícil. Daños irreparables
3	Rápida	0.5 - 50	1.8 m/h - 3 m/min	Evacuación posible. Daños irreparables
4	Moderada	$5 \times 10^{-3}$ - 0.5	13 m/mes - 1.8 m/h	Daños intensos a estructuras en la masa
5	Lenta	$50 \times 10^{-6}$ - $5 \times 10^{-3}$	1.6 m/año - 13 m/mes	Frecuentes daños, reparación costosa
6	Muy lenta	$0.5 \times 10^{-6}$ - $50 \times 10^{-6}$	16 mm/año - 1.6 m/año	Daños escasos y/o reparables
7	Extremadamente lenta	< $0.5 \times 10^{-6}$	< 16 mm/año	Sin daños a estructuras adecuadas

Para la descripción de la actividad de los movimientos de ladera se tienen en cuenta tres tipos de conceptos independientes que permiten analizar la evolución como son los de estado, distribución y estilo (Tablas 5a,b y c, *WP/WLI, 1993a,b*).

El “estado de la actividad” indica si el movimiento es “activo” actualmente, o bien está “suspendido”, cuando ha sido activo en el último o últimos ciclos hidrológicos, pero no actualmente, o “dormido” tras la inexistencia prolongada de movimiento y “abandonado”, cuando desaparece la causa del movimiento, por ejemplo la erosión del pie remite por cambio del cauce del río. El movimiento queda “estabilizado” mediante tratamientos adecuados, o “relicto” si la inactividad se asocia a cambios de condiciones climáticas o geomorfológicas. Un movimiento es “reactivado”, cuando partes de la masa, del escarpe o de la vertiente, se movilizan después de un largo periodo de tiempo de inactividad.

La evolución del estado de actividad se describe proyectando el desplazamiento en unidades de longitud, frente al tiempo transcurrido, durante los diversos estados (*WP/WLI, 1993 a, b*). También se emplea el término “fósil” para referirse a movimientos antiguos recubiertos por sedimentos no deformados.

La “distribución de la actividad”, describe la zona o zonas de la masa, del escarpe, o de la vertiente, en movimiento, “en avance” o “en retroceso”, según se observe el crecimiento de la masa por el pie, o bien el retroceso o remonte del escarpe. El movimiento “se ensancha” cuando se aprecia el aumento lateral de la masa, por uno o ambos escarpes laterales, y cuando se forma un escarpe principal, sin superficie de rotura por el pie, la distribución es “confinada”. Incluye el término “creciente” para

movimientos que aumentan en dos o más direcciones, e indica que la masa puede mostrar “disminución” o simplemente mantenerse “en movimiento” sin patrón especial de distribución (*WP/WLI, 1993 a, b*).

El “estilo de la actividad” indica la contribución de diferentes tipos de movimientos a la evolución del conjunto de masa y escarpes. Es “complejo” cuando sucesivamente actúan al menos dos tipos, y será además “compuesto” si lo hacen simultáneamente. “Múltiple” si se aprecia la acumulación y repetición sucesiva y compartida de escarpes y masas de un determinado tipo de movimiento, o bien “sucesivo” cuando las masas de cada movimiento se desarrollan de manera independiente. Finalmente el estilo es “simple o único”, si masa y escarpe están bien delimitados (*WP/WLI, 1993 a, b*).

#### **La capacidad destructiva o intensidad, de los movimientos de ladera.**

Se define como relación entre masa movilizada y velocidad alcanzada, combina dimensiones espaciales y temporales (*Chacón, 2005; Chacón et al., 2006*). La Tabla 6 (*Chacón, 2008*) muestra 15 niveles de intensidad o capacidad destructiva a partir de la propuesta de intensidades de *Cardinali et al., (2002)*. La finalidad de la clasificación es meramente orientativa ya que, evidentemente, los daños que finalmente resultan de la actividad de un movimiento de ladera dependerá de la presencia de elementos del territorio en su curso, aunque la escala indica el incremento de la capacidad destructiva en función del volumen (podría establecerse igualmente en torno a valores de masa) y la velocidad.

**Tabla 5. Descripción de la actividad de los movimientos de ladera a) Estado, b) Distribución y c) Estilo. (WP/WLI, 1993a,b)**

<b>a) Estado</b>	<b>b) Distribución</b>	<b>c) Estilo</b>
Activo	En avance	Complejo
Reactivado	En ensanche	Compuesto
Suspendido	En retroceso	Múltiple
Inactivo: Dormido	Confinada	Sucesivo
Abandonado	Creciente	Simple o único
Estabilizado	En disminución	
Relicto	En movimiento	

**Tabla 6. Clasificación de intensidades de los movimientos de ladera de Cardinali et al., (2002) modificada por Chacón (2008).**

<b>M = f(volumen, velocidad)</b>	<b>VELOCIDAD (estimada)</b>		
	<b>Movimiento rápido</b>		<b>Lento</b>
	<b>Caída de rocas</b>	<b>Flujo de derrubios</b>	<b>Deslizamiento</b>
<0,001	DÉBIL (1)		
<0,5	MODERADA (2)		
>0,5-500	ALTA (5)	MODERADA (2)	MODERADA (2)
500-10,000	ALTA (6)	MODERADA (4)	MODERADA (3)
10,000-500,000	MUY ALTA (10)	ALTA (9)	ALTA (7)
>500,000	MUY ALTA (12)	MUY ALTA (11)	ALTA (8)
>>500,000	MUY ALTA (15)	MUY ALTA (14)	MUY ALTA (13)

Tabla 7. Evolución de los movimientos de ladera (Chacón et al, 1996).

FASE	DESARROLLO	ACTIVIDAD	CONSECUENCIAS
<b>Preparatoria o Incipiente</b>	Poco apreciable. Cambios en manantiales, Fuentes, abombamientos Locales, grietas de tracción en cabecera. Duración imprevisible	Activo, velocidad lenta a rápida. Intermitente o permanente. Puede ser inactivo largo tiempo antes de reactivarse	Daños lineales por las grietas en estructuras afectadas. Roturas de estructuras, tuberías e infraestructuras afectadas por grietas de tracción.  Alto potencial según magnitud de la masa y distancia a zona de reposo.
<b>Inicio</b>	Apreciable: ruidos, abombamientos, extensión lateral de las grietas que delimitan desde coronación al pie. Hundimientos locales. Escarpe perimetral, destacado en cabecera y escarpes menores en la masa. Inicio del frente de acumulación de depósitos. Duración, progresión y continuidad variables	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua.  Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Daños mayores en zonas del borde de la masa y algunos sobre el interior a lo largo de escarpes menores, frente y grietas transversales o longitudinales.  Potencial de daños muy alto según magnitud de la masa y distancia a zona de reposo
<b>Desarrollo</b>	Despliegue del escarpe de cabecera y avance de la masa ladera abajo. Basculamiento hacia adentro del talud visible (rotacional) o no (traslacional) en cabecera de la masa y elevación hacia el pie. Duración, progresión, continuidad, variables.	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua.  Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Se extienden a toda la masa movilizada y a las zonas situadas bajo el frente y en la trayectoria de la masa.  Potencial destructivo limitado a la trayectoria posible hasta la zona de reposo y la posible extensión ladera arriba por remonte de la cabecera.
<b>Avanzado</b>	Desarrollo del escarpe principal y despliegue de escarpes menores y de la masa ladera abajo. Posible remonte del escarpe principal ladera arriba. Duración, progresión y continuidad variables	Activo, velocidad muy variable y no siempre continua. Puede detenerse y permanecer inactivo largo tiempo antes de la reactivación o permanecer dormido indefinidamente.	Se agravan en toda la masa movilizada y en las zonas situadas bajo el frente y en la trayectoria de la masa.  Potencial destructivo limitado a la trayectoria posible hasta la zona de reposos y la posible extensión ladera arriba por remonte de la cabecera.
<b>Agotamiento</b>	Masa acumulada en zona de reposo y reducción de la pendiente media.  Derrumbe de bloques en escarpes menores y cabecera.	Poco activo. Reactivación posible por obras civiles o por erosión o excavación de ríos, terremotos o explosiones.	Peligrosidad para transeúntes por derrumbes en toda la masa, depósitos y escarpes. Potencial menor salvo reactivaciones parciales por obras, terremotos, erosión, inundaciones o explosiones. Reajustes parciales en los bloques y movimientos verticales asociados.



### ***El grado de desarrollo de los movimientos de ladera***

El concepto describe las diferentes fases que se suceden desde el planteamiento de la condición inestable y su manifestación en la vertiente hasta la concreción del movimiento y el proceso de movilización hasta el agotamiento final o su estabilización (Tabla 7, *Chacón et al., 1996*).

Aunque en la práctica la mayor parte de los movimientos de ladera solamente alcanzan un determinado grado de desarrollo y quedan detenidos sin avanzar más, algunos, de cierta magnitud, permiten distinguir todas las fases que se describen en la Tabla 7. En ella se incluyen también los daños potenciales asociables a cada fase, así como el cortejo de forma o cambios que los caracteriza.

En cuanto al nivel de daños producido por los movimientos de ladera, se materializa desde la fase preparatoria con las primeras deformaciones o grietas de tracción cuando elementos rígidos tales como estructuras de edificación, obra civil o infraestructuras se disponen sobre el terreno incurso en el proceso de inestabilidad. En el caso de las zonas urbanizadas los daños sobre las viviendas pueden ser graves ya desde la fase inicial.

Son frecuentes los procesos de inestabilidad que se detienen en una fase preparatoria o apenas inicial sin delimitación de la masa, y sin que se aprecie progreso posterior.

### ***Diacronía de los movimientos de ladera.***

El término “*diacronía*”, formado por el prefijo griego *dia-* a través de- y la palabra griega *Khrónos* -tiempo-, significa “el desarrollo o sucesión de hechos a través del tiempo”. El término opuesto es *sincronía*, referido a la observación de cualquier fenómeno -cultural o lingüístico- “tal como sucede en un momento dado de su evolución”. Se emplea en lingüística, historiografía o antropología, con el sentido indicado, para estudiar la evolución de las formas de comunicación verbal, los procesos históricos o la evolución antropológica a través del tiempo (*Chacón, 2008*).

Para las ciencias de la tierra, el término *diacronía* está vinculado al de transgresión estratigráfica o sedimentaria.

De hecho se define como “*diacrona*” a cualquier formación estratigráfica o unidad rocosa que varía en edad para áreas diferentes, o que corta las isócronas o zonas biostratigráficas, es decir son “*diacronas*” las formaciones transgresivas en el tiempo.

Los movimientos de ladera, por su propia naturaleza, inducen *diacronía* cuando cambian la posición de una masa de terreno en el espacio y el tiempo durante la etapa de propagación. Con frecuencia son casi instantáneos, monocrónicos, pero también se propagan durante horas, años o siglos y así alcanzan un desarrollo diacrónico. La identificación en el tiempo de la edad de inicio, en una escala temporal de cuatro intervalos, y de la duración, de su propagación o grado, en doce intervalos, entre los casi instantáneos y los que duran más de 5000 años, se presenta en la Tabla 8, (*Chacón, 2008*). Aunque, desde el punto de vista espacial y temporal, la *diacronía* de los movimientos de ladera es variable, se identifican dos grandes grupos: *movimientos monocrónicos* y *movimientos diacrónicos* (*Chacón, 2008*).

*Movimientos monocrónicos* son los desarrollados en un intervalo temporal y espacial discreto y definido, interrumpiendo después la movilidad con carácter definitivo. Corresponden a movimientos de todos los tamaños, especialmente los de volumen pequeño y moderado, disminuyendo la frecuencia con el aumento de volumen. Una vez producido el movimiento, la masa no está en disposición de mantener desplazamientos posteriores generalmente porque lo impide la posición topográfica alcanzada en la base de la vertiente.

*Movimientos diacrónicos* son los que se desarrollan con una sucesión de intervalos temporales que se prolongan en el tiempo, con duración entre semanas y miles de años, alternando periodos de actividad variable, sin que, frecuentemente, sea posible establecer si la movilidad ha finalizado con carácter definitivo. Implican la persistencia de la inestabilidad gravitatoria a lo largo de un considerable intervalo de tiempo, sin que sean desmontados por la erosión o fijados por la vegetación, por lo que incluyen movimientos de tamaños “grande” a “excepcionalmente grande”, en los que las masas pueden propagarse a lo largo de vertientes con suficiente longitud disponible para la propagación antes de alcanzar la base del valle o el cauce fluvial.

**Tabla 8. Edad y Grado de Diacronía de los movimientos de ladera (Chacón, 2008; Chacón et al., 2010).**

#### *Escala de Edad:*

Contemporánea (1900-actualidad); Histórica (0- 1900); Hiperhistórica (< 0 AC).

#### **Grado de Diacronía:**

<b>Grado</b>	<b>Diacronía(años)</b>	<b>Equivalencia</b>	<b>Ejemplos</b>
I	0 - 10 <sup>-7</sup>	0 - 3 s	Caídas y desprendimientos de rocas o suelos
II	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-6</sup>	3s - 3m	Deslizamiento de rocas de Frank (Canadá, 1903)
III	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>	3 - 53m	Avalancha de Huascarán (Perú, 1970)
IV	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-2</sup>	53m-4d	Flujos de barro de Monachil (España, 1924)
V	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-1</sup>	4 - 36 d	Flujo de Olivares (España, 1986)
VI	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>0</sup>	36d - 1 año	Flujo de Riogordo (España, 1971)
VII	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>1</sup>	1 - 10 años	Deslizamiento de Torvizcón (España, 1996)
VIII	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup>	10 - 100 años	Deslizamiento de Almegíjar (España, 1996)
IX	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	100 - 1000 años	La Grieta de Benamejí (España, 1730-2001)
X	10 <sup>3</sup> - 2x10 <sup>3</sup>	1000 - 2000 años	Deslizamiento-flujo de Slumgullion (USA)
XI	2x10 <sup>3</sup> - 5x10 <sup>3</sup>	2000 - 5000 años	Deslizamiento-flujo de Man Tor (UK)
XII	> 5x10 <sup>3</sup>	> 5000 años	Rincon Mountain Landslide (USA)

Los movimientos *monocrónicos* engloban a la mayor parte de los movimientos de ladera y recorren un determinado itinerario entre el escarpe de salida y la posición de reposo, en un plazo temporal limitado entre segundos y días, sin que se aprecie o, frecuentemente, no sea posible esperar un movimiento posterior de la masa, independientemente de que otras nuevas masas sean suministradas por el remonte de la inestabilidad sobre el escarpe de salida. No aparecen encajados en el relieve como elementos dinámicos permanentes, sino que modifican el relieve inicialmente para ser sometidos después, como elementos pasivos, a los procesos del modelado característicos de la región.

El tiempo de desarrollo de los movimientos *monocrónicos*, su magnitud o tamaño son variables, si bien se desencadenan en un determinado intervalo temporal, entre segundos y excepcionalmente meses, antes de interrumpir definitivamente su evolución dinámica. Se asocian a los valores inferiores de la escala de tamaños observable y, entre ellos predominan los movimientos superficiales, es decir con espesores que no superan los diez metros. Sin embargo sus consecuencias pueden ser muy elevadas, especialmente cuando afectan a zonas urbanas densamente pobladas en climas lluviosos.

Los movimientos *diacrónicos* determinan en el relieve condiciones de inestabilidad que se prolongan durante centenares o miles de años, al involucrar masas de tamaño “grande” a “excepcionalmente grande”, de materiales suficientemente coherentes para no disgregarse a corto plazo por efecto de la erosión, no ser fijadas en su posición topográfica por el crecimiento de la vegetación y, en consecuencia, mantener la búsqueda del equilibrio a lo largo del tiempo mediante formas sucesivas del relieve en periodos activos continuos, discontinuos y con velocidades igualmente variables. Generalmente, por lo tanto, se trata de movimientos muy lentos en macizos rocosos o en masas de suelos en volúmenes excepcionalmente grandes, que se mantienen bajo condiciones de humedad que permiten la persistencia en el tiempo de la consistencia plástica de la masa.

A menudo la dinámica de un *movimiento diacrónico* evoluciona dentro del rango de velocidades lentas a extremadamente lentas, por lo que la observación directa en plazos temporales de años puede no reflejar con claridad el movimiento en curso. Sin embargo, el empleo de técnicas actuales de teledetección mediante interferometría diferencial de imágenes radar (*DInSAR*, Fernández et al., 2009) permite medir la velocidad del movimiento en términos de hundimiento subvertical (en el sentido de la incidencia de las emisiones del sensor de radar) en magnitudes de milímetros por año.

En cualquier caso, el *grado de diacronía* o duración de los movimientos de ladera es muy variable. La Tabla 8 (Chacón, 2008; Chacón et al., 2010) propone un sistema de clasificación de la evolución temporal de los movimientos de ladera basada en la definición de la *escala de edad* y el *grado de diacronía* de los procesos de movilización de vertientes.

La *escala de edad* del inicio de los movimientos, se refiere a la fecha precisa o aproximada, entorno temporal, en que se inició el movimiento.

La *escala contemporánea* incluye a los que, de acuerdo con la documentación disponible, se desencadenaron en los siglos XX y XXI. Son los movimientos que suceden en la actualidad, así como todos los que han sucedido o han mantenido actividad en los últimos cien años. En general son los movimientos mejor documentados estudios, informes gráficos o descriptivos,

o memorias de diverso género. La información suele referirse a las fases del inicio y comienzo de la propagación o desarrollo del movimiento, ya que generalmente las fases previas, de preparación precursoras del inicio, pasan desapercibidas en la mayoría de los casos.

La *escala histórica* incluye los movimientos que pueden ser documentados a partir de técnicas historiográficas convencionales, dentro del periodo de los últimos 2.000 años, a través de documentos, evidencias directas o informes, dataciones radiométricas, estudio de líquenes o dendrocronología.

La *escala hiper-histórica* engloba el periodo anterior, con edades superiores a 2.000 años, establecidas a partir de evidencias geológicas o geomorfológicas, arqueológicas o dataciones radiométricas.

Con frecuencia no es posible disponer de un dato geocronológico o histórico real que muestre claramente la fecha o edad de inicio de un movimiento de ladera dado. Sin embargo sí puede ser posible determinar una edad aproximada o la época en la cual se debió producir a partir de datos referentes al desarrollo urbano o a la edad de las construcciones del entorno, o a informaciones procedentes de los propietarios o cronistas de la zona. En estos casos, aunque no se pueda concretar la edad del movimiento, si será posible atribuir el movimiento a uno de los periodos de edad propuestos en la Tabla 8.

El *grado de diacronía* indica la duración del movimiento de ladera, desde la fase preparatoria o inicio a su estado final o la actualidad.

Los movimientos *monocrónicos* tienen una duración de segundos o minutos, antes de alcanzar una configuración definitiva, y se asocian a los grados I a II, y eventualmente III.

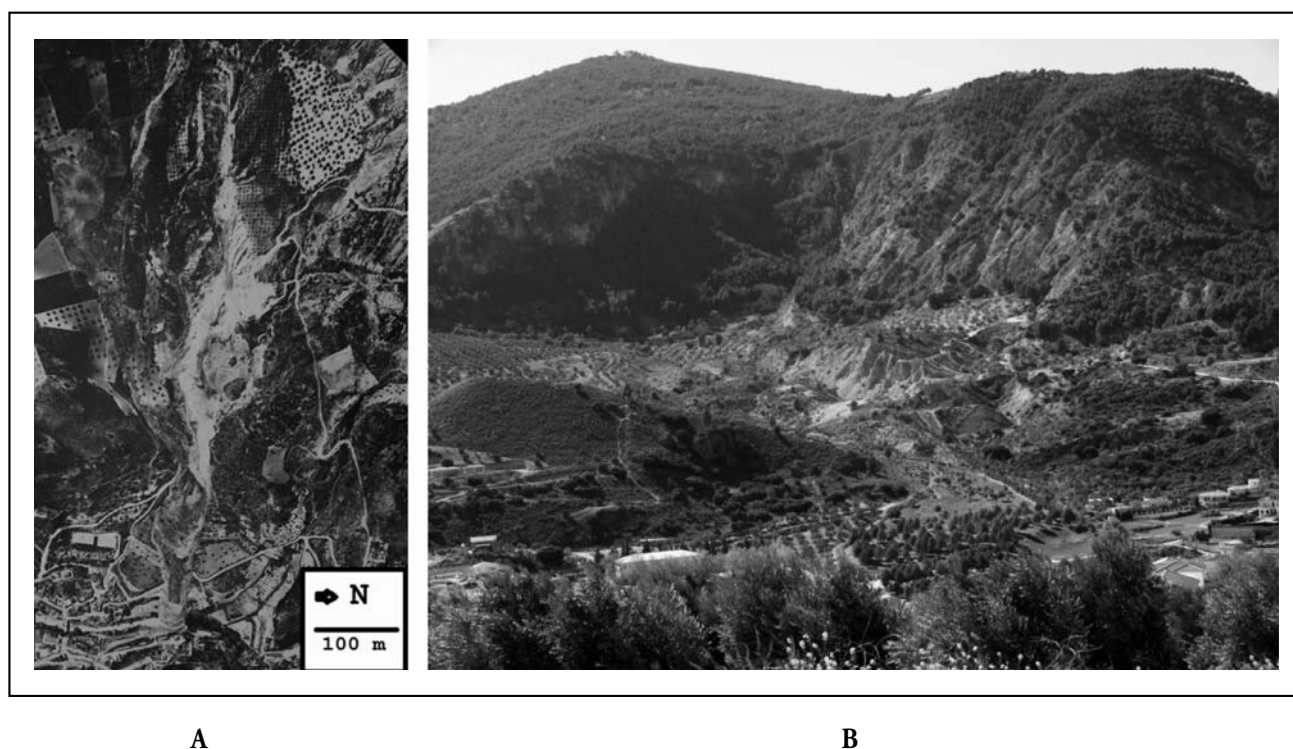
Los movimientos *diacrónicos* corresponden a los grados III a XII y requieren un análisis de actividad y grado de desarrollo a lo largo del tiempo para detallar la diacronía del proceso.

El método propuesto admite la aplicación prospectiva, basada en el conocimiento de los procesos característicos de cada región y de los mecanismos de rotura y propagación que involucran. Así, por ejemplo, los movimientos de ladera de volumen grande a excepcional del tipo deslizamientos-flujo de margas y arcillas, característicos de la Cordillera Bética en la escala temporal *histórica* o *contemporánea*, se asocian al grado de *diacronía IV o V*, según la plasticidad del material y la condición de humedad y pendiente. Los que sucedan con características similares en el futuro inmediato, se consideran asimilables a tales casos y presentarán similares comportamientos.

#### **El flujo de Olivares (Chacón, 1988; Chacón y López Galindo, 1988; Chacón, 2008)**

En 1986 una masa de margas del Cretácico fluyó en el barranco del Hundidero de Olivares (Granada, España) tras un episodio inicial de deslizamiento (Figura 4A). La masa incorporó margas beige claras con pasadas de margas verdes a negras en las que entre el 60 y el 80% del agregado mineral son esmectitas expansivas muy ricas en Fe y Mg, así como coluviones de ladera, en la parte superior, y restos de áridos de dolomía acumulados por una cantera existente en un borde lateral (Figura 4A).

La fase activa del movimiento perduró 15 días, como se muestra en la Figura 5 A y B, gracias a las intervenciones para drenar la masa mediante catas directas excavadas en los flancos de la lengua en su parte inferior por encima del Río Velillos que



A

B

**Figura 4 A). Vista aérea vertical del flujo de Olivares en Junio de 1986.** Se aprecia el estado final del movimiento de ladera al finalizar su actividad. Se distinguen bien la lengua principal orientada al Río Velillos, los lóbulos laterales, las líneas de fluencia de la masa, todo ello al pie del estrechamiento del barranco del Hundidero. Además se aprecia el escarpe principal desde el sector de Los Bujeos, a la izquierda cubierto de olivar, hasta el pie de la Sierra de Moclín, y también el escarpe lateral ceñido por la cantera de áridos de dolomías triásicas. La masa del flujo, margosa con pasadas ricas en esmectitas expansivas, de edad Cretácica, se distingue cubierta por el olivar. La masa se aproximó a las viviendas y colegio público de Los Olivares, un anejo de Moclín (Granada). **B) Vista actual del Barranco del Hundidero bajo la Sierra de Moclín y el anejo de Los Olivares de dicha localidad.** Se aprecia la lengua sobre el Río Velillos ahora recubierta de pinar para fijar los pequeños movimientos de la masa, derivados de la expansividad de las margas, y los escarpes laterales erosionados de la antigua cantera de áridos así como las cicatrices de los escarpes al pie de la Sierra y en Los Bujeos.

permitieron la salida de importantes caudales de agua retenidos por la masa. Después declinó la velocidad de propagación de la lengua de tierra y cinco días después se detuvo el movimiento cuando ocupó el lecho del río. Como resultado del flujo de Olivares el perfil del barranco del Hundidero se modificó sensiblemente (Figura 5C). Posteriormente se practicó un movimiento de tierras general mediante excavadoras y se eliminó un volumen importante de la masa que fue transportado para rellenar depresiones en zonas próximas. Además se instaló una escollera de bloques en el lecho del río una vez retirada parte de la masa que ocupaba el lecho, para facilitar el drenaje y la circulación del agua. El aspecto actual del sector se muestra en la Figura 4B.

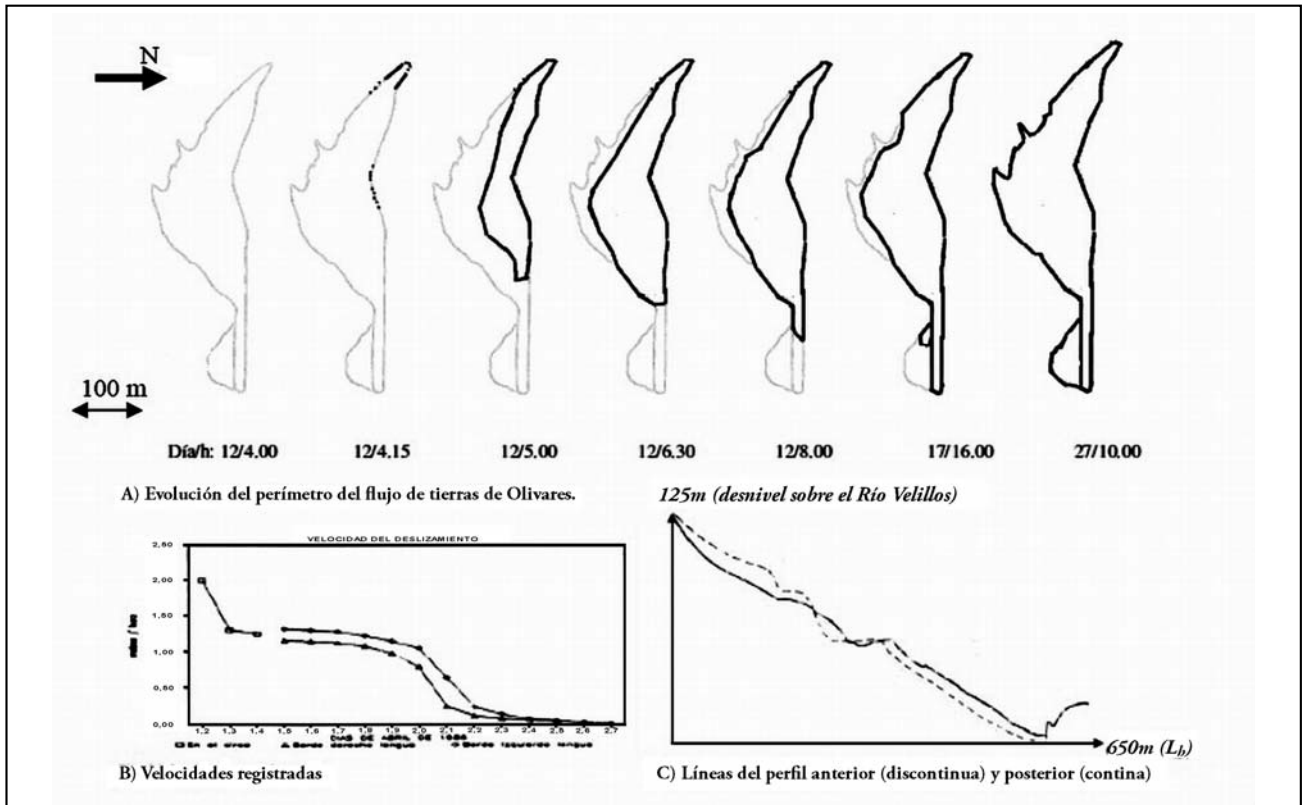
La descripción integrada de la actividad y el desarrollo diacrónico del flujo de Olivares, aplicando los conceptos antes expuestos, y reuniendo la información morfológica, se resume en los siguientes parámetros (Tabla 9; Figura 4A, Figura 5 A,B):

- a) **Edad contemporánea.** Se inició el 12 de Abril de 1986 y finalizó el día 27 del mismo mes;
- b) **Diacronía Grado V:** 15 días de actividad (entre 4 y 36 días);
- c) **Volumen:** Según Fell (1994) Muy grande: alrededor de 3.000.000 m<sup>3</sup>;
- d) **Superficie afectada:** 172.260 m<sup>2</sup>;

- e) **Desnivel de la zona movilizada:** 635 m;
- f) **Desnivel de la masa:** 145 m;
- g) **Anchura del escarpe principal:** 700 m;
- h) **Longitud de la zona movilizada:** 810 m;
- i) **Perímetro de la zona movilizada:** 3.000 m;
- j) **Espesor medio de la masa:** 45 m;
- k) **Espesor medio de la lengua de flujo:** 8 m;
- l) **Velocidad:** Moderada a extremadamente lenta (Figura 5B);
- m) **Capacidad destructiva máxima Alta (7);**
- n) **Actividad:** descrita en la Tabla 9 y Figura 5A;
- o) **Grado de desarrollo:** Desde incipiente hasta avanzado (Tabla 9, Figura 5A).

#### Factores determinantes y factores activadores

Las condiciones de estabilidad de los terrenos, en el análisis espacial que se realiza en la identificación de zonas inestables, se suelen expresar en términos de factores determinantes o condicionantes de la estabilidad. Tales factores incluyen a todos los aspectos del medio físico que tienen que ver con la configuración integral de los terrenos y pueden ser analizados en un Sistema de Información Geográfica.



**Figura 5.** En línea negra desarrollo progresivo del perímetro de la zona movilizada desde el inicio al final y en línea gris traza del perímetro final como referencia. **A) Evolución del flujo desde su inicio**, hacia las 4 de la madrugada del día 12 de Abril de 1986 a su detención final, en la mañana del 27 de Abril. **B) Velocidades registradas en el movimiento de la lengua de flujo**, partes derecha e izquierda. **C) Cambio del perfil longitudinal de la vertiente** desde la posición inicial a la final. (Chacón, 1988; Chacón y López Galindo, 1988; Chacón y Rodríguez, 1988).

**Tabla 9. Actividad y desarrollo del flujo de Olivares (Moclin, 1986) (WP/WLI, 1993; Chacón 198); Chacón y López Galindo, 1988; Chacón y Rodríguez, 1988).**

ACTIVIDAD	12/4 4.15h	12/4 6.00h	12/4 6.30h	12/4 8.00h	17/4 16.00h	27/4 10.00h
<b>Estado</b>	Activo moderado	Activo moderado	Activo moderado	Activo moderado	Activo lento	Activo lento: suspendido
<b>Distribución</b>	Avance y ensanche creciente	Avance y ensanche creciente	Avance y ensanche creciente con lengua de flujo	Avance y ensanche creciente con lengua de flujo	Avance y ensanche menos creciente con lenguas de flujo	Avance y ensanche con lenguas de flujo
<b>Estilo</b>	Complejo	múltiple	múltiple	múltiple	múltiple	múltiple
<b>Desarrollo</b>	Inicio del escarpe y rotación puntual. Se inicia la fluencia de la masa	Se extiende la fluencia de la masa al Bco Hundidero y sector Bujeos	Se acumula en base del barranco. Inicio lengua desde la base del barranco al río Velillos	Avance lengua hacia el río Velillos	Obstrucción río Velillos e inicio de otras lenguas laterales menores y oblicuas	Avance lenguas laterales menores hasta la detención del flujo.

Como en la escala de los estudios regionales, 1:200.000 a 1:10.000, las propiedades geotécnicas no pueden ser consideradas como variables significativas, ya que su variabilidad exige el uso de escalas muy detalladas o incluso de obra, a través de factores del terreno como las unidades litológicas, la disposición geométrica de las discontinuidades o las isoyetas de precipitaciones, de manera indirecta, se incorporan aspectos relativos a la resistencia de los terrenos. Sin embargo la utilidad de los factores determinantes se comprueba al observar el grado estadístico de ajuste entre los movimientos de ladera y los mapas temáticos que representan los diferentes factores. En cualquier caso, los factores determinantes de las condiciones de estabilidad son característicos de cada dominio geológico en cualquier región de la corteza y, a modo de ejemplos, se describirán algunos casos típicos de la Cordillera Bética del Sur de España.

Si una vertiente presenta condiciones de inestabilidad expresada por una significativa asociación espacial entre una determinada combinación de factores determinantes y el inventario de movimientos, sin embargo el inicio de movimientos de ladera en las zonas consideradas inestables requiere de un factor activador o desencadenante del movimiento. Se trata de factores que ejercen una acción sobre el terreno que tiende bien a disminuir la resistencia (papel del agua) o bien a aumentar las cargas (terremotos, agua de saturación, sobrecargas por rellenos, etc..) o bien a modificar las relaciones entre cargas y resistencia alterando la geometría de la vertiente, como son las excavaciones rápidas de las vertientes por la acción de las aguas de los ríos o del oleaje (descalce en el pie de la ladera), excavaciones durante obras, o el alcance de situaciones límite en el balance entre elevación continental y la excavación de los ríos. En general, por lo tanto, los factores activadores de la inestabilidad se pueden agrupar en:

- 1) aquellos que producen incrementos de esfuerzos: aumento de la densidad del terreno con el incremento de humedad, cargas externas añadidas por edificios, aumento de la pendiente sea por erosión natural o por excavaciones y la aplicación de cargas cíclicas por explosiones o terremotos
- 2) los que producen la reducción de la resistencia del terreno: aumento de la condición de humedad, aumento de la presión de poros, cargas cíclicas sísmicas o de

explosiones, acción del hielo y el deshielo, pérdida de material cementante, procesos de meteorización, remoldeo de arcillas tixotrópicas o extrasensitivas, etc..

*La acción de la lluvia* constituye el agente activador más regular en la región. En el valle del Monachil (Granada), donde los deslizamientos afectan a las series neógenas de la Depresión de Granada, cerca del contacto tectónico con las series metamórficas del Dominio Bético, los dos principales eventos de movimientos de ladera históricos ocurridos en 1924 y 1962 sucedieron bajo lluvias medias anuales superiores a 700 mm mientras que la media anual es de 400 mm (Sánchez-Navarro, 1924; Mateos y Ferrer, 1994; Chacón et al., 2007). Durante las lluvias del invierno de 1996 y la primavera de 1997 se alcanzaron máximos históricos en buena parte de la Alpujarra de Granada, Málaga y Almería y se produjeron cuantiosos daños en la red viaria por los movimientos de ladera que, en general, se asociaron más a la susceptibilidad de los terrenos que a la categoría de la calzada, ya que fueron dañadas carreteras locales, regionales y nacionales. Se establecieron nuevos máximos históricos en tormentas de hasta 400 mm/día que superaron los umbrales de estabilidad de vertientes en las que recubrimientos coluviales y macizos rocosos de esquistos y filitas alteradas, unidades muy susceptibles, se vieron afectados ampliamente por deslizamientos, coladas de barro y derrubios, desprendimientos, colapsos y movimientos complejos combinados. Sin embargo no se produjo ningún movimiento de ladera de magnitud mediana o superior. Se puso de manifiesto, en todo caso, que la susceptibilidad de los terrenos no se ve sustancialmente corregida por la propia obra de la red viaria, de modo que los riesgos sobre carreteras se mantienen en función de la susceptibilidad de los terrenos subyacentes (Lamas et al., 1997; Irigaray et al., 2000; Chacón et al., 2007).

*La actividad sísmica* de la región constituye el otro factor activador fundamental. Las deformaciones dinámicas generadas por las ondas sísmicas pueden conducir a la licuefacción de suelos limosos saturados y poco compactos, al remoldeo de arcillas sensitivas y al colapso de arenas, y pueden, igualmente, reducir el factor de seguridad de vertientes que, en condiciones estáticas, tendrían un coeficiente superior. En consecuencia las zonas de mayor susceptibilidad son las que potencialmente podrían también experimentar movilizaciones abundantes en condiciones dinámicas.



**Figura 6. Vista actual del flujo de Güevéjar (Granada).** En el borde derecho de la imagen, inmediatamente después de las últimas viviendas de Güevéjar (875 m) y a una altura ligeramente superior, se aprecia el escarpe de los flujos sucedidos en 1755 y 1884, durante dos terremotos mayores del S de España; se extiende unos 1.200 metros en dirección norte hacia la localidad de Cogollos de la Vega (1.009 m) situada bajo el Peñón de la Mata (1.670 m), uno de los picos de la Sierra Arana (2.027 m), que se extiende hacia el NE desde estas localidades, compuesta por materiales del Dominio Subbético interno, con calizas y dolomías de edad jurásica y margas de edad cretácica.

Un caso histórico es el movimiento de ladera de Güevéjar (Granada) que destruyó el segundo emplazamiento de esa localidad durante el terremoto de Andalucía de 25 de Diciembre de 1884 (Intensidad IX), ya que el primero había sido destruido anteriormente también por otro movimiento de ladera sobre la misma vertiente, durante el terremoto de 1 de Noviembre de 1755, también conocido como el terremoto de Lisboa, con epicentro al SW de la Península, en la dorsal atlántica (Arango *et al.*, 1995; Sanz, 1992; Chacón *et al.*, 1988). El movimiento de flujo se produjo en la serie del Neógeno de la Depresión de Granada que culminan los travertinos del Tortoniense, cuyos

bloques fueron transportados sobre la masa de flujo de la vertiente. El escarpe, visible inmediatamente junto a Güevéjar, se excava en sedimentos de la Depresión Neógena de Granada, una serie de margas y limos coronados por travertinos que fueron desmontados por los movimientos de ladera, restando un pequeño promontorio (Cerro del Castillejo de Nívar) sobre el escarpe en la parte central derecha del mismo. La masa de los flujos se muestra cubierta de cultivos de olivar y se extiende hasta los escarpes del río Bermejo excavado en la masa después de ser recubierto por la misma, y visible en el extremo inferior izquierdo de la panorámica. (Figura 6).



Figura 7. Imagen LiDAR del borde Norte de la ciudad de Granada (arriba izquierda), vista aérea del sector (arriba derecha) entre el Campus de Cartuja y el barrio de Casería de Montijo. (Chacón *et al.*, 2012; Constanzo *et al.*, 2012).

Otro caso conocido, de movimiento de ladera activado por la acción sísmica y las abundantes lluvias, es el deslizamiento planar del Río Beiro en el borde Norte del Campus de Cartuja, en la ciudad de Granada (Figura 7). Después de haber causado varios muertos al destruir una vivienda construida bajo la masa durante las lluvias de 1940, (Fuente Instituto Andaluz de Geofísica), el jueves 19 de Abril de 1956, volvió a causar nuevas víctimas que se asocian también al terremoto de Atarfe-Albolote, un seísmo local de consecuencias destructivas especialmente en la zona epicentral situado inmediatamente al norte de la ciudad de Granada. El seísmo tuvo sus coordenadas epicentrales a 37°26' N, 3°73' W, profundidad 6±3 km, magnitud 5,0 e intensidad VIII en una zona coincidente con ambas localidades (Fuente Instituto Andaluz de Geofísica), y fue seguido por intensas lluvias durante el viernes y sábado siguientes. Ha sido el último terremoto destructivo registrado en la ciudad de Granada.

El terremoto produjo la apertura de grietas de tracción en la margen izquierda del río Beiro, a escasos kilómetros de distancia y en el borde Norte de la ciudad de Granada, por encima de algunas de las cuevas existentes en la zona y las lluvias que se registraron durante las fechas inmediatamente posteriores al terremoto, se ocuparon de extender las grietas y movilizar una enorme masa que afectaría trágicamente a una de las cuevas en las que murieron sepultados un matrimonio y tres de sus hijos. Otras cuevas vecinas sufrieron igualmente daños y fueron desalojadas por lo que unos 40 vecinos quedaron sin viviendas. Indicó la prensa local *“una gran grieta de unos 50 metros de altura junto a las tapias de Cartuja, unos 600 metros cauce arriba del puente del mismo nombre sobre el camino de Alfácar. La lluvia hizo lo demás.”* En la actualidad el deslizamiento se identifica con claridad en el relieve del sector (Figura 7).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La identificación y descripción de los movimientos de ladera es la base esencial para una adecuada corrección o estabilización de los terrenos colindantes o afectados, así como para la previsión de la evolución y de las consecuencias para los elementos del territorio, bienes y personas. Los errores en la identificación y la descripción conducen, cuando menos, al diseño de obras de contención o corrección inútiles, cuando no se comprende bien el mecanismo de rotura y propagación, la magnitud, la velocidad y la evolución diacrónica que el proceso de inestabilidad va a desarrollar.

Ocurre así cuando se pretende contener un movimiento de ladera mediante elementos rígidos que no están dimensionados para las cargas o esfuerzos que la masa en movimiento va a desarrollar o bien, cuando no se considera el carácter plástico de la masa y las presiones que puede desarrollar sobre los sistemas de drenaje ni son adecuados para soportar las deformaciones correspondientes o bien cuando no se tienen en cuenta las condiciones de humedad de la masa y las necesidades que ello plantea para el drenaje posterior.

Por otra parte, un porcentaje mayoritario de los movimientos de ladera que se aprecian en el relieve son superficiales y se producen asociados a periodos de lluvias o a eventos sísmicos, e independientemente de los daños que produzcan, que pueden ser muy elevados, finalizan su actividad en grados de diacronía muy limitados, por lo que no se constituyen como anomalías gravitatorias a largo plazo como los grandes movimientos de ladera, menos frecuentes que los anteriores, y que se asocian a relieves pronunciados, y mantienen la actividad en grados de diacronía muy prolongados en el tiempo.

Mientras que los movimientos de carácter monocrónico se repiten en cada crisis de lluvias o evento sísmico en las zonas inestables de las vertientes de la región, los movimientos diacrónicos se mantienen activos, con fluctuaciones en la velocidad registrada a lo largo del tiempo, por lo que deben ser identificados e incorporados a los mapas que identifican las zonas geotécnicas más desfavorables de la región, junto con los terrenos inestables. De ese modo, los terrenos inestables, en los que se repiten movimientos superficiales monocrónicos con frecuencia, pueden ser tratados mediante obras de ingeniería para garantizar la estabilidad de zonas de actuación concretas, mientras que los movimientos diacrónicos son mucho más difíciles de estabilizar, frecuentemente su magnitud no permite abordar dicha tarea, por lo que su conocimiento es fundamental para monitorizar la masa y los escarpes y obtener la información necesaria para el seguimiento y la previsión de sus consecuencias.

Desde el punto de vista geomorfológico, la generación y distribución de los movimientos monocrónicos y diacrónicos, son característicos de cada cordillera y ambiente geológico, de manera que su conocimiento detallado ofrece pautas de gran interés para comprender la evolución del relieve y su progresión posterior.

Las técnicas de teledetección actuales, DInSAR, SAR, Laser escáner, etc, permiten el monitoreo detallado y el seguimiento de la evolución de los movimientos de ladera, lo que se puede contrastar con datos procedentes de la instrumentación directa en sondeos o en escarpes, para el seguimiento detallado del proceso de inestabilidad.

La disponibilidad de metodologías adecuadas para la elaboración de mapas previsores de movimientos de ladera: mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo (Chacón et al., 2006; Fell et al, 2008) y los métodos, conceptos y técnicas disponibles para describir, clasificar y medir los diferentes parámetros de los movimientos de ladera y de su actividad y diacronía, constituyen avances que se han materializado en la última década. Lamentablemente, con frecuencia, no se incorporan adecuadamente al planeamiento urbanístico o a los estudios previos de las grandes obras civiles o de edificación, con las costosas y dolorosas consecuencias que ponen de manifiesto numerosos desastres que suceden en el mundo actual. Ello, a pesar de que las regulaciones oficiales en buena parte de los países afectados permitiría la exigencia de que los estudios de condiciones de estabilidad y exposición a riesgos por movimientos de ladera, y otros fenómenos naturales, se tuvieran en cuenta para minimizar sus consecuencias.

La descripción de los movimientos de ladera dispone en la actualidad de criterios y parámetros, como los descritos en los apartados anteriores, que permiten una definición precisa de sus características más significativas para los informes geotécnicos, la evaluación de riesgos y las investigaciones especializadas.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados de investigación citados con participación del autor fueron desarrollados, desde los años 90, en el Grupo de Investigaciones Medioambientales: Riesgos Geológicos e Ingeniería del Terreno, RMN 121 financiado por el Plan Andaluz de Investigación, Junta de Andalucía, España. El autor agradece vivamente la invitación del Director de la revista D. Norberto Jorge Bejerman a contribuir con el presente artículo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARANGO, J.R.; BLÁZQUEZ, R.; CHACÓN, J. AND LÓPEZ CASADO, C. (1995).  
Soil Liquefaction Potential Induced by the Andalusian Earthquake of 25 December 1884.  
*Natural Hazards*, 12: 1-17. Kluwer Academic Publishers. Netherlands
- CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ANTONINI, G.; GALLI, M.;  
CACCIANO, M.; CASTELLANI, M. AND SALVATI, P. (2002).  
A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy.  
*Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2:57-72. EGS.
- CHACÓN, J. (1988).  
Riesgos geológicos en el sector de Olivares (Moclín, Granada).  
*II Simposio Nacional Taludes y Laderas Inestables*. Eds. E.Alonso y J.Corominas. pp.705-722. Barcelona.
- CHACÓN, J. (2003 a)  
"Riesgos de origen geológico y geomorfológico: deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias" Áreas: Revista de Ciencias Sociales.  
*Volumen especial : Los procesos de riesgo con origen natural: una constante en la relación entre hombre y medio*.  
Nº 23, pp 33-64. Universidad de Murcia- Fundación CajaMurcia.
- CHACÓN, J. (2003b).  
Geología aplicada a las obras civiles.  
*En I Curso Geotecnia para las Infraestructuras*. Editor. J.Bauzá. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Málaga. 32 pp.
- CHACÓN, J. (2005).  
Mapas de Zonas Inestables y Sistemas de Información Geográfica (SIG).  
*VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Valencia, 21-24 de Junio de 2005.Conferencia Invitada*. 76 pp.
- CHACÓN, J. (2008).  
Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas.  
*In Lima, R.E. y Leite, J.C. (Eds) 44º Congreso Brasileiro de Geologia. Publicação Especial. 2008.*  
*Desastres e riscos geológicos em Curitiba e litoral. Roteiro de Excursão Técnica*. 43 p. CENACID. UFP
- CHACÓN, J. Y LÓPEZ. A. (1988).  
El deslizamiento de Olivares.(Moclín,Granada.): Geología, composición mineralógica y evolución dinámica durante los 15 primeros días.  
*II Simposio Nacional Taludes y Laderas Inestables*. Eds. E.Alonso y J.Corominas. pp.723-31. Barcelona
- CHACÓN, J. Y RODRÍGUEZ, I. (1988).  
Diferenciación de movimientos de ladera en el sector de Olivares (Moclín, Granada).  
*II Congreso Geológico de España. Comunicaciones, vol.2, pp.325-329.Universidad de Granada*.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; LÓPEZ, A.; RODRÍGUEZ, I., Y ROMERO, E. (1988).  
Deslizamientos de ladera en el Dominio Subbético.  
*II Congreso Geológico de España, Guía de Excursión B5*. 34 pp. Universidad de Granada.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. ; EL HAMDOUNI, R. Y FERNÁNDEZ, T.(1996).  
Consideraciones sobre los riesgos derivados de los movimientos del terreno, su variada naturaleza y las dificultades de su evaluación. In Chacón & C. Irigaray, J. (eds.)  
*VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, I*, 407-418. Granada, España.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. EL HAMDOUNI, R. AND FERNÁNDEZ, T. (2006).  
Engineering geology maps: Landslides and GIS.  
*Bulletin of Engineering Geology and Environment* 65:341-411. Springer Verlag. Berlin- Heidelberg.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C. AND FERNÁNDEZ, T. (2007).  
Movimientos de Ladera,  
pp 45-82 in Ferrer, M. (Coord) *Atlas de Riesgos Naturales en la Provincia de Granada*.  
Diputación de Granada-Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 190 pp.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; EL HAMDOUNI, R.; AND JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J.D. (2010).  
Diachroneity of landslides.  
*In: Geologically Active - Williams et al. (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7.*  
Páginas 999-1006.
- CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; EL HAMDOUNI, R.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, I.; CHACÓN, E.;  
CALVO, F.J.; JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J.; FERNÁNDEZ, P.; GARRIDO, J. AND LAMAS, F. (2012).  
Engineering and Environmental Geology of Granada and its Metropolitan Area (Spain).  
*Engineering & Environmental Geosciences*, 44 pp., 17 tables, 25 figures. August issue.



- COSTANZO, D.; ROTIGLIANO, E; IRIGARAY, C.; JIMÉNEZ-PERÁLVAREZ, J., AND CHACÓN, J. (2012).  
Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain).  
*Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 327-340. EGS.
- COROMINAS, J. Y GARCÍA-YAGÜE, A. (1997).  
Terminología de los movimientos de ladera.  
*In E.Alonso, J. Corominas, J. Chacón et al., editores. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Vol 3, pp. 1051-1072. Granada. Barcelona.*
- CRUDEN, D.M AND LEFEVRE, G. (1994).  
Glossary of Landslides.  
<http://www.landslides.gl.ulaval.ca/tcl/glossary.html> 19 pp.
- CRUDEN, D.M. AND VARNES, D.J. (1996).  
Landslides types and Processes. In "Turner, A.K. and Schuster, R.L". (1996).  
*Landslides: investigation and mitigation. Special Report 247. USA Transportation Research Board. National Research Council. National Academic Press. 673 pp. Washington D.C.pp, 35-76.*
- FELL, R. (1994)  
Landslide risk assessment and acceptable risk.  
*Can Geotech J* 31:261-272.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, CH.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.V. (2008).  
Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning.  
*Engineering Geology* 102 (2008) 99-111. Elsevier
- FERNÁNDEZ, P.; IRIGARAY, C.; JIMÉNEZ, J.; EL HAMDOUNI, R.; CROSETTO, M.; MONSERRAT, O. AND CHACÓN, J. (2009)  
First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique.  
*Engineering Geology, vol 105: 1-2, 23, pp 84-101. Elsevier*
- HANSEN, A. 1989.  
Landslide Hazard Analysis.  
*In "Slope Instability (S. Brunsden and D.B. Prior, eds.) " John Wiley & Sons, New York, pp. 523-595.*
- HUTCHINSON J.N. (1988).  
Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.  
*proc. VTH. I.S.L. Lausanne, 1,3-35. Balkema Pub. Holland.*
- IRIGARAY, C.; LAMAS, F.; EL HAMDOUNI, R.; FERNÁNDEZ, T., AND CHACÓN, J.(2000),  
The Importance of Precipitation and the Susceptibility of the Slopes for the Triggering of Landslides Along the Roads.  
*Natural Hazards, 21(1): 65-81. (2000). Springer.*
- LAMAS, F.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; EL HAMDOUNI, R, Y CHACÓN, J. (1997).  
Lluvias y movimientos de ladera durante el invierno 1996-97 en Andalucía Oriental.  
*I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Vol. 5, pp. 654-667.*
- MATEOS, R.M. AND FERRER, M. (1994).  
Methodology for landslides hazard map 1:10.000 in the area of Monachil (Granada, Spain).  
*7th. I.C.I.A.E.G. Lisbon, III, pp. 2059-2064.*
- RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M.; PRIETO, C., E HINOJOSA, J.A. (1978).  
Regional studies on mass movements in Spain.  
*III International Congress of the I.A.E.G. Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería. Sección I, vol 1. Madrid., pp. 267-277.*
- SÁNCHEZ-NAVARRO NEUMANN, M.M. (1924).  
Los fenómenos geológicos de Monachil (Granada).  
*Ibérica. XI, 1º, vol XXI nº 529, pp. I-VII.*
- SANZ, E. (1992).  
El deslizamiento de Güevéjar durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884).  
*III Simposio Laderas y Taludes Inestables. E.Alonso y J. Corominas edit. Vol 1, pp. 195-204.*
- VARNES, D.J. (1978).  
"Slope movement types and processes,"  
*in Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 12-33.*
- WP/WLI (1990).  
A Suggested Method for Reporting a Landslide.  
*Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 41, pp. 5-12.*

WP/WLI. 1993a.

A Suggested Method for Describing the Activity of a Landslide.

*Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No.47, pp.53-57.

WP/WLI. 1993b.

Multilingual Landslide Glossary.

*BiTech Publishers, Richmond, British Columbia, Canada*, 59 pp.

WP/WLI (1995).

International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory,

*Working Group on Rate of Movement (Chairman: Ch Bonnard) (1995) A suggested method*

*for describing the rate of movement of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology*,52: 75-78.





## Bases metodológicas para la cartografía de riesgos naturales en zonas costeras

### *Methodological basis for natural hazards mapping in coastal zones*

González de Vallejo, L. I. <sup>1-2</sup> ✉ - Seisdedos, J. <sup>2</sup> - Mulas, J. <sup>3</sup> - Rodríguez Franco, J. A. <sup>2</sup> - Gracia, F. J. <sup>4</sup> - Garrote, J. <sup>1</sup> - Del Río, L. <sup>4</sup>

Recibido: 17 de Abril de 2012 • Aceptado: 01 de Junio 2012

#### Resumen

*A pesar de la importancia e implicaciones de los riesgos asociados a la dinámica litoral en las zonas costeras, son escasos los trabajos centrados en su estudio y cartografía a escala regional, de manera sistemática e integrada. En este trabajo se presentan los fundamentos de una metodología basada en el análisis detallado de los riesgos naturales que pueden afectar al litoral: inundaciones, erosión, subida del nivel del mar, tsunamis, movimientos de ladera, etc., y en el estudio y cartografía de los factores implicados en su ocurrencia (geomorfología litoral, procesos litorales, sucesos históricos, actuaciones humanas...). Estos factores y riesgos se evalúan e integran para la elaboración de mapas finales en los que se presenta la valoración tanto de cada riesgo de forma individual, como del conjunto de los mismos. Se emplea un sistema de representación cartográfica en franjas paralelas a la costa que facilita el reconocimiento e interpretación de las características del litoral estudiado y los riesgos asociados.*

**Palabras clave:** *riesgos naturales, litoral, cartografía de riesgos.*

#### Abstract

*Despite the importance and implications of coastal hazards, very few studies have been focused on their analysis and mapping on a regional scale, in a systematic and integrated way. This article presents a methodology based on the detailed analysis of natural hazards affecting coastal zones: floods, erosion, sea level rise, tsunamis, landslides, etc., and the study and mapping of the factors involved (coastal geomorphology, coastal processes, historical events, human activities...). These*

1 Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (España).

✉ vallejo@geo.ucm.es

2 Prospección y Geotecnia S.L. (Madrid, España).

3 Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), (Madrid).

4 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz (España).

factors and hazards are evaluated and integrated to prepare maps which include the assessments of each individual hazard and the overall ones. A mapping system in strips parallel to the coast is used, allowing the recognition and interpretation of the characteristics of the coast and the associated hazards.

**Keywords:** natural hazards, coastal zone, hazard maps.

## INTRODUCCIÓN

Las áreas litorales han experimentado un considerable desarrollo en el último siglo y la tendencia parece que continuará en los próximos años. Se estima que el 23% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa, a una altura inferior a 100 m sobre el nivel del mar, y que la densidad de población en las áreas litorales es tres veces mayor a la media mundial (Small y Nicholls, 2003). El atractivo de la costa ha derivado en una rápida expansión de las actividades económicas, asentamientos urbanos y usos turísticos. Esta concentración de la población y de actividades en áreas litorales ha producido un incremento en la incidencia de los riesgos costeros. Las zonas litorales se encuentran seriamente expuestas a inundaciones y procesos de erosión costera, y son extremadamente vulnerables a eventos extremos, como temporales o tsunamis, que pueden causar importantes pérdidas (De Andrés y Gracia, 2002).

En el caso de España, con unos 8000 km de costa, repartidos entre la península (5100 km) y los archipiélagos (2900 km), la densidad media de población del conjunto nacional es de 77 hab/km<sup>2</sup>, mientras que los municipios costeros tienen una densidad media de unos 350 hab/km<sup>2</sup>, cifra que se eleva a 1000 hab/km<sup>2</sup> durante la época estival (Barragán, 2004). El litoral español es objeto de inversiones multimillonarias destinadas a labores de mantenimiento, restauración, ordenación de usos y obras de emergencia. Para el periodo 1986-2016, se han estimado pérdidas máximas por erosión costera superiores a 5 mil millones de dólares (González de Vallejo et al., 1988). Por otra parte, en España los temporales marinos ocupan el primer puesto en cuanto al número de víctimas mortales causadas por catástrofes naturales, con 511 fallecidos entre los años 1990 y 2000 (Ayala et al., 2004).

Por los motivos anteriores, el estudio y cartografía de los peligros asociados a la dinámica litoral resultan de especial importancia en la ordenación territorial y la prevención de riesgos. La zonificación basada en la posible afectación por peligros naturales con vistas al adecuado uso y aprovechamiento del suelo es un aspecto necesario que debe ser considerado en toda planificación territorial. El grado de fiabilidad de los límites de ocupación del terreno y de la intensidad estimada para los peligros que pueden constituir riesgos dependerá en muchos casos del grado de conocimiento de dichos peligros y de la metodología utilizada en su estudio. Esto hace fundamental la elección de una adecuada metodología de estudio y cartografía.

En el caso de la dinámica litoral no existe una metodología normalizada para la cartografía de los riesgos asociados (en este texto, el término "riesgo" se usa con el mismo significado que el de "peligro", en inglés "hazard"). Si bien abundan los estudios puntuales centrados en riesgos concretos, los estudios que analicen y evalúen de manera integrada y sistemática el conjunto posible de riesgos asociados a la dinámica litoral a escala regional, son muy escasos. En el contexto internacional cabe destacar, entre otros, los trabajos realizados en la costa sur del Reino Unido en el proyecto de la Comunidad Europea RESPONSE (2006), y también los llevados a cabo en las costas

hawaianas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2002). En España no se conocen trabajos similares. La Región de Murcia (Figura 1) es la primera comunidad autónoma de España en la que se realizan este tipo de estudios y cartografías a escala regional.

El principal objetivo de este trabajo es presentar las bases metodológicas para el estudio y cartografía de los riesgos asociados a la dinámica litoral a escala 1:25.000. Esta metodología se aplica en el litoral de Murcia. Asimismo, se exponen algunos aspectos básicos, considerados de especial relevancia para abordar este tipo de investigaciones.

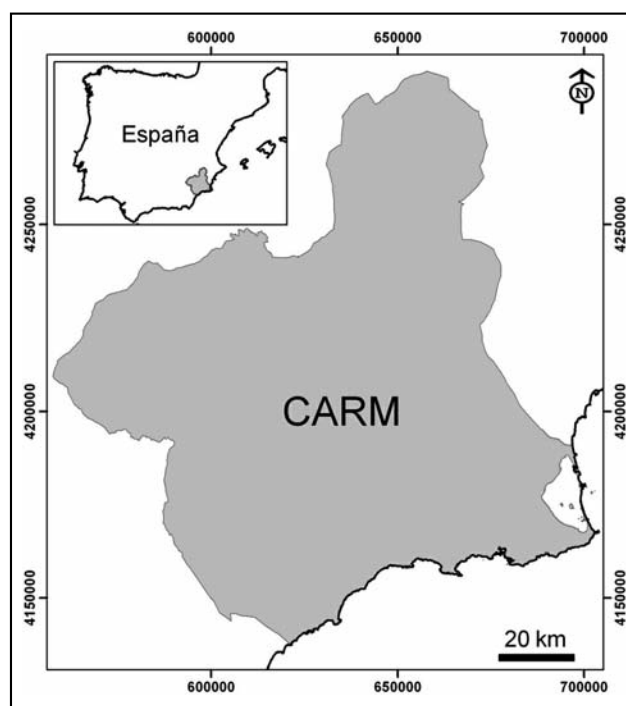


Figura 1. Localización de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM) al sureste de España.

## ASPECTOS BÁSICOS

### El litoral

Las características físico-naturales, y ciertos criterios derivados de los sistemas jurídico y administrativo de las áreas litorales (coastal zones), permiten realizar diferenciaciones espaciales que facilitan el análisis geográfico de las mismas. Existen varias clasificaciones en función de los diferentes programas o planes de gestión. En este sentido, el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas propone un perfil topográfico idealizado en el que se representan los ámbitos diferenciados del área litoral (Figura 2): aguas oceánicas (ocean waters), aguas litorales (coastal waters), espacio intermareal (intertidal area), borde litoral (coastline), frente litoral (oceanfront or shorelands area),

tierras litorales (*coastal uplands*) y tierras continentales (*inland*) (Barragán, 2004).

En este trabajo el término litoral se utilizará preferentemente para hacer referencia a la zona comprendida entre el nivel de marea más bajo (nivel inferior del espacio intermareal) y el nivel alcanzado por el oleaje de fuertes tormentas, en coinci-

dencia con mareas excepcionalmente altas, que afecta al frente litoral. En un perfil típico de playa esta zona (*shore* en inglés) comprende las subzonas denominadas *backshore* y *foreshore* (Carter, 1988). En la Figura 3 se muestran varios perfiles típicos del litoral correspondientes a playas, acantilados y zonas de desbordamiento con los principales términos en inglés.

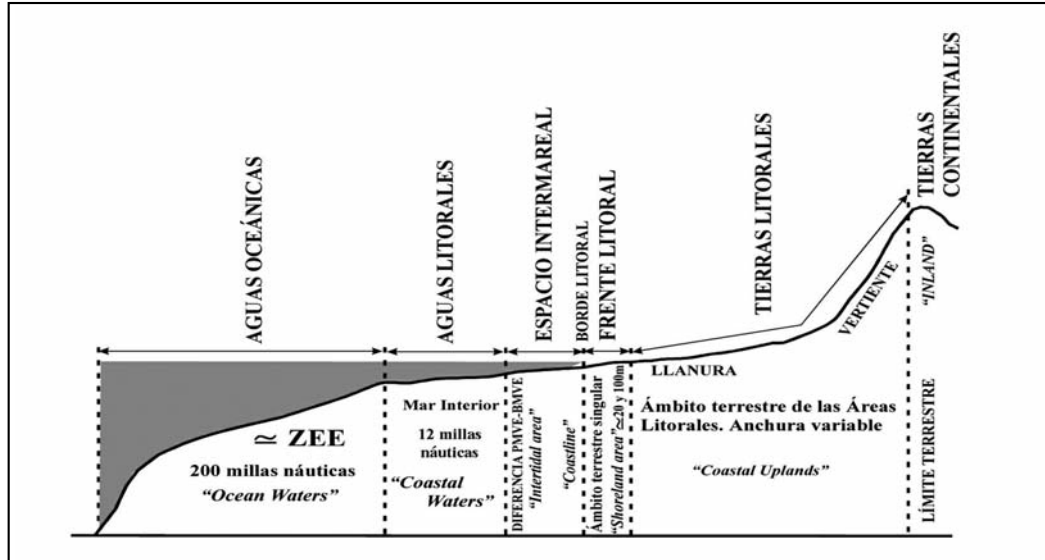


Figura 2. Ámbitos diferenciados del área litoral (Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas -UNEP, 1995-, tomado de Barragán, 2004).

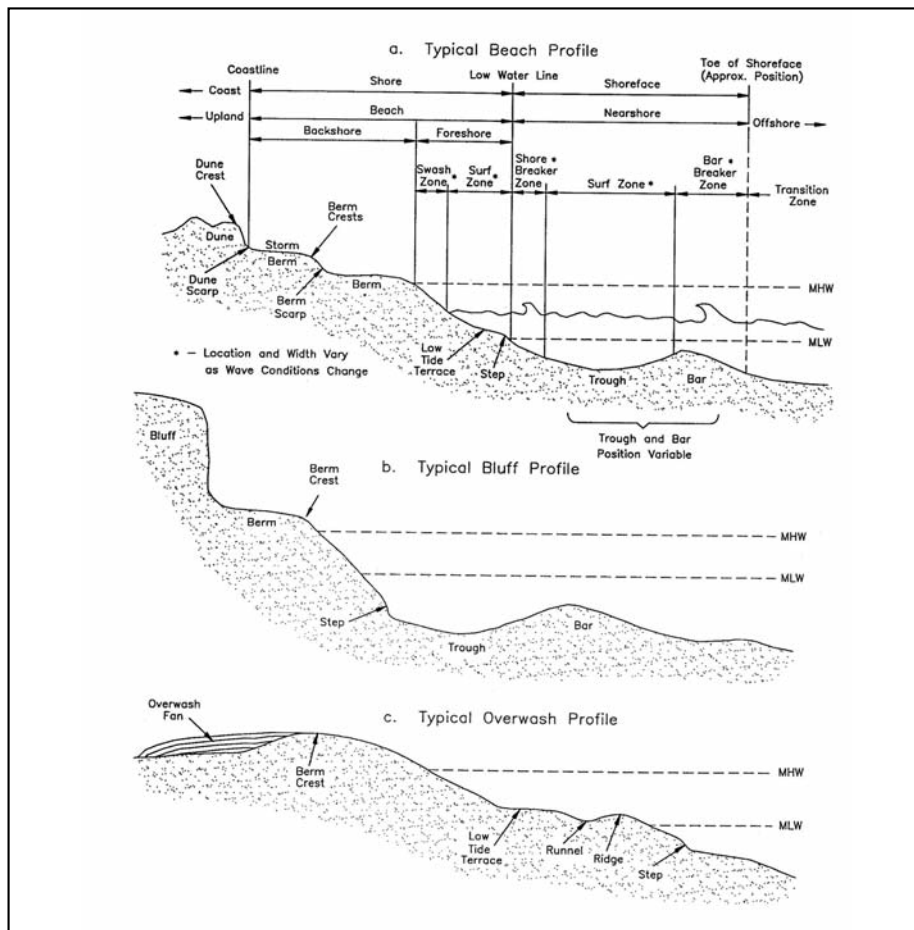


Figura 3. Perfiles típicos de playas (a), acantilados (b) y zonas de desbordamiento (c) con la terminología original (USACE, 2011).

### Riesgos asociados a la dinámica litoral

Los riesgos asociados a la dinámica litoral son variados. Por un lado, las zonas emergidas pueden verse sometidas a peligros geológicos característicos de las áreas continentales (sismicidad, vulcanismo, movimientos de ladera, avenidas e inundaciones fluviales, etc.). Por otro lado, las zonas litorales también se ven afectadas por la acción de agentes marinos (viento, oleaje, mareas y corrientes), que se traducen en grandes olas asociadas a temporales, subidas y bajadas rítmicas de la marea, y variaciones del nivel del mar a diversas escalas. A toda esta problemática se superponen los posibles escenarios relacionados con el cambio climático, destacando su posible implicación en el ascenso del nivel del mar y el aumento de la frecuencia y/o severidad de temporales. Además, determinados riesgos, como es el caso de los movimientos de ladera (y más concretamente de los desprendimientos), pueden verse incrementados con la acción de los agentes marinos que erosionan el pie de los acantilados. Otros riesgos que pueden afectar al litoral son los tsunamis, grandes olas destructivas, generadas por terremotos en la mayoría de los casos (y en menor medida por deslizamientos, actividad volcánica, etc.). La ocurrencia de todos estos fenómenos puede derivar en dos riesgos fundamentales que afectan a la zona litoral: inundación costera y erosión/acreción costera (Figura 4).

Las características geológicas y geomorfológicas de la costa condicionarán la incidencia de los procesos en la zona litoral. Cada tipo de costa tendrá una posible respuesta ante los factores desencadenantes. Por ejemplo, las costas sedimentarias o deposicionales presentarán mayor susceptibilidad a sufrir inundaciones y erosión costera, mientras que las costas acantiladas presentarán mayor susceptibilidad a sufrir movimientos de

ladera. Por otra parte, la ocupación de la costa y los procesos de urbanización, desarrollo turístico e industrial implican modificaciones de la franja costera y también pueden influir de manera determinante en el funcionamiento del sistema litoral y en la incidencia de los riesgos.

Los diferentes factores y procesos que afectan al litoral actúan de manera simultánea. Sin embargo, su ritmo de actuación varía, así como el alcance geográfico de sus efectos. En general, se distingue entre cambios a corto plazo (escala hidrodinámica), cambios a medio plazo (escala ingenieril) y cambios a largo-muy largo plazo (escala geológica). En la Figura 5 se muestra el ámbito de actuación temporal y espacial de los factores involucrados en la erosión costera.

### ZONA DE ESTUDIO

La Región de Murcia se encuentra al sureste de la Península Ibérica, formando parte de la costa mediterránea (Figura 1). Presenta unos 300 km de costa (incluyendo islas). Desde el punto de vista geomorfológico, el litoral murciano se puede dividir en dos grandes sectores. El sector meridional, con directrices NE-SO y E-O, se caracteriza por la presencia de playas extensas y abiertas al oleaje y la alternancia de sistemas de rambla-delta, reducidas calas y abruptos acantilados. Por otra parte, el sector oriental, de orientación N-S, está constituido por el sistema playa-lagoon-isla barrera de La Manga-Mar Menor, caracterizado por la presencia de playas arenosas continuas y anchas. El litoral se distribuye de la siguiente manera: el 22% son acantilados altos (>20 m), 11% acantilados medios (2-20 m), 7% costas bajas (<2 m), 29% playas naturales, 23% obras marítimas y 8% playas artificiales.

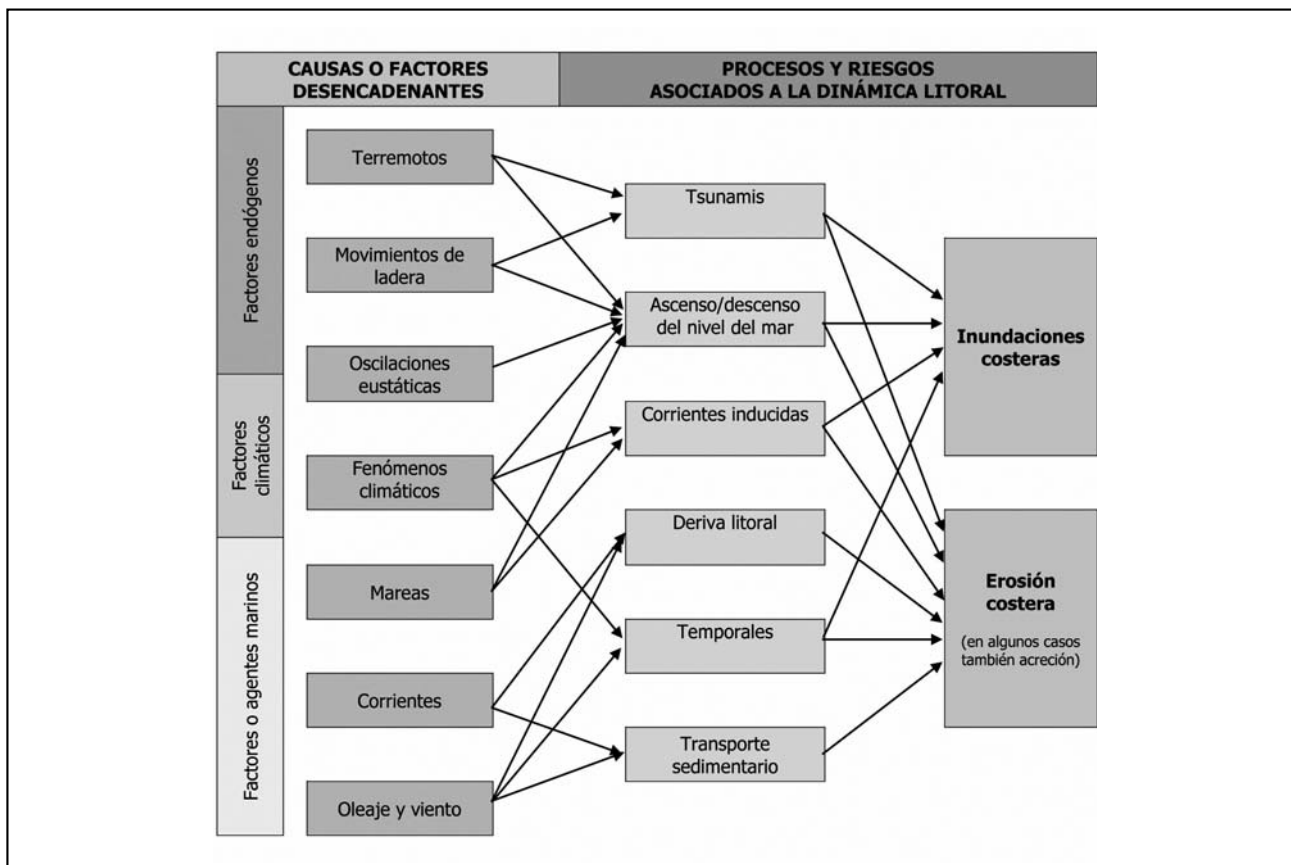


Figura 4. Riesgos asociados a la dinámica litoral y factores implicados (modificado de NZCCO, 2004).

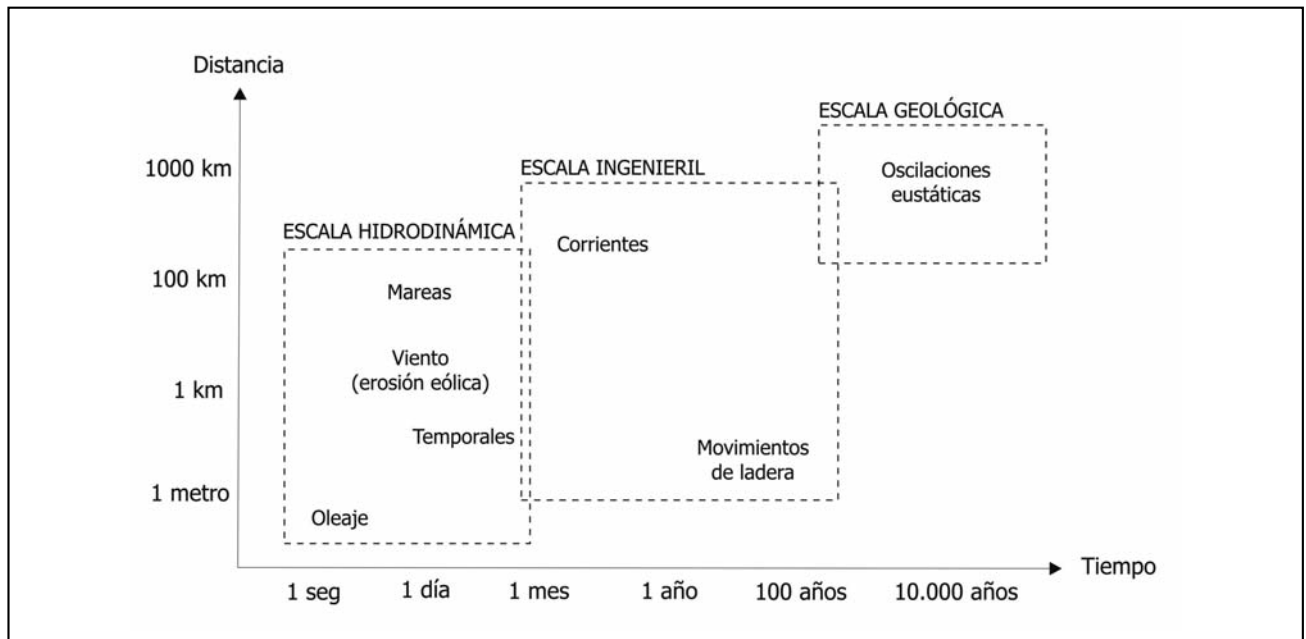


Figura 5. Modelo de la distribución espacial y temporal de la ocurrencia y los efectos de los agentes implicados en la erosión costera (modificado de EUROSION, 2004).

## METODOLOGÍA

La metodología que se presenta en este trabajo, se basa en dos aspectos fundamentales: por un lado el estudio de los factores implicados y los riesgos asociados a la dinámica litoral; y por otro, la cartografía de los mismos (Seisdedos *et al.*, 2012). Ambas partes de la investigación (estudio y cartografía) están íntimamente relacionadas (Figura 6).

En la primera fase del estudio, tras el reconocimiento de campo, se analizan los siguientes aspectos: geomorfología litoral, procesos litorales, sucesos históricos y actuaciones humanas. Estos aspectos se representan en sus correspondientes cartografías:

mapa geomorfológico, mapa de procesos litorales, mapa de sucesos históricos, etc.

En una segunda fase, el estudio se centra en el análisis de los riesgos asociados a la dinámica litoral. En esta etapa se ha prestado especial atención al análisis de inundaciones costeras, erosión costera, ascenso del nivel del mar, tsunamis, y riesgos propios de zonas continentales que pueden afectar especialmente al litoral, como los movimientos de ladera y las inundaciones o avenidas fluviales. El estudio de estos riesgos se realiza a partir del análisis de la información disponible y la aplicación de metodologías específicas para tales fines (ver apartado siguiente).

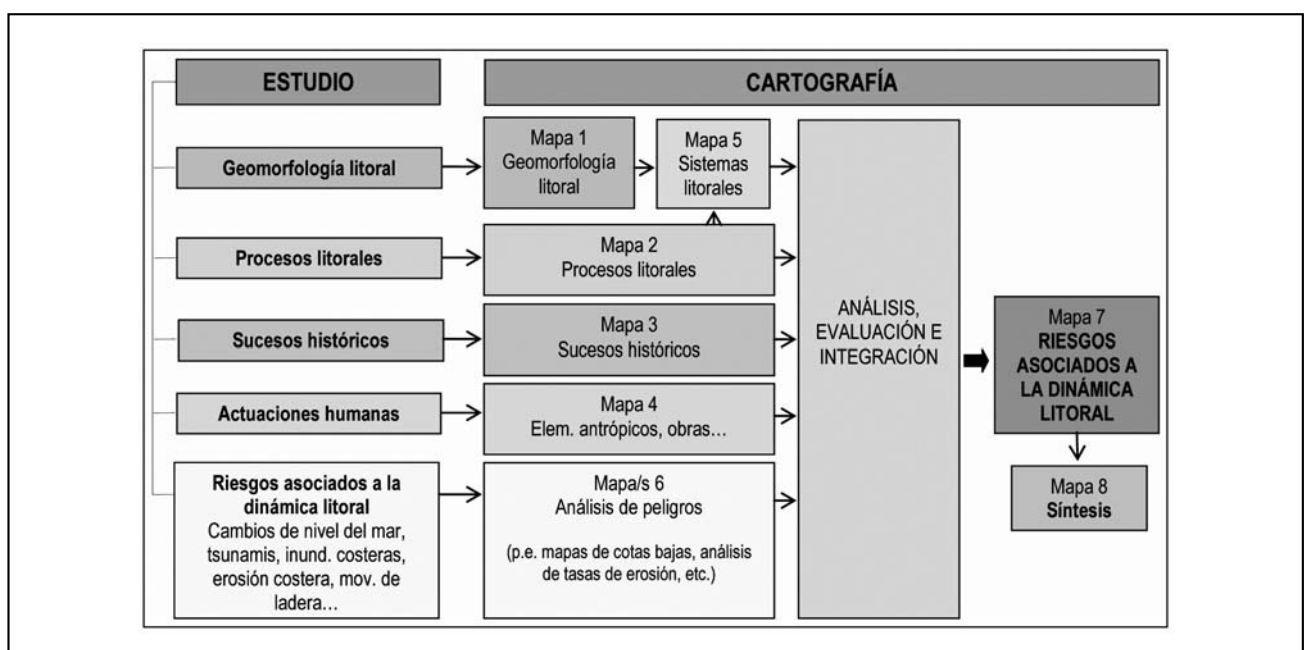


Figura 6. Esquema de la metodología de estudio y cartografía de los riesgos asociados a la dinámica litoral.



Posteriormente se analizan e integran los resultados obtenidos, realizando una evaluación de los aspectos anteriores, y se obtienen los mapas de peligrosidad. Para estos mapas se ha propuesto un sistema de representación cartográfica en franjas paralelas, basado en el empleado por el *USGS (2002)*, que facilita el reconocimiento e interpretación de las características del litoral estudiado y los peligros que le pueden afectar. Finalmente, en la última fase del estudio, se elaboran los mapas de síntesis de los resultados y se establecen las conclusiones. La utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de estos mapas facilita en gran medida las tareas de edición, análisis, evaluación y publicación de las cartografías resultantes. Asimismo disponer de estos datos y resultados en formato SIG puede ser de utilidad en la elaboración de planes de ordenación u otras investigaciones.

## FACTORES Y RIESGOS ANALIZADOS

### Geomorfología litoral

El reconocimiento de campo de las características geomorfológicas costeras es fundamental para el estudio de los riesgos asociados a la dinámica litoral (Figura 7). Los mapas geomorfológicos proporcionan información relevante sobre las formaciones superficiales, entre las que destacan las asociadas a la dinámica litoral (playas, acantilados, terrazas marinas, plataformas rocosas, cordones litorales, marismas, abanicos deltaicos, dunas fósiles, etc.). Teniendo en cuenta las características geomorfológicas del litoral, y los datos del reconocimiento de campo, se realizan los mapas de "sistemas litorales". En estos mapas se agrupan los elementos geomorfológicos de acuerdo con su posible respuesta a los factores desencadenantes.

### Procesos litorales

Para el estudio de los procesos litorales se ha de realizar un análisis del clima marítimo. Bajo esta denominación se incluyen los principales agentes dinámicos modeladores de la costa: viento, oleaje, mareas y corrientes (Figura 8). Las redes de boyas oceanográficas (aguas profundas y aguas someras) proporcionan valiosa información sobre estos agentes. También puede obtenerse información sobre viento, corrientes, oleaje, etc. en diversos organismos públicos (Puertos del Estado, Instituto Español de Oceanografía, Agencia Estatal de Meteorología, entre otros). Por otra parte, las características del fondo oceánico son un factor primordial en la incidencia de los procesos litorales, ya que inciden en el proceso de asomeramiento del oleaje, provocando una rápida disipación, o bien una acen-

tuación del aumento de su altura. Por este motivo también hay que analizar la batimetría de la plataforma continental.

### Actuaciones humanas

La influencia antrópica es determinante en el funcionamiento del sistema litoral. La ocupación de la costa y los procesos de urbanización y desarrollo turístico implican modificaciones de la franja costera mediante la construcción de diversos tipos de obras (espigones, diques, muros de contención, etc.). Asimismo, resulta de utilidad estudiar la ocupación de la costa a partir de datos demográficos, urbanísticos y turísticos y examinar las zonas que han sufrido mayor modificación. La comparación de ortofotografías de distintos años proporciona información de interés en este sentido (Figura 9). Por otra parte, conviene considerar otros elementos, como los usos industriales en la costa y los posibles efectos derivados de la construcción de embalses en las cuencas fluviales que vierten a la zona de estudio.

### Sucesos históricos

Los registros de eventos históricos proporcionan información muy valiosa sobre la incidencia de los procesos litorales. Es importante realizar un trabajo de búsqueda y recopilación de los temporales, avenidas, inundaciones, tsunamis, etc. que hayan tenido lugar en la zona estudiada, ya que proporciona una visión general de los principales peligros que pueden afectar al litoral (Figura 10). No obstante, hay que tener en cuenta que toda recopilación de sucesos históricos está sujeta a ciertas limitaciones, ya que el registro de eventos se produce casi exclusivamente en lugares poblados en los que la exposición a los riesgos es importante, y además los registros pueden ser inaccesibles, imprecisos o haberse perdido.

### Ascenso del nivel del mar

En este caso se considera el ascenso del nivel del mar relacionado directamente con el actual calentamiento del sistema climático. En este sentido, conviene conocer las posibles tendencias futuras de cara a una planificación efectiva de los usos del territorio. Existe numerosa bibliografía sobre el cambio climático, con estudios que reconstruyen los niveles del mar de las últimas décadas en zonas específicas (Figura 11) y calculan las tasas de ascenso o descenso que se han registrado, permitiendo estimar su posible evolución. Destaca, en ese sentido, el *Permanent Service for Mean Sea Level* ([www.psmsl.org](http://www.psmsl.org)), un servicio de acceso libre que recopila series temporales de registro del nivel del mar procedentes de mareógrafos repartidos por los principales puertos del mundo.

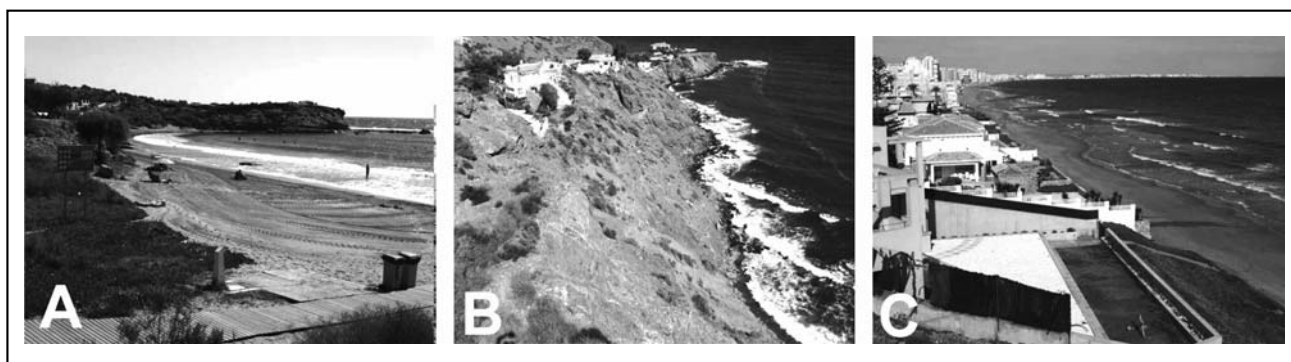


Figura 7. Fotografías del reconocimiento de campo que muestran distintos sistemas litorales de la Región de Murcia (España): A) alternancia de playas y acantilados medios, B) acantilados altos y C) playas largas y rectilíneas.

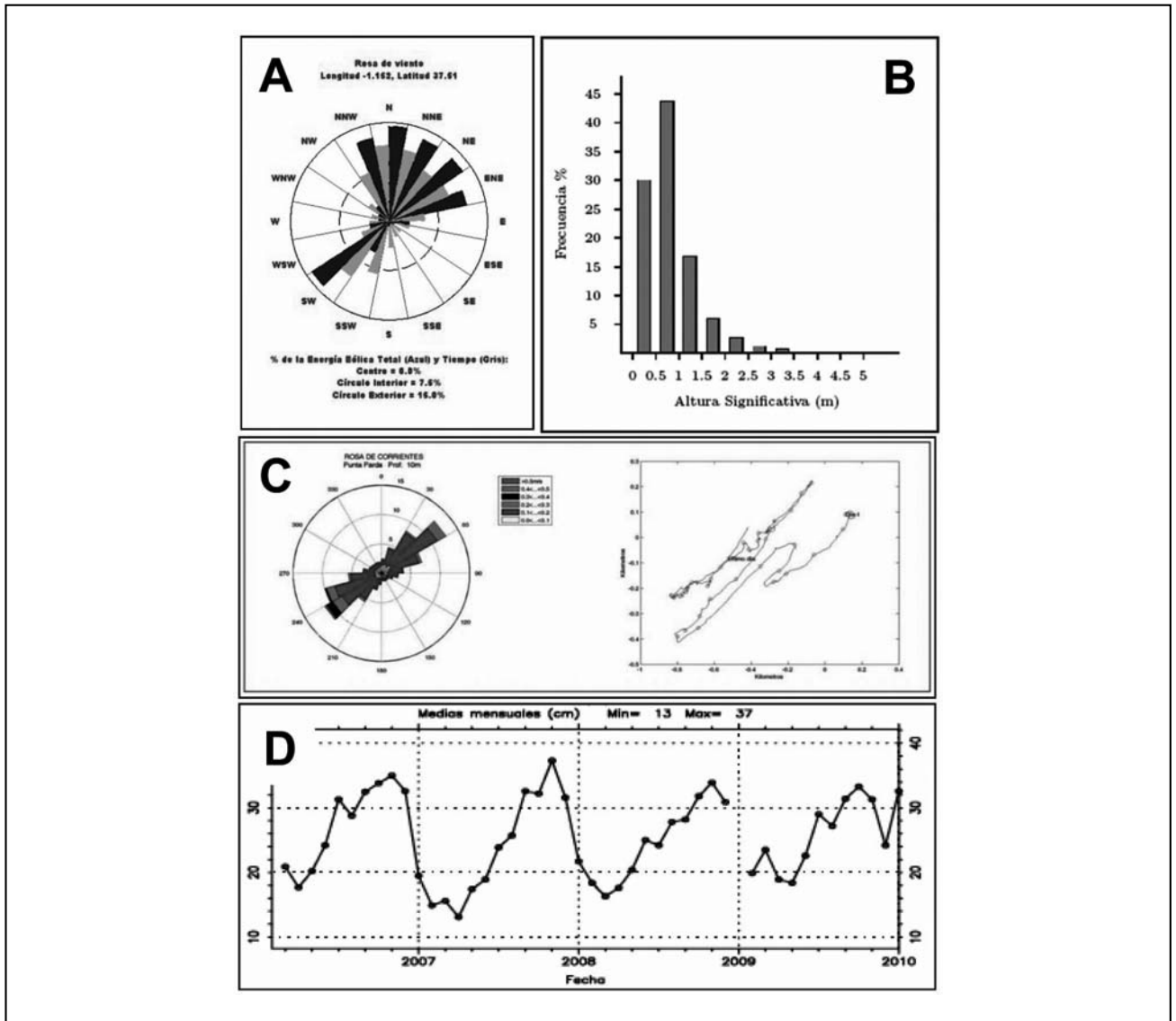


Figura 8. Ejemplos de: rosa de vientos (A), histograma de altura de olas (B), rosa y hodógrafo de corrientes (C) y registro de un mareógrafo (D) que caracterizan el clima marítimo de la Región de Murcia (España) ([www.atlaseolico.idae.es](http://www.atlaseolico.idae.es), [www.puertosdeestado.es](http://www.puertosdeestado.es)).

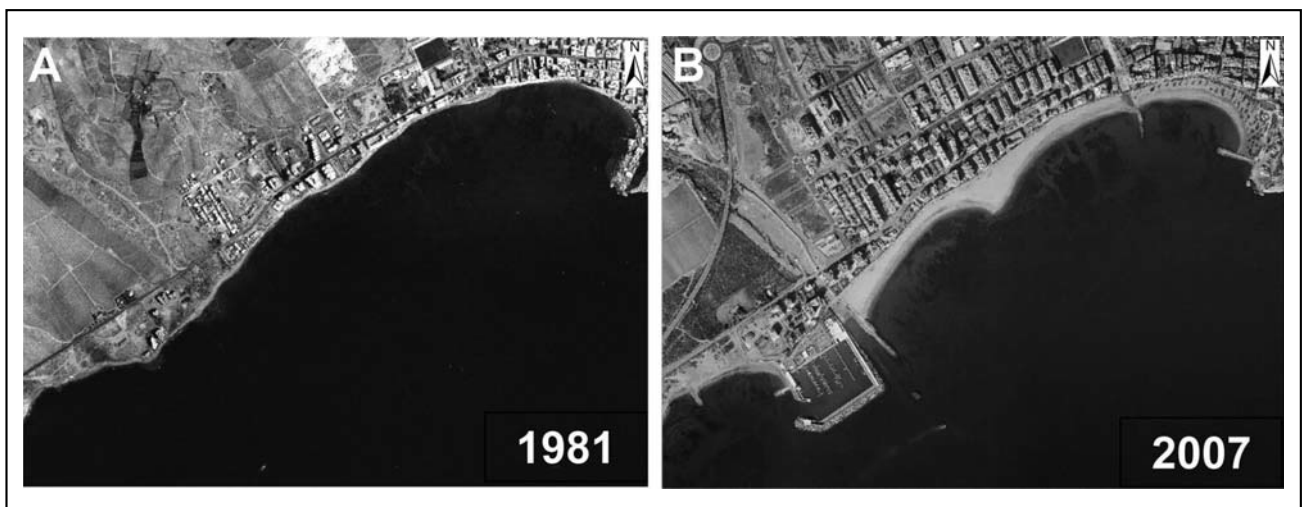


Figura 9. Comparación de fotografías aéreas de dos años de una de las localidades costeras de la Región de Murcia (España) ([www.cartomur.com](http://www.cartomur.com)).

### Tsunamis

Es necesario realizar una búsqueda de información existente sobre tsunamis históricos que hayan afectado el litoral estudiado (Tabla 1). La peligrosidad por tsunamis se evalúa partiendo del análisis de las posibles fuentes de generación de

tsunamis (terremotos, en la mayoría de los casos) y la simulación numérica de posibles eventos; así se obtienen estimaciones del grado de amenaza en las costas (Murty *et al.*, 2005).

### Inundaciones costeras

Las inundaciones costeras se producen por la ocupación de zonas emergidas por agua del mar (las producidas por ríos que se desbordan cerca de su desembocadura se incluyen en el apartado de inundaciones fluviales). La causa más frecuente de las inundaciones costeras son los temporales marítimos, en los que se superponen grandes olas con niveles del mar excepcionalmente altos asociados a bajas presiones atmosféricas y



Figura 10. Daños producidos tras un temporal ocurrido en 2010 en la Región de Murcia (España) ([www.larazon.es](http://www.larazon.es), [www.laverdad.es](http://www.laverdad.es)).

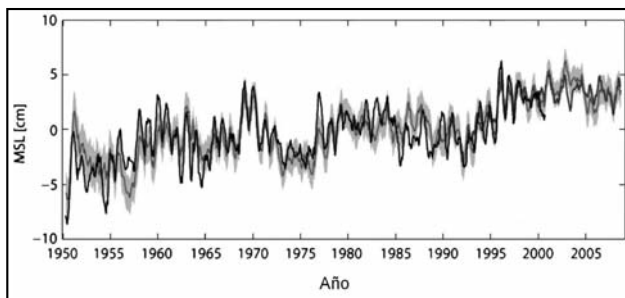


Figura 11. Reconstrucción del nivel medio del mar (MSL, mean sea level) en el Mediterráneo occidental durante el periodo 1950-2008 (Calafat y Jordà, 2011).

Tabla 1: Tsunamis registrados en el Mediterráneo occidental y en España recogidos en el catálogo de tsunamis del Instituto Geográfico Nacional ([www.ign.es](http://www.ign.es)).

Fecha	Localización	Descripción
-218	Cádiz	Tsunami en Cádiz
-210	Cádiz	Inundación en Cádiz
-60	Portugal	Costas inundadas
10/06/881	Cádiz	Retirada del mar en S España
05/05/1706	Islas Canarias	Retirada/inundación en Garachico
01/11/1755	SW Portugal	Tsunami catastrófico en el sur de la península Ibérica
02/11/1755	SW Portugal	Gran flujo y reflujo en Gibraltar
16/11/1755	Coruña	Flujo/reflujo del mar en La Coruña
31/01/1756	Baleares	Costas inundadas
09/10/1790	Mar Alborán	Inundación de Costas españolas y africanas
13/01/1804	Mar Alborán	Retirada del mar en la provincia de Almería
21/08/1856	Argelia	Retirada/inundación del mar en Jijel
22/08/1856	Argelia	Inundación en Jijel y Bougie
29/01/1885	Argelia	Cambio del nivel del mar en las costas de Argelia
15/01/1891	Argelia	Retirada del mar
09/09/1954	Mar Alborán	Registrado por mareógrafos
28/02/1969	Banco Gorringe	Registrado por mareógrafos
26/05/1975	AGFZ	Registrado por mareógrafos
14/08/1978	Cádiz	Registrado por un mareógrafo
10/10/1980	Argelia	Registrado por mareógrafos
21/05/2003	Argelia	Daños en embarcaciones en Baleares y costa peninsular
27/05/2003	Argelia	Variación nivel mar 10-15 cm en Mahón y Palma

vientos soplando hacia la costa (*storm surge*). No obstante, como se mencionó anteriormente, las causas de las inundaciones costeras pueden ser variadas y estar asociadas a diversos fenómenos (Figura 4). Los mapas de cotas bajas son de gran utilidad para determinar las zonas potencialmente inundables (Figura 12). El estudio y cartografía de las inundaciones costeras se basa también en el análisis de la geomorfología, los procesos litorales y los sucesos históricos (Benavente et al., 2006).

#### Erosión costera

La pérdida de sedimentos, característica de la erosión costera, se debe a la incidencia de los procesos litorales (corrientes, oleaje, viento, mareas, etc.) en determinados sistemas, especialmente costas arenosas. La erosión costera a medio plazo se puede analizar mediante la comparación de ortofotografías y la aplicación informática DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Esta aplicación, desarrollada por el USGS para el software ArcGIS, proporciona las tasas de erosión o acreción costera a partir de la posición de las líneas de costa de diversos años (Thieler et al., 2009) (Figura 13).

#### Movimientos de ladera

Se trata de un riesgo relacionado con los relieves costeros y que se ve acentuado por la acción de los procesos litorales (Figura 14). La metodología para la elaboración de los mapas de susceptibilidad por movimientos de ladera, ampliamente aceptada (Remondo et al., 2003), se basa en el estudio de los movimientos observados en el terreno, el análisis de los factores condicionantes (litología, pendiente, etc.) y la tipología de los

movimientos (desprendimientos, deslizamientos, etc.). No obstante, en las zonas litorales también hay que considerar los factores relacionados con la dinámica litoral.

#### Inundaciones fluviales

Las avenidas e inundaciones fluviales suponen un peligro para la zona litoral, aunque también se trata de fenómenos más terrestres que costeros. La metodología de estudio de inundaciones fluviales, también ampliamente aceptada (Díez-Herrero et al., 2008), se basa en el análisis de inundaciones históricas, datos geomorfológicos, precipitaciones y caudales para la elaboración del mapa de peligrosidad. Los efectos de las inundaciones fluviales, producidas por intensas precipitaciones, pueden superponerse a los producidos por inundaciones costeras por temporales marítimos, suponiendo un mayor peligro para el litoral.

#### CARTOGRAFÍA

A diferencia de lo que ocurre en las cartografías de similitud, inundaciones o movimientos de ladera, en el caso de los riesgos costeros no existen criterios de representación consensuados. Una de las representaciones cartográficas más completas de los riesgos asociados a la dinámica litoral es la empleada por el USGS (2002). En sus mapas, los rangos de peligrosidad se representan en una serie de franjas adosadas paralelas a la costa para cada peligro. En este trabajo se ha considerado un sistema de representación similar, con algunas variaciones dadas las características de la zona de estudio. En la Figura 15 se muestra el sistema de representación propuesto.

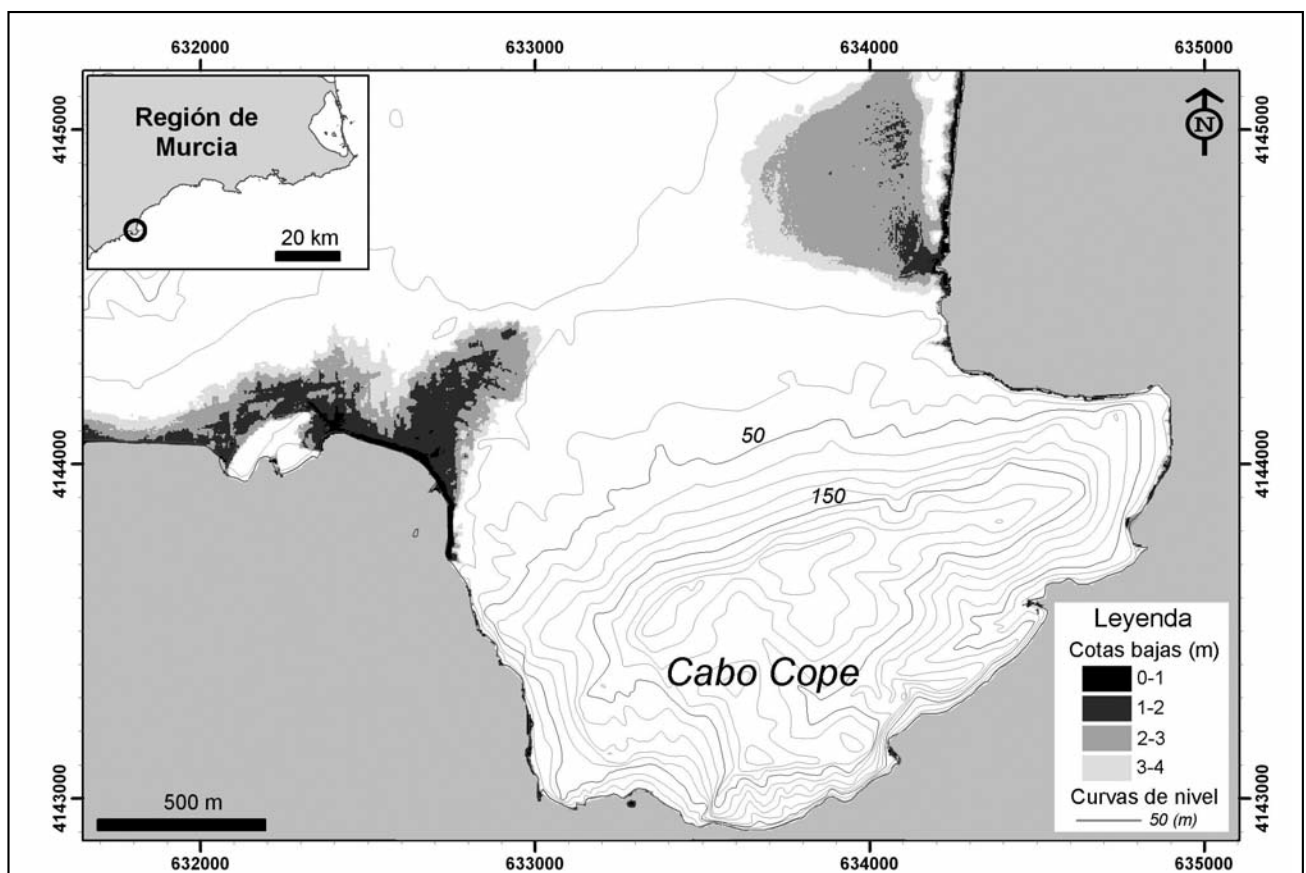


Figura 12. Mapa de cotas bajas de una zona de la Región de Murcia (España) obtenido a partir de los datos de un vuelo fotogramétrico digital y el correspondiente levantamiento LIDAR. Se observan las zonas más vulnerables ante inundaciones costeras (zonas más oscuras).

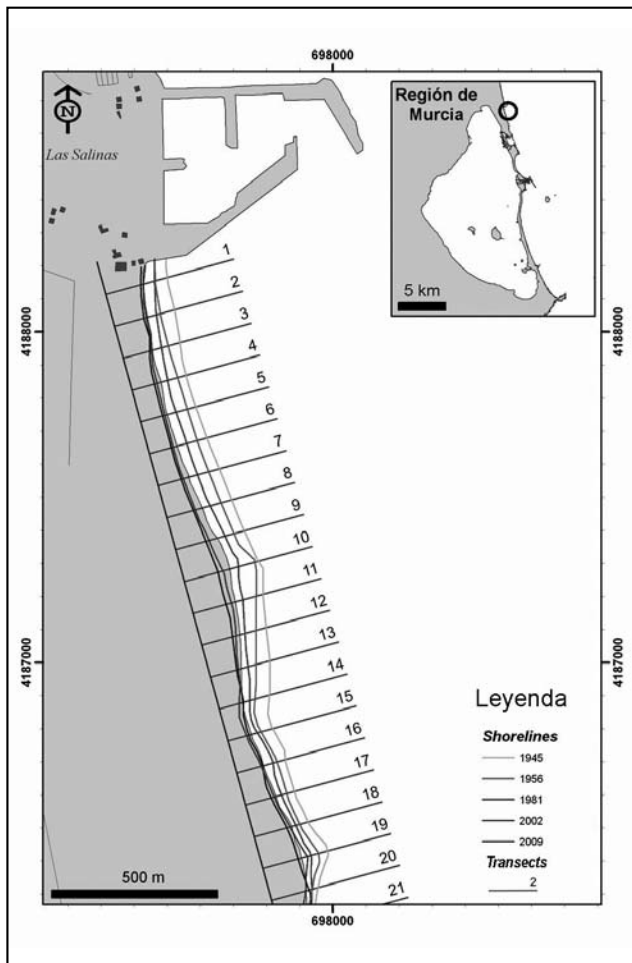


Figura 13. Análisis mediante la aplicación DSAS de una zona de la Región de Murcia (España). Se observan las líneas de costa (shorelines) de diversos años (entre 1945 y 2009), la línea base y los transeptos de análisis numerados.

En las dos primeras franjas se representan las características geomorfológicas de la costa: sistema litoral (acantilado alto, acantilado medio, costa baja, playas, obras marítimas y playas artificiales) y la pendiente (<math><10^\circ</math>, <math>10-25^\circ</math>, <math>>25^\circ</math>). Por otra parte, en las siguientes franjas se presenta una valoración de los riesgos que pueden afectar al litoral. En este caso: inundaciones costeras, inundaciones fluviales, movimientos de ladera y erosión costera. Los riesgos se han evaluado teniendo en cuenta los factores involucrados, empleando árboles de decisión y criterio de expertos. Se han considerado 4 intervalos de intensidad relativa para la valoración de cada riesgo (nulo-muy bajo, bajo, medio y alto). Finalmente, en la última franja se presenta una valoración global de los riesgos, clasificada en 5 intervalos (nula-muy baja, baja, media, alta y muy alta). En los mapas de síntesis, sólo se representaría esta franja sobre la línea de costa.

### CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo se presentan las bases metodológicas para el estudio y cartografía de riesgos costeros a escala 1:25.000. Esta metodología se fundamenta en el análisis de los riesgos asociados a la dinámica litoral: inundaciones, erosión, ascenso del nivel del mar, tsunamis y otros riesgos procedentes de tierra, y de los factores implicados: geomorfología litoral, procesos litorales, sucesos históricos y actuaciones humanas. A partir del análisis y cartografía de los citados riesgos y factores, y su posterior evaluación e integración, se obtienen los mapas de riesgos. Para su representación se utiliza un sistema en franjas paralelas a la costa para cada riesgo. En estas franjas también se representan las principales características geomorfológicas del litoral y la valoración conjunta del riesgo, resultando un sistema muy adecuado para el reconocimiento de los riesgos que pudieran darse en el litoral. La metodología y representación cartográfica desarrolladas proporcionan datos fundamentales para la planificación territorial y la prevención de riesgos en zonas costeras.



Figura 14. Distintos movimientos de ladera observados en el litoral de la Región de Murcia (España): A) desprendimiento, B) deslizamiento.

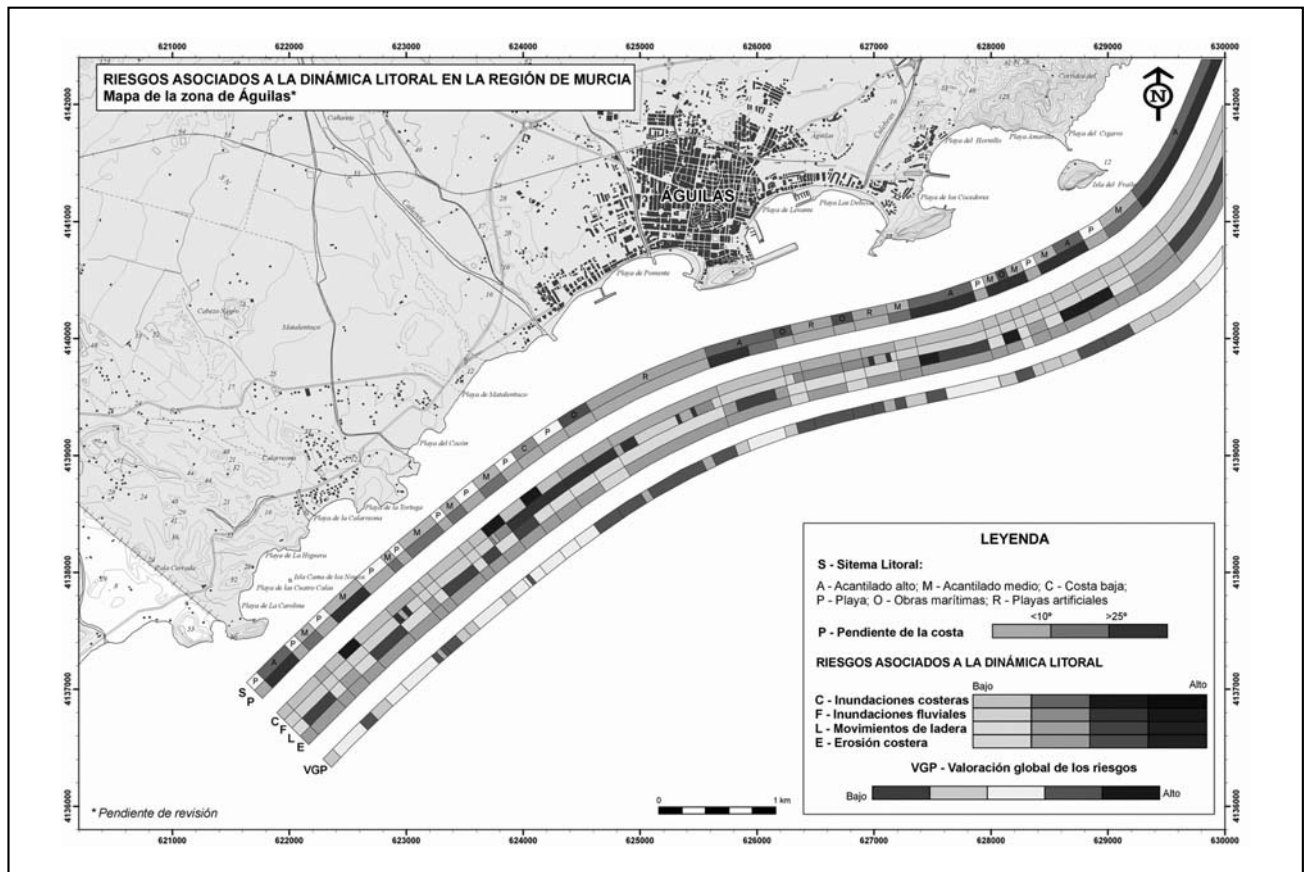


Figura 15. Representación cartográfica de los riesgos asociados a la dinámica litoral. Las franjas muestran la información referente a la geomorfología de la costa y la valoración de los riesgos asociados a la dinámica litoral.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto “Estudio y cartografía de los peligros geológicos en la Zona Litoral de la Región de Murcia”, realizado, bajo la dirección del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en convenio con la Consejería

de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (COPOT) de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM). Los autores agradecen a la COPOT y al IGME las facilidades proporcionadas y su implicación en el estudio de los riesgos geológicos en la Región de Murcia.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AYALA, F.J., OLCINA, J., VILAPLANA, J.M., 2004.  
Impacto social y económico de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-2000.  
*En: Gerencia de riesgos y seguros. Fundación Mapfre Estudios, 85: 17-29. Disponible en: www.mapfre.com*
- BARRAGÁN, J.M., 2004.  
Las áreas litorales de España: del análisis geográfico a la gestión integrada.  
*Ariel, 214 pp. Barcelona. Disponible en: www.uca.es*
- BENAVENTE, J., DEL RÍO, L., GRACIA, F.J., MARTÍNEZ, J.A., 2006.  
Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cádiz Bay Natural Park, SW Spain).  
*Continental Shelf Research, 26: 1061-1076.*
- CALAFAT, F.M., JORDÀ, G., 2011.  
A Mediterranean sea level reconstruction (1950-2008) with error budget estimates.  
*Global and Planetary Change, 79: 118-133.*
- CARTER, R.W.G., 1988.  
Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines.  
*Academic Press, 617 pp. Londres.*
- DABRIO, C.J., ZAZO, C., 1987.  
Riesgos geológicos en zonas litorales.  
*En F.J. Ayala; J.J. Durán y T. Peinado (coords.): Riesgos geológicos, IGME, 227-250 pp. Madrid.*

- DE ANDRÉS, J.R., GRACIA, F.J., 2002.  
La franja litoral: riesgos y protección.  
En F.J. Ayala y J. Olcina (Coords.), *Riesgos naturales. Ariel*, 1023-1057 pp. Barcelona.
- DÍEZ-HERRERO, A., LAÍN-HUERTA, L., LLORENTE-ISIDRO, M., 2008.  
Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones.  
*Guía metodológica para su elaboración. IGME*, 190 pp. Madrid.
- EUROSION, 2004.  
Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability.  
Directorate General Environment. European Commission. Reports-online 4. Disponible en: [www.euroSION.org](http://www.euroSION.org)
- FLOR, G., 2004.  
Geología Marina.  
*Servitec*, 644 pp. Oviedo.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., AYALA, F., ELIZAGA, M., 1988.  
Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España.  
*IGME*, 111 pp. Madrid.
- MURTY, T.S., RAO, A.D., NIRUPAMA, N., NISTOR, I., 2005.  
Numerical modelling concepts for the tsunami warning systems.  
*Current Science*, 90(8): 1073-1081.
- NZCCO, 2004.  
Coastal hazards and climate change. A guidance manual for local government in New Zealand.  
*New Zealand Climate Change Office, Ministry for the Environment*. Disponible en: [www.mfe.govt.nz](http://www.mfe.govt.nz)
- REMONDO, J., GONZÁLEZ, A., DÍAZ DE TERÁN, J.R., FABBRI, A., CENDRERO, A., CHUNG, C.F., 2003.  
Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in northern Spain, pp 437-449  
In CHACÓN, J.; COROMINAS, J. Editores. "Landslides and GIS" Special Issue. *Natural Hazards*, 30:3 pp 263-512.
- RESPONSE 2006.  
The experiences of the five European Coastal Study Areas and their full sets of coastal evolution and risk maps  
(Case Study: Central-Southern Coast, England, UK). En: RESPONSE project CD-ROM.  
Disponible en: [www.coastalwight.gov.uk/response.htm](http://www.coastalwight.gov.uk/response.htm)
- SEISDEDOS, J., MULAS, J., GRACIA, F.J., DEL RÍO, L., RODRÍGUEZ, J.A., PARDO, J.M., GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., 2012.  
Metodología de estudio y cartografía de los peligros naturales asociados a la dinámica litoral.  
Aplicación a la Zona Litoral de la Región de Murcia.  
*VIII Congreso Geológico de España*, Oviedo.
- SMALL, C., NICHOLLS, R.J., 2003.  
A global analysis of human settlement in coastal zones.  
*Journal of Coastal Research*, 19: 584-599.
- THIELER, E.R., HIMMELSTOSS, E.A., ZICHICHI, J.L., ERGUL, A., 2009.  
Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S.  
*Geological Survey Open-File Report 2008-1278*. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>
- USACE (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS), 2011.  
Coastal Engineering Manual (CEM).  
*Engineer Manual - EM 1110-2-1100*. Disponible en: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>
- USGS (U.S. GEOLOGICAL SURVEY), 2002.  
Atlas of Natural Hazards in the Hawaiian Coastal Zone.  
*Geologic Investigations Series I-2761*. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/imapi/i2761/i2761.pdf>



## Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia Michoacán, México

### Study of flooding in the city of Morelia Michoacan, Mexico

Arreygue Rocha, E.✉ - Pastor Gómez, N. - Chávez Negrete, C. - Alarcón Ibarra, J.

Recibido: 26 de Mayo de 2011 • Aceptado: 06 de Junio de 2012

#### Resumen

*En el presente trabajo se recogen los resultados del estudio de inundabilidad de la ciudad de Morelia (México). Frecuentemente se inundan algunas poblaciones del noroeste de la ciudad, debido a desbordamientos de los principales ríos que la atraviesan, concretamente los ríos Grande y Chiquito. La modelización de las zonas inundables se llevó a cabo mediante el programa HEC-RAS, lo que permitió conocer la capacidad máxima previa al desbordamiento y las características del flujo en régimen influenciado a partir del análisis de secciones transversales, incluyendo los numerosos puentes que atraviesan ambos ríos, y considerados, a priori, una de las causas fundamentales de los frecuentes desbordamientos observados. Finalmente, se estimó el periodo de recurrencia de los caudales de desbordamiento estimados previamente mediante el análisis hidráulico. A partir del estudio se determinaron los puntos más vulnerables, proponiéndose medidas correctoras con el objetivo de minimizar el riesgo en las poblaciones aledañas a los cauces.*

**Palabras clave:** Inundaciones, Río Grande, Río Chiquito, Morelia, HEC-RAS.

#### Abstract

*This paper focuses on the analysis of the degree of flooding vulnerability to which the city of Morelia is usually exposed to. Our concern arises due to the fact that every rainy season several neighborhoods in Morelia tend to get flooded, especially in the northern part of the city which the "Río Grande" runs through. The southeastern part of the city, through which the "Río Chiquito" reaches into, is often affected as well. Heavy rainfall in the upper part of the basin causes great flows, which in turn endanger the neighborhoods that are located near these rivers.*

*The runoff of both rivers, "Grande" and "Chiquito", was analyzed in order to create a computer-generated model using*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,  
Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Mich., México,  
Tel. +52-443-327-3856.

✉ arrocha@umich.mx



HEC-RAS to evaluate the displacement of their free surface waters under permanent moving conditions in each river as well as the geometric conditions of their transversal sections. The amount of water flow was also measured taking into consideration the bridges that rest across them without overlooking the geometry of such structures.

Having gathered all these data, the most vulnerable spots were identified and some simple preventive measures and actions were proposed. Such measures and actions will help diminish or even eliminate flooding risks for the settlements nearby these two main innercity water streams.

**Keywords:** River floods, Rio Grande, Rio Chiquito, Morelia, HEC-RAS.

## INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el número de sequías e inundaciones ha aumentado trágicamente, debido al deterioro de las condiciones medioambientales y al cambio climático provocados por los fenómenos de *El Niño* y *La Niña* (Díaz Bautista, 2008). Magaña (2004) y Landa et al. (2008), señalan que en los últimos 50 años han ocurrido doce acontecimientos de El Niño, siendo los más intensos los siguientes: 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992 y 1997-1998, pero también han ocurrido varios eventos de La Niña en los periodos de 1988-1989, 1995-1996 y 1998-1999.

Entre 1980 y 2000 los desastres naturales por inundaciones provocadas por lluvias excepcionales ocurridos en México han dejado daños materiales por más de 10,000 millones de dólares. Las características físicas del territorio condicionan que actualmente existan setenta y cuatro ciudades y doce millones de habitantes expuestos a efectos de ciclones tropicales, si bien la población en riesgo potencial por inundaciones asciende a 22 millones de personas. Por todo lo anterior la UNESCO (2007) señala que México es un país vulnerable a los impactos del cambio climático. De esta forma, la situación geográfica contribuye a que México esté expuesto, en mayor medida que muchos otros países del continente, a eventos hidrometeorológicos que pueden llegar a situaciones de desastre y cuyos

efectos se verán agravados por el calentamiento global (Magaña et al. 1998; Magaña, 1999). De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD, 2004), en el año 1999 se registraron las peores inundaciones de la historia de Latinoamérica, dejando 300,000 personas sin hogar.

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación del impacto hidráulico generado por los puentes construidos en los Ríos Grande y Chiquito, que atraviesan la Ciudad de Morelia en Michoacán, México, lo que ha ocasionado constantes desbordamientos. De igual manera se desea conocer la geometría actual de los cauces, identificar las márgenes más bajas, y las zonas de mayor sedimentación. Con la información recabada se proponen medidas de prevención que disminuyan el riesgo de las inundaciones.

## LOCALIZACIÓN

El Estado de Michoacán tiene una extensión territorial de 60,093 km<sup>2</sup> y forma parte de la Región Centro Occidente de la República Mexicana. La hidrografía del Estado está controlada por dos grandes ríos: el Río Balsas y el Río Lerma. En el Río Balsas se encuentran ubicadas la presa de Infiernillo, una de las más importantes del país, y la presa José María Morelos, mejor conocida como La Villita, ambas construidas con la finalidad de generar energía eléctrica.

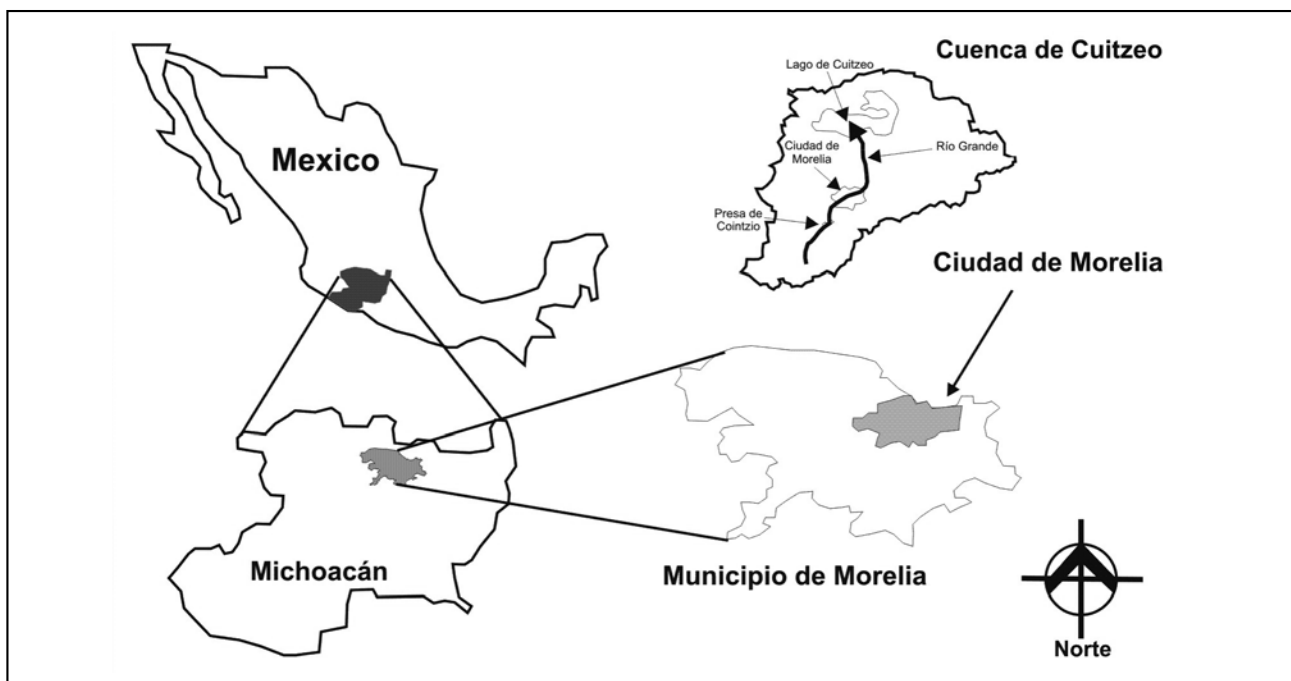


Figura 1. Localización de la Ciudad de Morelia con respecto a la República Mexicana.

La capital del Estado de Michoacán es la Ciudad de Morelia (Figura 1), su municipio se encuentra localizado al NO del Estado y tiene una extensión de 1,308 km<sup>2</sup>. La ciudad está ubicada en los 19°42' Latitud Norte y los 101°11' de Longitud Oeste, con una altura de 1941 m.s.n.m. y de acuerdo con el último censo la ciudad tiene 729,279 habitantes (INEGI, 2010).

La cuenca cerrada del lago de Cuitzeo (Figura 1) se localiza al Norte de la Ciudad de Morelia y ocupa una superficie cercana a los 4000 km<sup>2</sup>. Los principales ríos que drenan esta cuenca son: el Río Grande y el Río Chiquito que atraviesan la ciudad. El Río Grande tiene una dirección SO-NE y divide a la ciudad en dos partes, comprende casi en su totalidad a la ciudad de Morelia. La cuenca del Río Chiquito tiene su origen en la cañada de Jesús del Monte teniendo una dirección SE-NO y termina en la confluencia con el Río Grande.

La ausencia de un Plan de Crecimiento Urbano para la ciudad es la condición principal por lo que se rectificaron los cauces naturales de los ríos, utilizando los antiguos cauces para nuevos desarrollos urbanos. Además, los Ríos Grande y Chiquito son utilizados para las descargas de aguas residuales de la población y de las industrias. La problemática que se vive cada periodo de lluvias, es causada por las precipitaciones excepcionales que incrementan el caudal en los ríos que atraviesan la ciudad, provocando desbordamientos constantes, lo cual ha

inducido daños a las viviendas, vías de comunicación, etc., (Arreygue, 1998; Arreygue y Garduño, 2004).

En la última década los efectos de los eventos climáticos extremos han sido más frecuentes, debido a los cambios tan drásticos que se presentan en la región de Morelia. La precipitación promedio en la cuenca estudiada es 750 mm/año (Figura 2). En el año de 2002 se registró una precipitación de 900 mm/año, provocando pérdidas económicas cuantiosas debido a las inundaciones provocadas por los afluentes de los ríos analizados.

El 5 de septiembre de 2003 se registraron 75 mm de lluvia en dos horas, cantidad mayor al promedio histórico registrado hasta esa fecha. El mismo año se presentó otro evento extremo que causó severas inundaciones en la ciudad durante los días 15, 16 y 17 de septiembre.

Con la información que se obtuvo de la hemeroteca del periódico local (La Voz de Michoacán) en relación a las inundaciones históricas de la ciudad de Morelia, se observó que éstas son más persistentes a partir de la década de los 70. Cabe señalar que las inundaciones más frecuentes en los últimos años, se presentan con mayor frecuencia en el mes de septiembre (Arreygue y Garduño, 2004). Los procesos de expansión y crecimiento desordenados que ha sufrido la ciudad, provocaron que durante el periodo 1955-2010 ésta se viera afectada por más de 165 inundaciones de diferentes magnitudes; sólo en 2005 tuvieron lugar 10 de estos eventos (Arreygue et al. 2005).

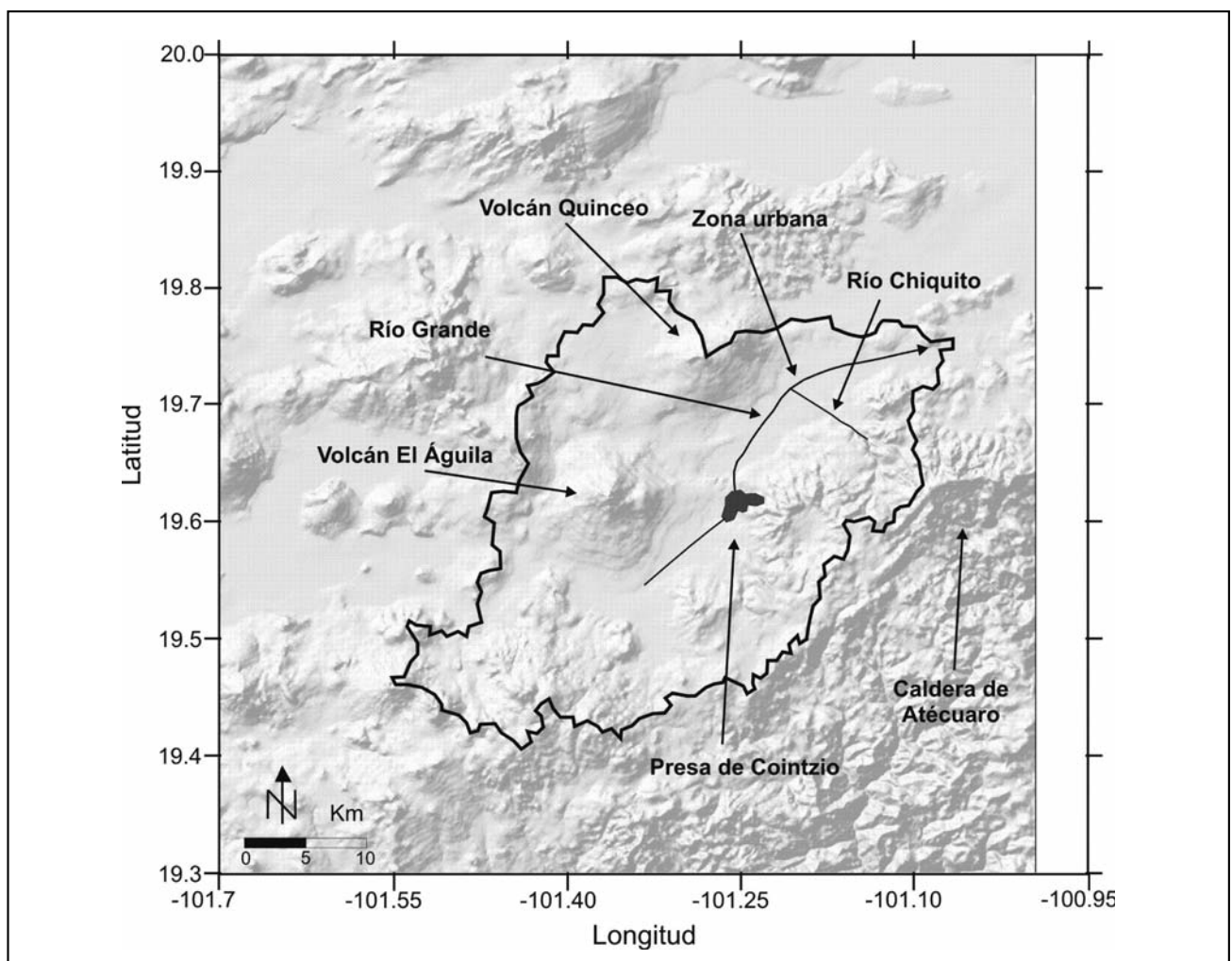


Figura 2. Cuenca hidrológica de la ciudad de Morelia (INEGI, 2005).

Hasta la fecha, 2005 ha sido el año con la temporada de lluvias excepcionales más intensas, provocando daños en viviendas e infraestructura; lo que trae como consecuencia el perjuicio a la ciudadanía en general debido a la suspensión de servicios provocados por las fuertes lluvias.

Según los registros de las lluvias del periodo 1955 a 2010 (CNA, 2010; SEDENA, 2010) el mes más crítico es septiembre, con 20 eventos extraordinarios. El mes de marzo ocupa el segundo lugar con un total de 15 eventos, siguiéndole el mes de octubre con 14 eventos. El periodo de lluvias para esta región coincide con los eventos extremos que se presentan en los meses de julio a octubre, aunque también los registros indican que se han presentado eventos extraordinarios en los meses de marzo y abril, posiblemente debido a factores como los frentes fríos.

La cuenca del Río Grande tiene un escurrimiento directo, estimado por la respuesta rápida a la lluvia, y que se considera como el resultado de la lluvia efectiva o en exceso. El río tiene una longitud aproximada de 88 km, es permanente debido a que numerosos manantiales y escurrimientos del lugar lo alimentan, además es regulado por la presa de Cointzio, la cual permite dividir su suministro en abastecimiento para la Ciudad de Morelia, para el distrito de riego y para regular las avenidas. El área de la cuenca del Río Grande es de 1,200 km<sup>2</sup>, y la pendiente modificada de su cauce principal es de 0,006 (Figura 2).

## METODOLOGÍA

### Datos de partida

La delimitación y estimación de la superficie de la cuenca se llevó a cabo mediante el modelo digital de elevación correspondiente a las cartografías E14A23, E14A23 y E14A13, editadas por el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI, 2005). Los registros hidrometeorológicos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2010) y la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA, 2010), concretamente los relativos a siete estaciones que se encuentran dentro de la cuenca. La información fue analizada, elaborándose histogramas de las precipitaciones de cada una de las estaciones. La lluvia promedio para la cuenca en estudio se calculó por dos métodos, Polígonos de Thiessen y de las Isoyetas. Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden al método de las Isoyetas.

### Aplicación del programa HEC - RAS

El análisis hidráulico se llevó a cabo mediante la aplicación del programa HEC-RAS en su versión 3.1, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de EE. UU. (US Army Corps of Engineers), que, entre otras aplicaciones, permite evaluar el efecto hidráulico inducido por puentes. La finalidad del software es evaluar el modelo de cálculo adoptando y analizando las características hidráulicas en base a sus fenómenos que están ligados al escurrimiento de las avenidas hídricas, al interno de canales artificiales y/o cursos de agua naturales.

La calibración del modelo para los dos casos en estudio se hizo bajo cuatro modalidades: la primera con datos medidos en campo, como la elevación y el gasto (se hicieron varias lecturas en diferentes sitios); la segunda se basó en observaciones directas del cauce y secciones del río para posteriormente comparar las secciones e imágenes; en la tercera se consideraron los

caudales de los escurrimientos hidrométricos de la estación de Atapaneo; la cuarta se hizo para verificar lo anterior con tablas y fórmulas propuestas por Chow (1998) y French (1993).

### Modelo del Río Grande

Para la modelación del Río Grande se tomó la información proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2004), que realizó un levantamiento topográfico de las secciones transversales del cauce y las secciones de los puentes, a lo largo de una longitud de 18.5 km. Para el modelo se consideraron 183 secciones transversales, con un coeficiente de Manning de 0.023, considerándose la hipótesis de flujo no permanente. El lecho del río tiene una pendiente del 5%, por lo que se consideró una velocidad de tránsito de 3 a 5 m/s. Además, en el tramo en estudio se localizan siete puentes vehiculares que se incluyen en el modelo. Se tomaron como base algunos caudales de desbordamientos históricos; los caudales de proyecto presentados en este trabajo son: 50, 75 y 90 m<sup>3</sup>/s. En los siguientes párrafos se muestran los resultados de las simulaciones realizadas.

### Modelo del Río Chiquito

Las secciones transversales y las secciones de los puentes se obtuvieron a través de un levantamiento topográfico utilizando una estación total. Se consideró, únicamente, la zona urbana, con una longitud de 7.0 km, adoptándose un coeficiente de Manning de 0.033 y 0.045 (márgenes con vegetación). Existe un tramo del río de 300 m que se ubica al ingreso a la ciudad (Club Campestre), recubierto de mampostería hidráulica, por lo que se adoptó un coeficiente de Manning de 0.017. La pendiente del río en la zona urbana es del 4%, con una velocidad variable de 3.0 a 4.5 m/s. Para el modelo se incluyeron 159 secciones transversales con 19 puentes vehiculares.

### Periodo de retorno

Con el objeto de conocer el periodo de recurrencia medio de los caudales límite a partir de los cuales se producían desbordamientos en los cauces analizados, se procedió al ajuste de los caudales máximos anuales observados durante el periodo 1928-2003 a las funciones de distribución Gumbel y Weibull, según lo propuesto por Chow et al. (1994), Linsley et al. (1990) y Moisello (1985). La validación de los resultados del ajuste efectuado se llevó a cabo por medio del conocido test estadístico "Chi" cuadrado (Chow et al. 1994). Los datos fueron proporcionados por la Delegación de Michoacán de la Comisión Nacional del Agua.

## RESULTADOS

### Aplicación del programa HEC-RAS

#### Modelo del Río Grande

En el caso del Río Grande se consideró un gasto de 50 m<sup>3</sup>/s. La finalidad, tal y como se indicó en párrafos precedentes, fue verificar la capacidad de los puentes, ya que por lo general la altura que tienen no es suficiente para dejar pasar el flujo. En la Figura 3 se observan el perfil del río y la lámina de agua. Las líneas verticales indican los diferentes puentes que se localizan en el tramo en estudio, observándose que para este caudal el río no tiene problemas para desalojar el flujo, a pesar de los desniveles y de las márgenes bajas que existen en algunas zonas.

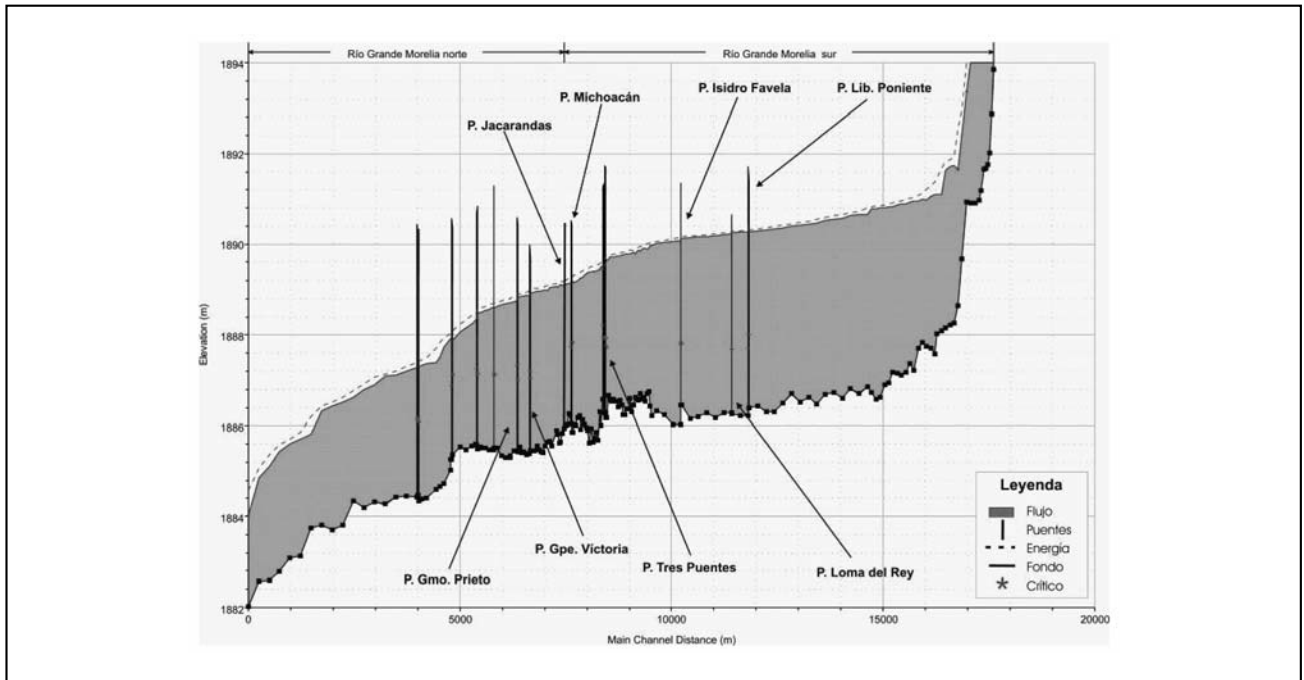


Figura 3. Perfil longitudinal del Río Grande para un caudal de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Posteriormente se aplicó un caudal de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ , reflejando que la mayoría de los puentes no cumplen con el claro o luz del puente y altura necesarios para dejar pasar el flujo, lo que supone un peligro para las poblaciones que se localizan a ambos lados del río en este tramo, ya que en algunas zonas las márgenes son muy bajas o en otros casos, forman remansos (Figura 4).

Las poblaciones más afectadas para cada periodo de lluvias son: Tres Puentes, Primo Tapia, Prados Verdes, Lomas de Santiaguito, Carlos Salazar, Granjas del Maestro, Ejidal Tres Puentes, etc. Según Arreygue *et al.* (2005) algunas de estas poblaciones tienen un desnivel de más de cuatro metros con respecto a la margen norte del río.

Para tener una idea más clara sobre los escurrimientos del Río Grande se elaboró un perfil con un caudal de  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ . El programa permite claramente observar el efecto de la crecida en las distintas secciones transversales consideradas, los puentes, así como el nivel del flujo. En este tramo del río se anexaron los puentes localizados en la población de Tres Puentes. La modelación sugirió que dichos puentes permiten el paso del flujo sin problemas. Sin embargo, aguas arriba de la población de Tres Puentes, existe el desbordamiento, principalmente de la margen izquierda.

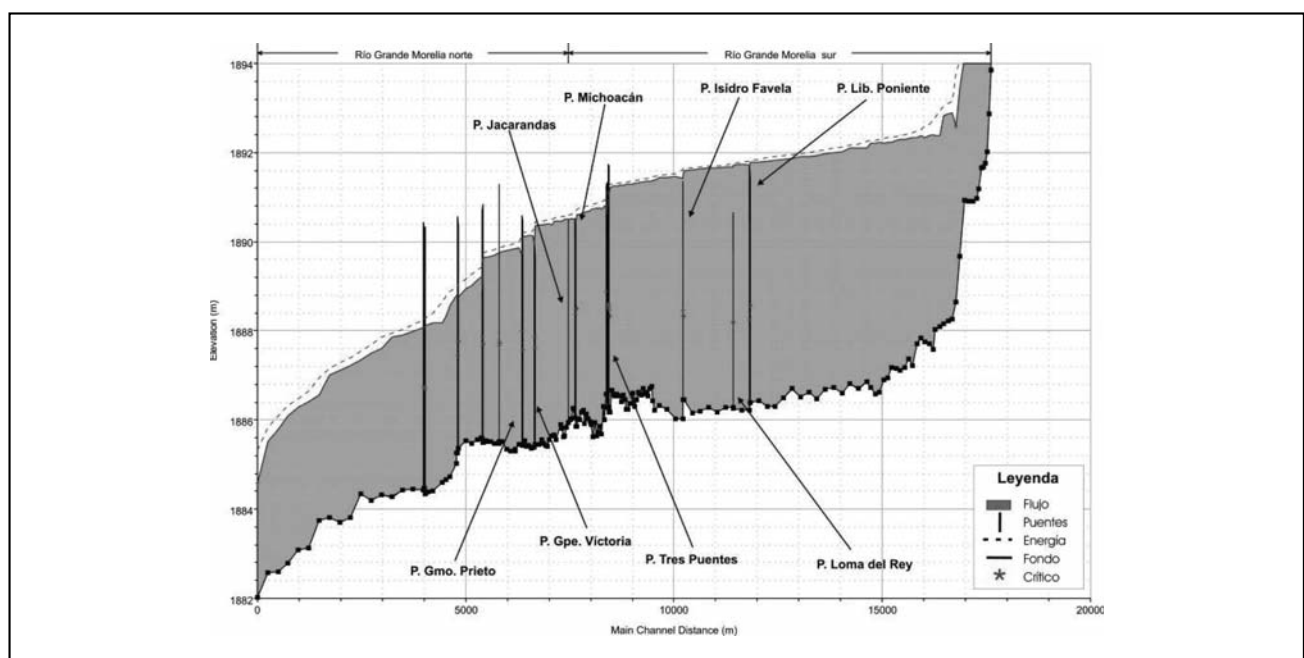


Figura 4. Perfil longitudinal del Río Grande para un caudal de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Modelo del Río Chiquito

La cuenca hidrográfica del Río Chiquito posee 85 km<sup>2</sup> y la longitud de su cauce es de aproximadamente 20 km. El cauce del río, en su tramo urbano fue rectificado en 1939 y en particular sus secciones fueron redimensionadas para un gasto máximo de proyecto de 125 m<sup>3</sup>/s. Posteriormente se hizo otro estudio sobre la capacidad hidráulica efectiva del Río Chiquito, en ausencia de los puentes, que dio como resultado un gasto de 70 m<sup>3</sup>/s. Tal reducción del caudal máximo está directamente relacionada con la elevada tasa de sedimentación y una espesa cubierta vegetal (SARH, 1985). Existen, además, diversos puentes, algunos de los cuales afectan directamente las secciones, reduciéndolas sensiblemente. El resultado de la modelación parece sugerir que las inundaciones en la Ciudad de Morelia son muy frecuentes y las principales causas de los desbordamientos del río son la poca capacidad hidráulica de sus secciones y la presencia de 19 puentes, todos en el tramo urbano.

El primer modelo se elaboró para un caudal de 50 m<sup>3</sup>/s. Estudios anteriores (Arreygue y Garduño 2004), revelaron que era la capacidad a la cual el río no se desbordaba. Sin embargo en este último estudio se reveló que algunos puentes poseían una altura inferior a la necesaria para dejar pasar el flujo, provocando un remanso en el caso de los puentes Camelinas (ya rediseñado para un caudal mayor en el 2007), Virrey de Mendoza y García Obeso, entre otros.

El segundo análisis se realizó con un gasto de 70 m<sup>3</sup>/s, observándose que la mayoría de los puentes entran en conflicto, porque su capacidad es menor a la requerida (Figura 5). La zona del Club Campestre se ve afectada con el desbordamiento del

río, ya que la luz de los puentes Campestre y Camelinas, que se encuentran al ingreso a la ciudad, tienen un área reducida impidiendo que el flujo circule libremente.

En el tercer modelo se aplicó un gasto de 80 m<sup>3</sup>/s, observándose que el flujo puede escurrir libremente sin ningún puente sobre el río, pero con todos los puentes, el río se desborda cuando sus márgenes están a cotas bajas.

La capacidad del río es variable así como las alturas de los márgenes, debido al constante dragado y a que, en ocasiones, el material retirado del lecho es depositado en las mismas márgenes dándole una mayor altura.

Otro de los principales problemas que se presenta sobre el Río Chiquito, es el relacionado con la inestabilidad de sus márgenes. El concreto hidráulico colocado está completamente fracturado y afectado por numerosos fenómenos de asiento diferencial, que han ocasionado una importante modificación de la capacidad de evacuación de caudales del río.

#### Periodo de retorno

Se procedió al ajuste de los datos observados del caudal correspondientes al periodo de 1955 a 2010 (59 años), a una función de distribución de Weibull. Los resultados del ajuste de la distribución con parámetros a=34,1638, y b=1,8749, se observan en la Tabla 1.

Se muestra además en la Figura 6 el histograma de frecuencia, donde no representa el número de datos observado en los diferentes intervalos y no los datos esperados en cada intervalo según la distribución de probabilidad de Weibull.

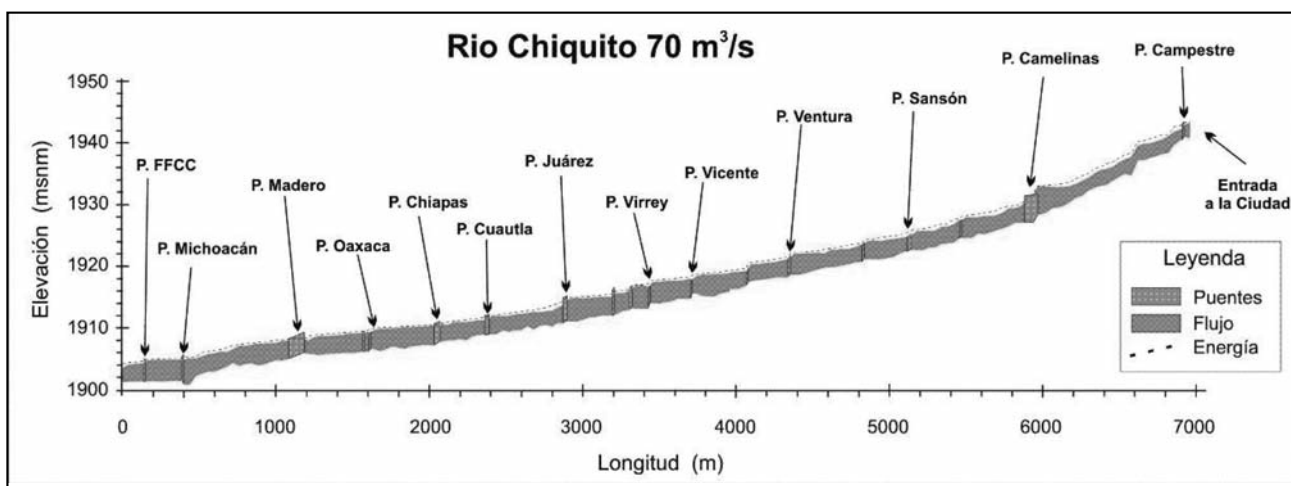
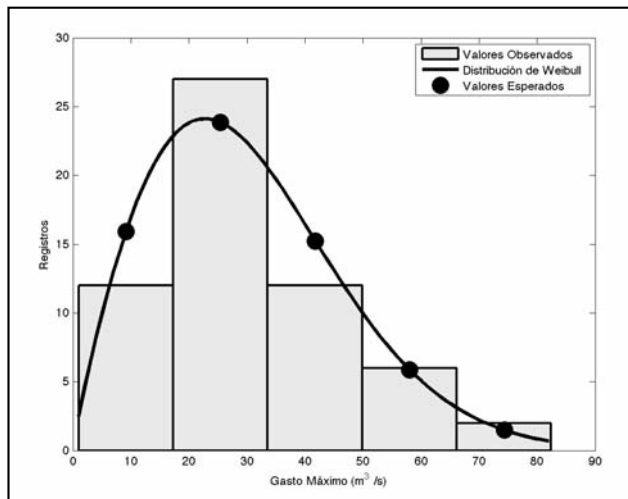


Figura 5. Perfil longitudinal del Río Chiquito para un caudal de 70 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 1. Resultados del ajuste de la distribución de Weibull.

Intervalo	Rango	nº	f(x <sub>i</sub> )	n <sub>e</sub>	χ <sup>2</sup>
1	1-17.3	12	0.2034	15.9258	0.9677
2	17.3-33.6	27	0.4576	23.8499	0.4161
3	33.6-49.9	12	0.2034	15.2440	0.6903
4	49.9-66.2	6	0.1017	5.8536	0.0037
5	66.2-82.5	2	0.0339	1.4744	0.1873
<b>Total</b>		<b>59</b>	<b>1.0</b>	<b>62.3477</b>	<b>2.2651</b>



**Figura 6. Histograma de frecuencia de los gastos máximos y ajuste de la distribución de Weibull.**

Para verificar la bondad del ajuste, se aplicó el test estadístico  $\chi^2$  mediante la expresión:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{[O_i - E_i]^2}{E_i}$$

donde:

$m$  = número de intervalos

$O_i$  = ocurrencias observadas en el intervalo

$E_i$  = ocurrencias esperadas en el intervalo

El valor total obtenido es  $\chi^2 = 2,2651$  y el valor determinado de la distribución de probabilidad "Chi" cuadrada con 2 grados de libertad es  $\chi^2_{\alpha, 2} = 2,095 = 58,3722$ , por lo que el ajuste de la distribución de Weibull a la serie de gastos máximos en el cauce del Río Grande se acepta.

Con la finalidad de conocer con qué frecuencia se presentarían lluvias excepcionales en la zona en estudio, se hizo el análisis de los Valores Extremos de Gumbel y Weibull. Para lo cual se tomaron los registros de los gastos máximos del Río Grande, para un periodo de 75 años. Para el caso de Gumbel resulta que para una avenida de 83 m³/s, el tiempo de recurrencia del evento es de 75 años. El resultado del ajuste a la

función de Weibull sugiere un periodo de recurrencia 75 años para un caudal de 82 m³/s, mientras que el caudal de 70 m³/s tendría un periodo de retorno de 30 años.

## CONCLUSIONES

Las precipitaciones extremas y las intervenciones antrópicas han ocasionado importantes inundaciones en la zona urbana de la ciudad de Morelia. Los cauces de los Ríos Grande y Chiquito fueron modificados en el pasado, circunstancia que se ha traducido en un aumento de la frecuencia de desbordamientos en zonas que correspondían a antiguos cauces y que ahora están ocupadas con viviendas e infraestructuras.

La capacidad de evacuación de caudales del Río Grande es 70 m³/s. Por lo tanto, valores de caudal iguales o inferiores al indicado no constituyen problema alguno para las poblaciones ribereñas ni para los puentes que atraviesan el cauce. Valores superiores a 95 m³/s crean problemas de desbordamientos principalmente en las poblaciones de Tres Puentes, Prados Verdes, etc. En el caso del Río Chiquito, se observó que el caudal apropiado para que el río no presente desbordamientos es 50 m³/s, mientras que a partir de 70 m³/s, existen problemas de desbordamiento evidentes.

Se aplicaron las funciones de distribución de Valores Extremos de Gumbel y de Weibull utilizando los gastos máximos históricos registrados en cada estación de monitoreo. Los resultados obtenidos para el Río Grande sugieren que el caudal de 70 m³/s presenta un periodo de recurrencia medio comprendido entre 25 y 30 años, mientras que el caudal de 80 m³/s presenta un periodo de retorno comprendido entre 70 y 75 años.

Como consecuencia del estudio realizado, se han propuesto acciones de mejora como desazolve periódico de los cauces, construcción de cárcamos de bombeo en determinados puntos, construcción de muros de concreto en las márgenes más bajas, remoción de la vegetación arbustiva y medidas diversas que impidan modificaciones en los usos del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen ampliamente a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo (Morelia, Michoacán, México), por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo. Se agradece a la Ing. Argelia Calderón Gutiérrez por su apoyo en la traducción al inglés del resumen del presente texto.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARREYGUE ROCHA E. 1998.

Le condizioni di pericolosità idrogeologica nella città di Morelia, Michoacan, Messico. *Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Firenze, Italia. 171 pp.*

ARREYGUE ROCHA E. Y GARDUÑO-MONROY V.H. 2004.

Eventos excepcionales e inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán. *Revista Ciencia Nicolaita, UMSNH. No. 39. 47-60 pp.*

ARREYGUE ROCHA E., ALCALÁ OCHOA S. Y GARDUÑO MONROY V.H. 2005.

Estudio geológico, hidrológico, hidráulico y topográfico de las zonas potenciales a inundaciones de las colonias Jardines de Santiaguito, Jaime Nuno y Carlos Salazar, en el municipio de Morelia, Michoacán. *Informe técnico. 29 pp.*

BEDIENT P.B. AND HUBER W.C. 2002.

Hydrology and floodplain analysis. *Prentice Hall. 1-165 pp.*

CHOW VEN TE. 1998.

Hidráulica de canales abiertos. *McGraw-Hill. 87 - 124 pp.*

- CHOW VEN TE, MAIDMENT DAVID R., Y MAYS LARRY W. 1994.  
Hidrología aplicada.  
*McGraw-Hill*. 131 - 179, 391 - 409 pp.
- CNA. 2010.  
Comisión Nacional del Agua.  
*Delegación Michoacán. Centro meteorológico de Morelia*.
- DÍAZ BAUTISTA A. 2008.  
Un análisis económico para México del Protocolo de Kyoto.  
*Desarrollo Local Sostenible. Vol. 1 No. 1. 20 pp.*
- EIRD. 2004.  
Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Vivir con el riesgo.  
*Informe mundial sobre iniciativa para la reducción de desastres (EIRD/ONU). 1-19 pp.*
- FRENCH R.H. 1993.  
Hidráulica de canales abiertos.  
*McGraw-Hill*. 111 - 163 pp.
- IMTA. 2004.  
Estudio del manejo de aguas pluviales en la zona metropolitana de Morelia, Estado de Michoacán.  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. 140-153 pp.
- INEGI. 2010.  
Instituto Nacional de Estadística y Geografía.  
*Censo de población y Vivienda 2010*.
- INEGI. 2005.  
Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática.  
*Modelo digital de elevación*.
- LANDA R., MAGAÑA V, Y NERI C. 2008.  
Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático.  
*SEMARNAT, México*. 135 pp.
- LINSLEY RAY K., KOHLER MAX A. Y PAULUS JOSEPH L.H. 1990.  
Hidrología para Ingenieros.  
*McGraw-Hill, Segunda edición*, 386 pp.
- MAGAÑA RUEDA V. 2004.  
Los impactos del Niño en México.  
*Centro de la Atmósfera, UNAM, Secretaría de Gobernación, México*. 229 pp.
- MAGAÑA R. V. 1999.  
Los impactos de "El Niño" en México.  
*Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México*. 229 pp.
- MAGAÑA V., J. VÁZQUEZ, J. L. PÉREZ Y J. PÉREZ. 1998.  
Impact of El Niño on precipitation in Mexico.  
*Geofísica Internacional. Vol. 42. Num. 3. p. 313 – 330*.
- MOISELLO U. 1985.  
Grandezze e fenomeni idrologici.  
*La Goliardica pavesel. Pavia, Italia*. 283 pp.
- SARH. 1985.  
Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Estudio hidrológico, Obras de protección a la ciudad de Morelia, Michoacán, cauce del Río Chiquito de Morelia.  
*Dirección general de irrigación y drenaje, Subdirección de programas y estudios específicos, Coordinación general centro, Residencia estatal Michoacán p 100 pp.*
- SEDENA. 2010.  
Secretaría de la Defensa Nacional. Centro Meteorológico 21ª Zona Militar, Morelia, Michoacán, México.  
*Informe inédito*.
- UNESCO 2007.  
Informe sobre desarrollo humano 2007-2008, La lucha contra el cambio climático,  
*Crisis climáticas: riesgo y vulnerabilidad en un mundo desigual*. 71-108 pp.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE).  
Hydrologic Engineers Center. HEC-RAS 3.1.  
*User's manual, 148 pp. and Hydraulic reference manual, 130 pp.*



## La gestión del riesgo para enfrentar los mitos y realidades del calentamiento global antropogénico

### *Risk management to face myths and realities of anthropogenic global warming*

Mora Castro, Sergio ✉

Recibido: 28 de Abril de 2012 • Aceptado: 11 de Junio de 2012

#### Resumen

*Según el IPCC-4, el potencial destructivo del calentamiento global antropogénico (CGA), de mantenerse la tendencia actual, es muy preocupante. De acuerdo con OMS y PNUD, las muertes anuales derivadas del CGA, combinando sus variables, alcanzan 150.000, cifra inquietante, pero que debe validarse. Al comparar los 750.000 muertos y 152 millones de afectados anualmente por otras amenazas naturales (sismos, volcanes, variabilidad climática, aludes torrenciales, El Niño-LaNiña/ENÓS, degradación de tierras), pareciera necesario redefinir los enfoques y prioridades respectivas. En cada país las políticas y procesos preventivos, deben definirse según sus condiciones y especificidades, tomando en cuenta cómo puede enfrentar la sociedad los extremos y si, al final, es ambiental y socioeconómicamente factible y admisible enfocarse en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y en la “adaptación” a una condición impuesta por los países más ricos e industrializados. Sin duda, el CGA es una amenaza para el bienestar humano en el mediano y largo plazo, por lo que debe atenderse como corresponde, pero no al costo de eclipsar la Gestión Integral del Riesgo y descuidar su tarea de reducir la vulnerabilidad en general. La Adaptación al Cambio Climático debe verse como un complemento para enfrentar al CG antropogénico, considerando el impulso político sin precedentes que ha recibido y aprovechando la oportunidad para captar recursos, resaltar la bondad del conocimiento científico-tecnológico y enfocar la acción preventiva para reducir, retener y/o transferir el riesgo. La reducción inteligente de la vulnerabilidad es, de todas formas, el mejor instrumento de “adaptación” ante cualquier riesgo.*

**Palabras clave:** *Calentamiento global, cambio climático, antropogénico, variabilidad climática, gestión del riesgo.*

#### Abstract

*According to IPCC-4, the destructive potential of anthropogenic global warming (AGW), if present trends persist, is a matter of concern. According to WHO and UNDP, the death toll derived from AGW, combining all its variables, reaches 150,000.*

Ingeniero geólogo, PhD

✉ sergiomo@geologos.or.cr



*This figure is more than worrisome, but it must be validated. However, when compared to the other 750,000 fatalities and 152 million people affected every year by other natural hazards (earthquakes, volcanoes, climate variability, torrential debris flows, El Niño-La Niña-ENSO, land degradation) it seems adequate to redefine focuses and priorities. Country policy and preventive processes shall be defined according to local conditions and specificities, taking into account how society faces extremes and if at the end, it is socioeconomically and environmentally feasible, and admissible to on reducing CO<sub>2</sub> emissions, and adapt to conditions imposed by already richer and industrialized countries. There is no doubt that AGW is threatening human well-being in the medium to long term, and therefore it must be dealt with as it is deemed required but integral risk management must not be eclipsed, and reducing of vulnerability be disregarded either. Climate Change Adaptation must therefore be seen as a supplement of risk management to face anthropogenic drivers of GW, taking the opportunity offered by its unprecedented political support and its capacities to attract resources, highlight scientific and technological knowledge and focus into preventive actions to reduce and/or transfer risk. An intelligent reduction of vulnerability will be, under any circumstance, the best "adaptation" instrument to face any kind of hazard.*

**Keywords:** Global warming, climate change, anthropogenic, climate variability, risk management.

## INTRODUCCIÓN

### No hay dudas: El clima cambia

Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés; [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf); <http://www.ipcc.ch/>) "...las voces se han elevado para anunciar y denunciar, inequívocamente, que la atmósfera se está calentando debido a las emisiones antropogénicas ([http://unfccc.int/portal\\_espanol/items/3093.php](http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php)) de gases..." [vapores y partículas] con efecto de invernadero (GVP-EI). Para el IPCC, el "cambio climático" se refiere a las modificaciones que, en el sistema tierra-atmósfera-oceano, son el producto de la actividad antropogénica y en estos cambios, no interviene la variabilidad natural ([http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)). Esta definición también es aplicada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ([http://unfccc.int/portal\\_espanol/items/3093.php](http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php)) y es errónea, al menos en parte.

A la luz de las evidencias, no se puede dudar que el clima esté cambiando, que esto traiga consecuencias sobre el ambiente, los recursos naturales y la vida humana y que, por lo tanto haya que tomar medidas para cambiar la situación. Sin embargo y, como será descrito en adelante, las variables preconizadas por IPCC no son las únicas, no son tan sencillas y tampoco se pueden atribuir, exclusivamente, a la intervención humana sobre el clima. Igualmente, serán analizadas otras consideraciones que se relacionan con la manera con la que se presenta al público la información y la forma de asignar la prioridad de este tema por parte de los tomadores de decisiones. Hasta la fecha pareciera que el IPCC ha dejado de lado a la Variabilidad Climática (VC) y en muchas instancias parece haber inducido a confundir al Cambio Climático (CC) con las modificaciones climáticas naturales de corto plazo. En adelante se intentará aclarar algunas de estas confusiones.

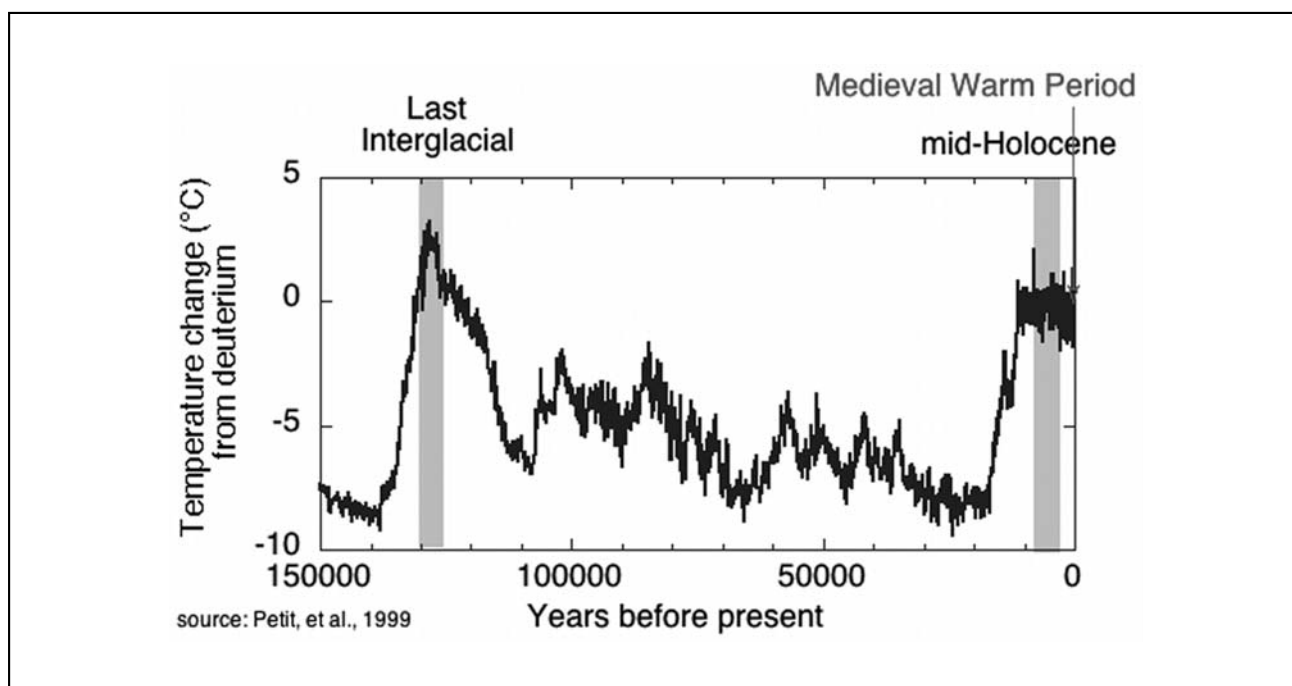


Figura 1. Variaciones de la temperatura global durante los últimos 150.000 años, derivadas del "proxy" Deuterio. Fuente, NOAA: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/paleobefore.html>

### ¿Desde cuándo y por qué cambia el clima?

El efecto de invernadero se originó cuando se formó la atmósfera en nuestro planeta, hace alrededor de 4500 millones de años. La Figura 1 muestra los cambios sucedidos durante los últimos 150.000 años (Pleistoceno Superior, Holoceno). La composición de la atmósfera y, por lo tanto la dinámica del efecto de invernadero, han variado paulatinamente por los cambios sucesivos, la acumulación de emanaciones volcánicas y los aportes astronómicos (cometas, meteoritos, gases de atrición). La evolución de su composición también ha dependido de la estabilidad de los sumideros biológicos y geológicos, así como de la radiación solar y cósmica y por los cambios geotectónicos y telúricos que hacen variar el eje de rotación y el campo magnético terrestres.

Por otra parte, la insolación está regida por la oblicuidad, excentricidad, longitud del perihelio y la precesión (variación de los ciclos estacionales producidos por los movimientos re-trógrados de los puntos equinocciales, derivados de la intersección del ecuador con la eclíptica; Figura 3; [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth\\_precession.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_precession.svg)), en virtud de los cuales se presentan los equinoccios y, a larga, los Ciclos de Milankovitch (en honor al ingeniero y astrónomo serbio que los estudió y descifró; Figura 3; [http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch\\_cycles](http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)).

El estudio de la distribución del isótopo  $O^{18}$ , o delta  $\delta^{18}O$ , en los núcleos de perforación en el hielo antártico, representa la medida de la relación entre los isótopos estables  $^{18}O$ ;  $^{16}O$ , la cual se aplica como un "proxy" de la temperatura ambiental, de la correlación entre la precipitación pluvial, de su interacción con el agua subterránea y como indicador del fraccionamiento de los isótopos (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore.html>),

como por ejemplo en Vostok-Antártica ([http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok\\_co2.html](http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok_co2.html)) y en Groenlandia (GRIP-GISP2: <http://www.gisp2.sr.unh.edu/>):

$$\delta^{18}O = \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{sample}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{standard}} - 1 * 1000\text{‰}$$

Estos indicadores, al correlacionarse con análisis micro-paleontológicos (e.g. foraminíferos bentónicos, dendrocronología, palinología), han reconfirmado las hipótesis de Milankovitch. Los altibajos de la radiación solar coinciden con la impronta en los marcadores termo-biológicos y del  $\delta^{18}O$  del hielo glaciar. Esto quiere decir que la parte natural del efecto de invernadero, del cambio climático, del calentamiento y enfriamiento global y de la variabilidad climática, han acompañado a nuestro planeta y a la vida que en él se ha desarrollado desde sus inicios y, de ello, hay numerosas pruebas confiables y contundentes en el registro estratigráfico y paleontológico mundial.

### La raíz del problema

La definición del problema del calentamiento global antropogénico (CGA) se traduce en tratar de comprender cómo se establecen los equilibrios y desequilibrios termodinámicos inducidos por alrededor de 100 partes por millón (ppm) adicionales de  $CO_2$ , más las otras 85 ppm de otros GVP-EI (e.g.  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NOx$ ,  $NH_3$ ,  $O_3$  troposférico, hollín, cloro-fluorocarbonos) ([http://www.noaa.gov/stories/2008/20080423\\_methane.html](http://www.noaa.gov/stories/2008/20080423_methane.html)) introducidos a la atmósfera por la actividad humana (a

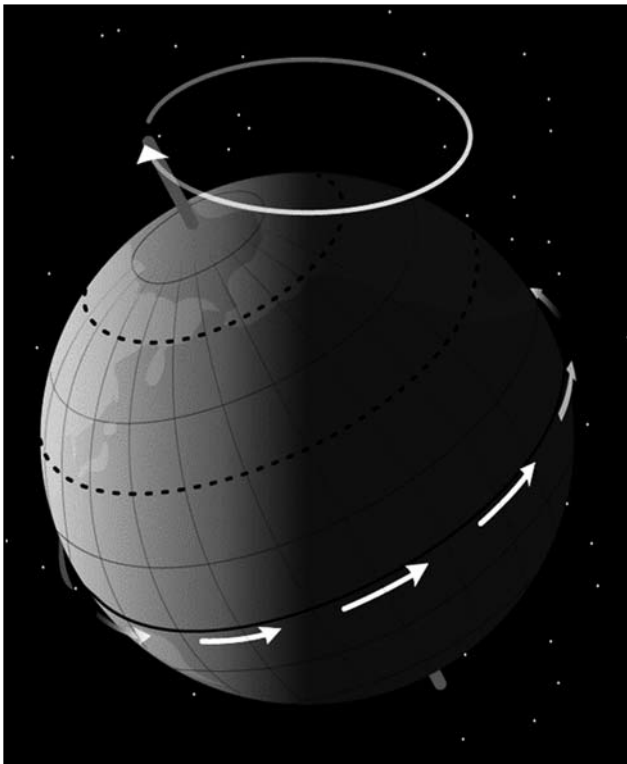


Figura 2. Esquema ilustrativo de la mecánica originadora de la precesión terrestre.

Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth\\_precession.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_precession.svg)

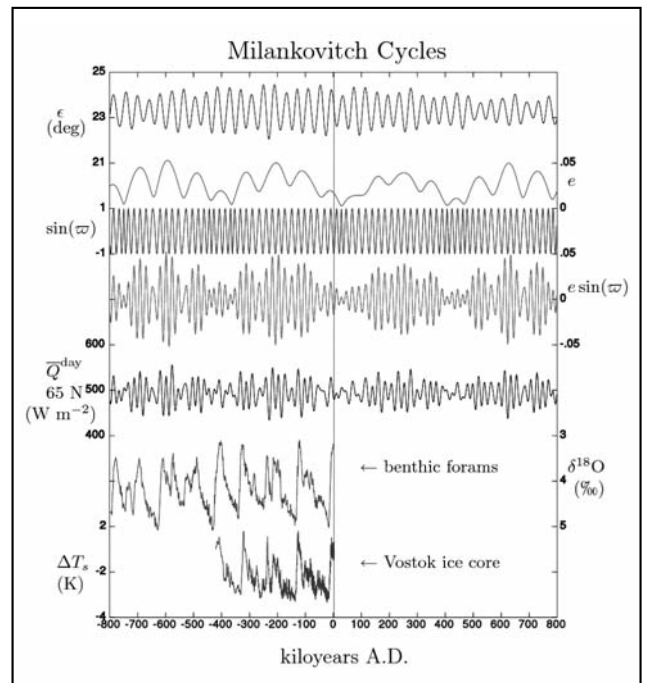


Figura 3. Variables de los ciclos de Milankovitch ([http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch\\_cycles](http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)); su correlación con las variaciones del isótopo  $^{18}O$  ó  $\delta^{18}O$  (delta O-18), la insolación en la superficie terrestre y con las evidencias del desarrollo de periodos de calentamiento y enfriamiento global

(Fuente: Petit, JR et al., 2001, Vostok Ice Core Data for 42 (<http://www.sciencemag.org/content/194/4270/1121>)).

partir de la era industrial, ca. Siglo XVIII) y que “guardan” la energía calórica de la radiación solar. Es importante tomar en cuenta que el material que más aporta, en cuanto al efecto de invernadero y a su equilibrio termodinámico, en realidad es el vapor de agua y que, aparte del albedo y la reflectividad de las nubes, del hielo y la nieve (los cuales también pueden aumentar o disminuir por causas antropogénicas y/o naturales), existen otros GVP-El que más bien “repelen” la energía solar y además facilitan la “fuga” de la radiación infrarroja hacia el espacio y, por lo tanto, “enfrian” la atmósfera: por ejemplo los aerosoles, el O<sub>3</sub> estratosférico, los sulfatos metálicos y otros. Como se deduce, el proceso de calentamiento y de enfriamiento es el producto de un balance termodinámico (Figura 4), el cual en este momento resulta ser positivo, o sea que los residuos impulsan y conducen hacia un incremento -gradiente- en las temperaturas. Sin embargo y de acuerdo con los registros de la Geología Histórica y de la Prehistoria, no es la primera vez que esto sucede y, más bien, estos cambios han sido muy frecuentes a lo largo de la evolución del planeta, e incluso recientemente durante los últimos miles de años.

El equilibrio termodinámico de la atmósfera se rige por el balance energético aportado por los elementos que la calientan y la enfrían. En condición “normal” debería haber un balance energético que cierre en “ceros”, de acuerdo con el “datum” natural y como por ejemplo el que había antes de la Revolución Industrial (s. XVIII, Era Común-EC) cuando el tenor de CO<sub>2</sub> era de alrededor de 280 ppm, mientras que en el presente es de cerca de 392 ppm (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/history.html>). De acuerdo con las mediciones realizadas por organismos certificados, desde los años 1970s la temperatura global

ha aumentado en alrededor de 0,5°C en promedio, un poco más en el hemisferio norte, un poco menos en el hemisferio sur y un poco menos aún en los océanos (Figuras 5a, 5b y 5c). La situación es preocupante, pues todavía no se sabe hasta cuándo continuará esta tendencia.

**Variabilidad climática y cambio climático**

El clima consiste en la conjugación de una serie de procesos atmosféricos con comportamiento cíclico, relacionados con la fisiografía e hidrometeorología y que se pueden describir física y matemáticamente. Desde aquí, la variabilidad climática se define como el conjunto de aspectos y parámetros que rigen y caracterizan, en el corto y mediano plazo, el comportamiento del clima y de sus singularidades temporales (i.e. interestacionales, plurianuales, hasta quizás de algunas décadas). Para profundizar más en estos conceptos se sugiere consultar las definiciones del National Oceanic and Atmospheric Administration ([http://www.oar.noaa.gov/climate/t\\_observing.html](http://www.oar.noaa.gov/climate/t_observing.html); <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/end.html>). Como ejemplo se puede mencionar la temporada ciclónica tropical, con las variaciones anuales de sus características de los vórtices, definidos específicamente en cada hemisferio y los parámetros críticos, gradientes y umbrales del balance energético en la atmósfera y océanos, de la presión, temperatura y humedad. Estos parámetros varían en cada temporada e interanualmente: áreas genéticas, condiciones de origen, trayectorias, tamaño, intensidad (i.e. depresiones, tormentas, huracanes) y sus despliegues termodinámicos correspondientes. De la misma manera, la pluviosidad (estaciones lluviosa y seca) varía cada año, al cambiar su entrada, salida, intensidad y distribución espacial, a causa de

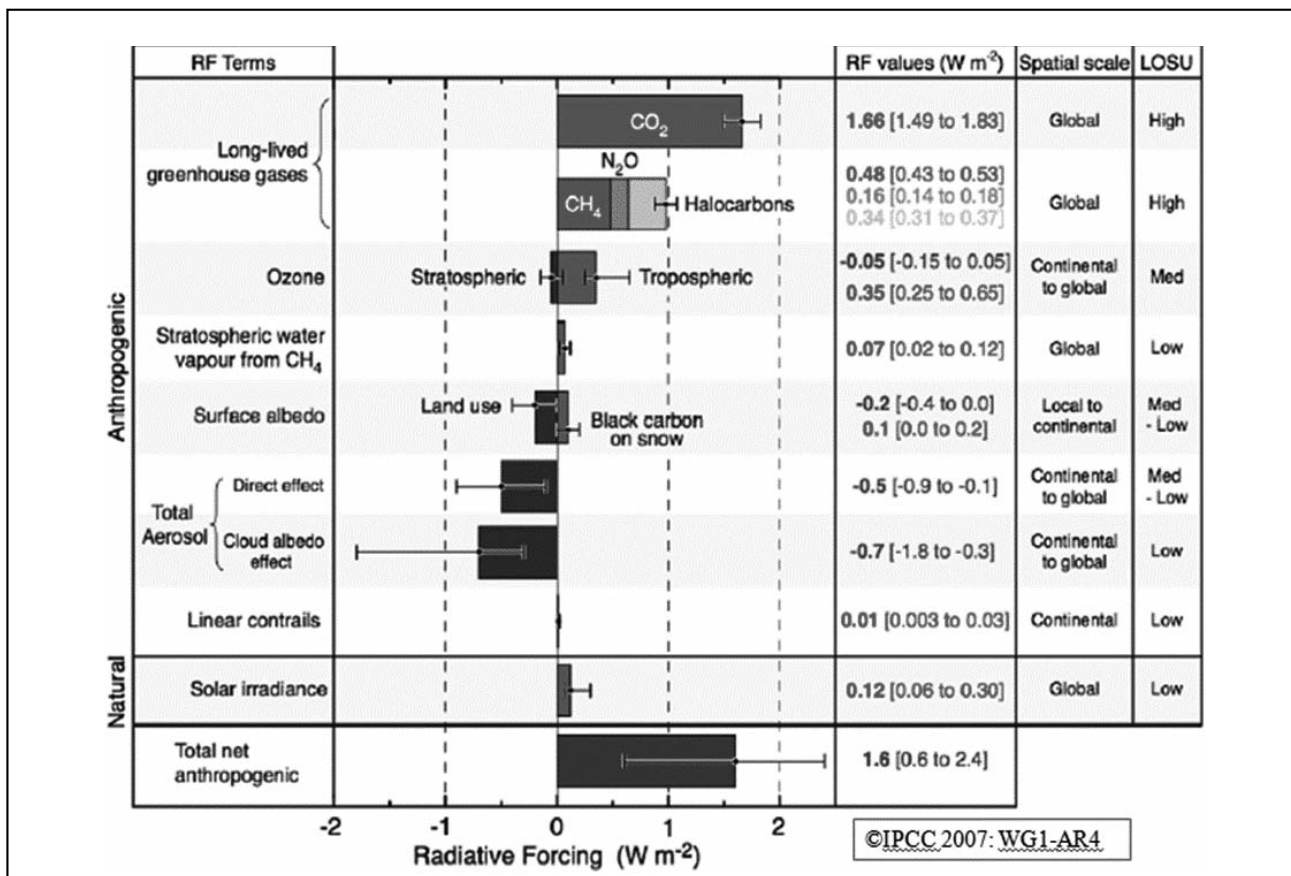


Figura 4. Reacción y balance energético ante la radiación solar de los gases, vapores y partículas con efecto de invernadero (Fuente: IPCC 2007-WG1-AR4©; Ver también la Figura 13)

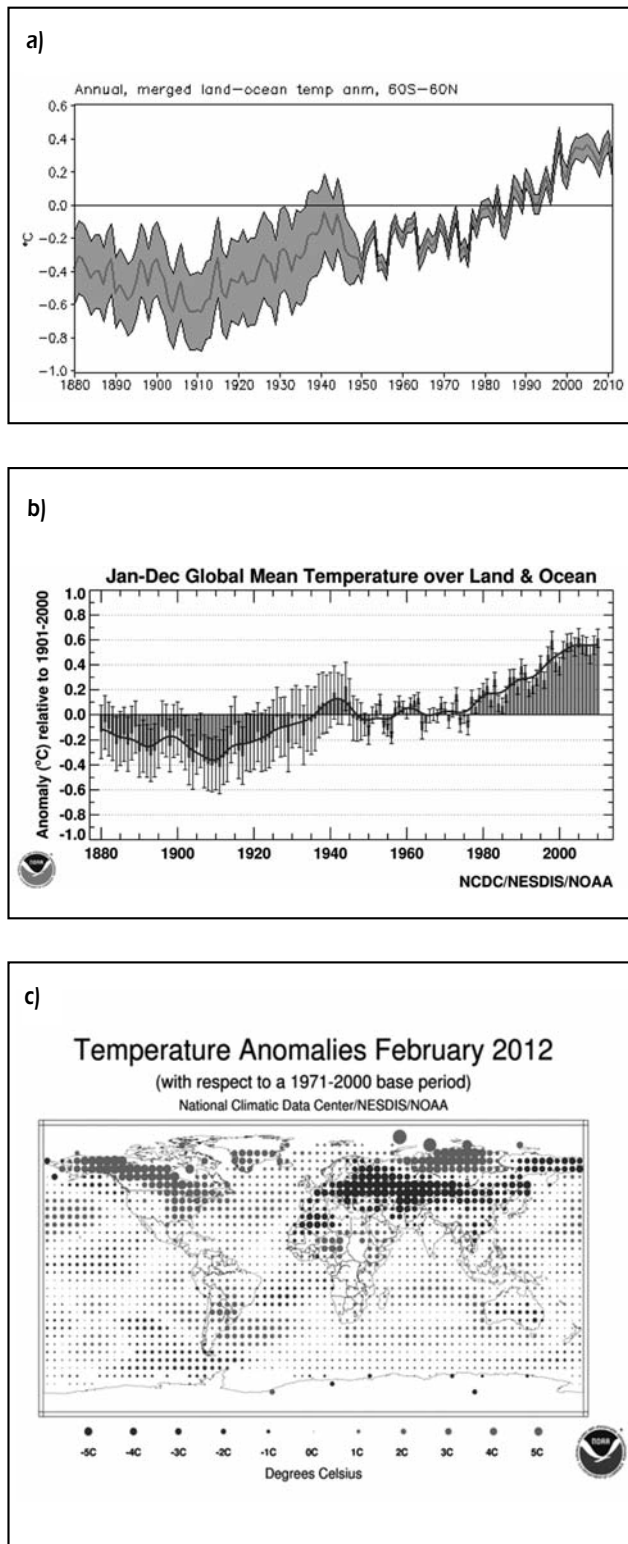


Figura 5. Variaciones de la temperatura (anomalía ERSST.v3b anual): a) y b) desde 1880 hasta el presente, nótese que la información es más confiable a partir de los años 1950s y que el incremento de la temperatura registrada a partir de los años 1980s es mayor que la incertidumbre de los datos, y c) Distribución espacial, en el globo, de las anomalías de temperaturas registradas, Febrero 2012 (Fuente: NOAA, 2012; <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/visersst.php>; <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/>; <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>)

la influencia que ejercen los procesos globales (El Niño/La Niña-ENOS, frentes polares, Zona de Convergencia Intertropical, actividad ciclónica), circulación termo-halina en los océanos y las condiciones fisiográficas, micro-climáticas y sinópticas locales. Por su parte, el cambio climático es producido por las variaciones atmosféricas, en el largo plazo (i.e. decenios, siglos, milenios, millones de años) y derivadas de la composición de GVP-EL. Estos cambios pueden conducir hacia el calentamiento o hacia el enfriamiento global, según resulten los balances termodinámicos respectivos, y de acuerdo con una línea de base (“datum”) referencial específica. En la actualidad y bajo el impulso de la actividad antropogénica, los síntomas indican un proceso de calentamiento relativo con respecto a las temperaturas registradas durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX (Figuras 5a, 5b y 5c). Sin embargo, debe recordarse que la atmósfera ha pasado por innumerables períodos de calentamiento y enfriamiento, de acuerdo con sus cambios de composición y equilibrio termodinámico (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/cretaceous.html>; <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/ipcc2007/ipcc2007.html>). De ellos, los mejor conocidos son los episodios del Cuaternario (i.e. últimos 2,3 millones de años), asociados con las glaciaciones del Danubio, Gunz, Mindel, Riss y Würm (I, II, III) y con sus respectivos inter y post-glaciares. Los registros paleoclimáticos muestran que el clima ha cambiado de condiciones predominantes, incluso de manera relativamente rápida (húmedo o seco, caliente o frío) durante los últimos 120.000 años (Figura 6), a causa de las variaciones en la circulación oceánica y de los eventos interstadiales y estadales (i.e. ciclos de Dansgaard-Oeschger (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/abrupt-change.html>). El Würm III, la glaciación más reciente, sucedida hace entre 11.500 y 12.900 años (Figura 6) y que concluyó hace unos 11.000 años, sucedió luego del descenso súbito de la temperatura sucedido durante el episodio del Dryas Reciente (i.e. “Younger Dryas”; <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Epica-vostok-grip-40kyr.png>),

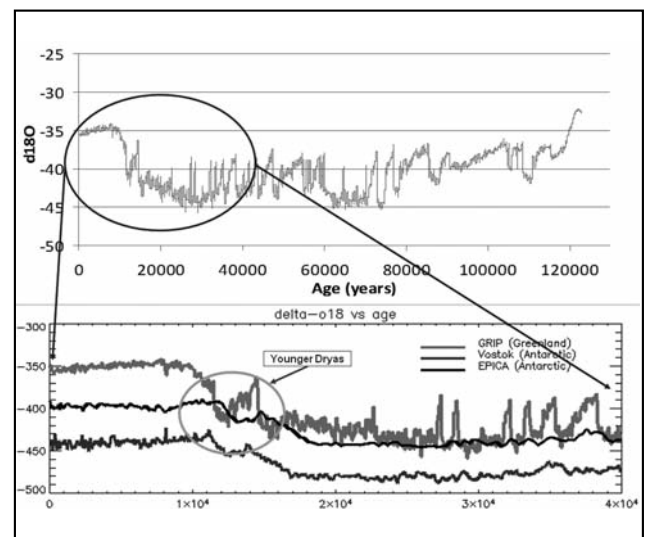


Figura 6. Evolución de las temperaturas durante los episodios de enfriamiento y calentamiento global del Pleistoceno tardío y el Holoceno (ca. 120.000 años, al presente). El “Younger Dryas” o “Dryas Reciente”, marcó el inicio del Holoceno y el último del ciclo de glaciaciones del Pleistoceno (i.e. Würm III; Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Epica-vostok-grip-40kyr.png>)

cuando se interrumpió abruptamente el calentamiento desarrollado durante del final del Pleistoceno y que luego condujo hacia el descenso “súbito” de la temperatura global, de alrededor de 5°C, en un lapso de apenas unos 15 años. Su causa fue posiblemente la interrupción parcial o total de la circulación termo-halina en el Atlántico Norte, ocasionada quizás por un flujo repentino de agua dulce y fría proveniente del desprendimiento y fusión de una gran masa de hielo del casquete polar del Ártico y/o quizás también de Groenlandia.

Luego de esto, el clima ha pasado por un período de estabilidad relativa, aunque no han faltado los altibajos, como por ejemplo el episodio de la “Pequeña Glaciación de la Edad Media”, en los alrededores del siglo XII y otras menores durante los siglos XIV y XV, precedidos y/o seguidos por períodos más calientes (Figura 7). Más recientemente, durante los últimos 50 años (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/history.html>; <http://co2now.org/>) y paralelamente al aumento del tenor de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (de 280 a 385ppm), se ha registrado un incremento de la temperatura global en cerca de 0,5°C en promedio. Al mismo tiempo se observa la fusión “precoz” de picos nevados y casquetes glaciares (ver ejemplos en las Figuras 8a, 8b, 8c y 8d), un leve incremento en las temperaturas y el nivel medio del mar (Figuras 9a, 9b y 9c) y otros cambios, aún poco esclarecidos y documentados en los regímenes de precipitación en algunas regiones. Por otra parte, en los últimos años se ha observado el debilitamiento y saturación del sumidero oceánico del CO<sub>2</sub> debido a su acidificación, al igual que el del sumidero terrestre por la deforestación y los cambios en el uso y degradación de las tierras. Parte de la incógnita se refuerza al preguntarse ¿Qué pasará si siguen aumentando las fuentes y se debilitan los sumideros de GVP-EI al ritmo actual?

### ¿El cambio climático, aumenta la intensidad y la frecuencia de las amenazas naturales?

Dado que el cambio climático causado por el exceso de emisiones antropogénicas de vapores, gases y partículas con efecto de invernadero (GVP-EI) se traduce en el denominado calentamiento global, se ha planteado la hipótesis, por parte del IPCC y de otros autores, que el incremento de la temperatura atmosférica y oceánica induce un incremento (delta-gradiente) de la intensidad y frecuencia de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas. El planteamiento se esquematiza, de manera simplificada, en la Figura 10.

Derivado de este proceso informativo, es frecuente escuchar y leer las declaraciones categóricas de personas que afirman que las lluvias, las sequías y los ciclones ya son más o menos intensos a causa del calentamiento global. Más allá de que en efecto pudiesen realmente existir estos cambios, estas afirmaciones son temerarias y la mayoría de las veces fundamentadas en datos parciales aún no sujetos a validación objetiva, e incluso derivados de la especulación o del análisis incompleto, subjetivo, sesgado o insuficiente de la información. La mayoría de las veces, los puntos de referencia de los que se derivan estas conclusiones precoces no poseen todavía suficiente rigurosidad estadística a causa de la imprecisión de las mediciones climatológicas, de la escasez de datos con suficiente extensión temporal, la escasa resolución y la elevada imperfección de los modelos probabilísticos aplicados. Este problema ha desembocado en la desorientación del proceso de toma de decisiones y de la formación de la opinión pública en general.

El debate sobre el calentamiento global antropogénico gira también y específicamente alrededor de esta pregunta: ¿Incide ya en la dinámica y genética de los ciclones tropicales,

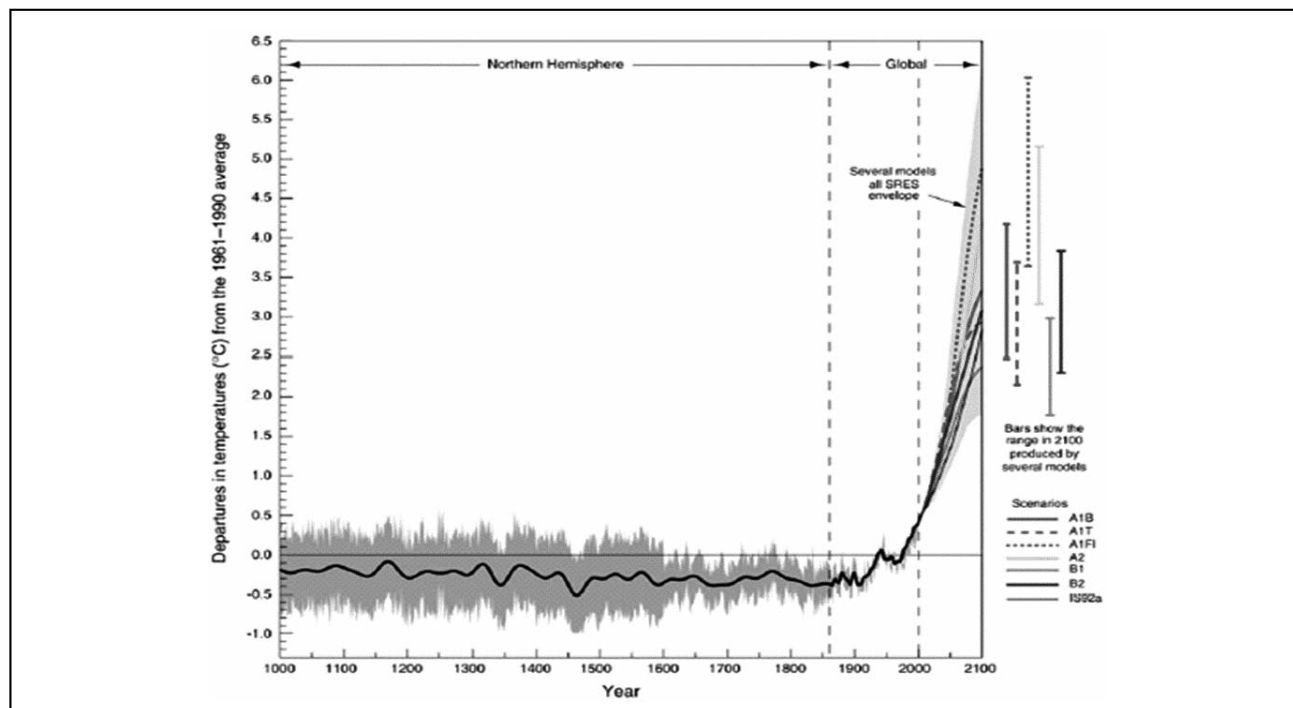


Figura 7. Variaciones de la temperatura superficial en el planeta, entre los años 1000 y 2100 de la Era Común-EC. La información paleo-climática proviene de la interpretación de datos “proxy” y las extrapolaciones, a partir de 2010, fueron realizadas por IPCC-4 (Fuente: NOAA e IPCC-SRES)

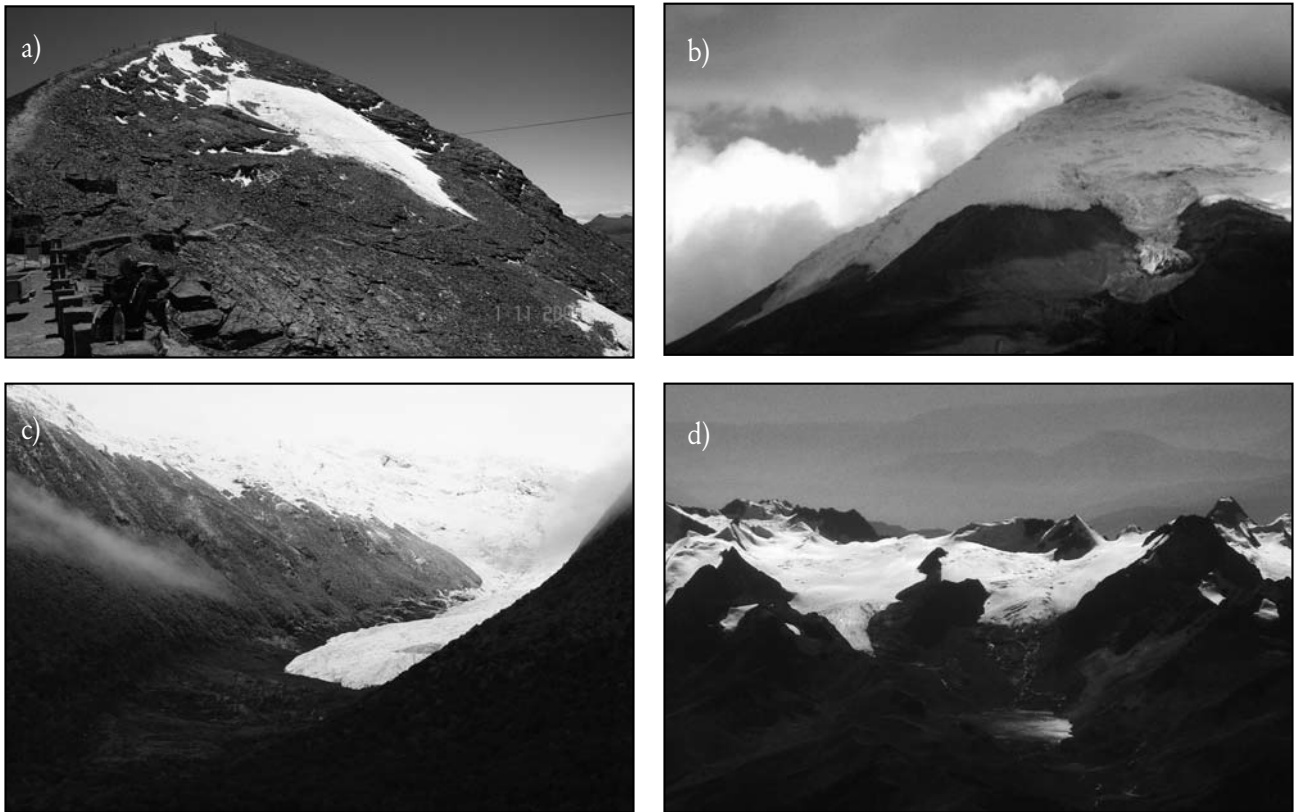


Figura 8. Ejemplos de la reducción del volumen y área de algunos glaciares andinos: a) Chacaltaya, Bolivia (noviembre, 2005); b) Cotopaxi, Ecuador (agosto, 2006); c) Seco-Calafate, Argentina (mayo, 2007); d) Pico Blanco-Quimsa Cruz, Bolivia (octubre, 2007). Fotos del autor.

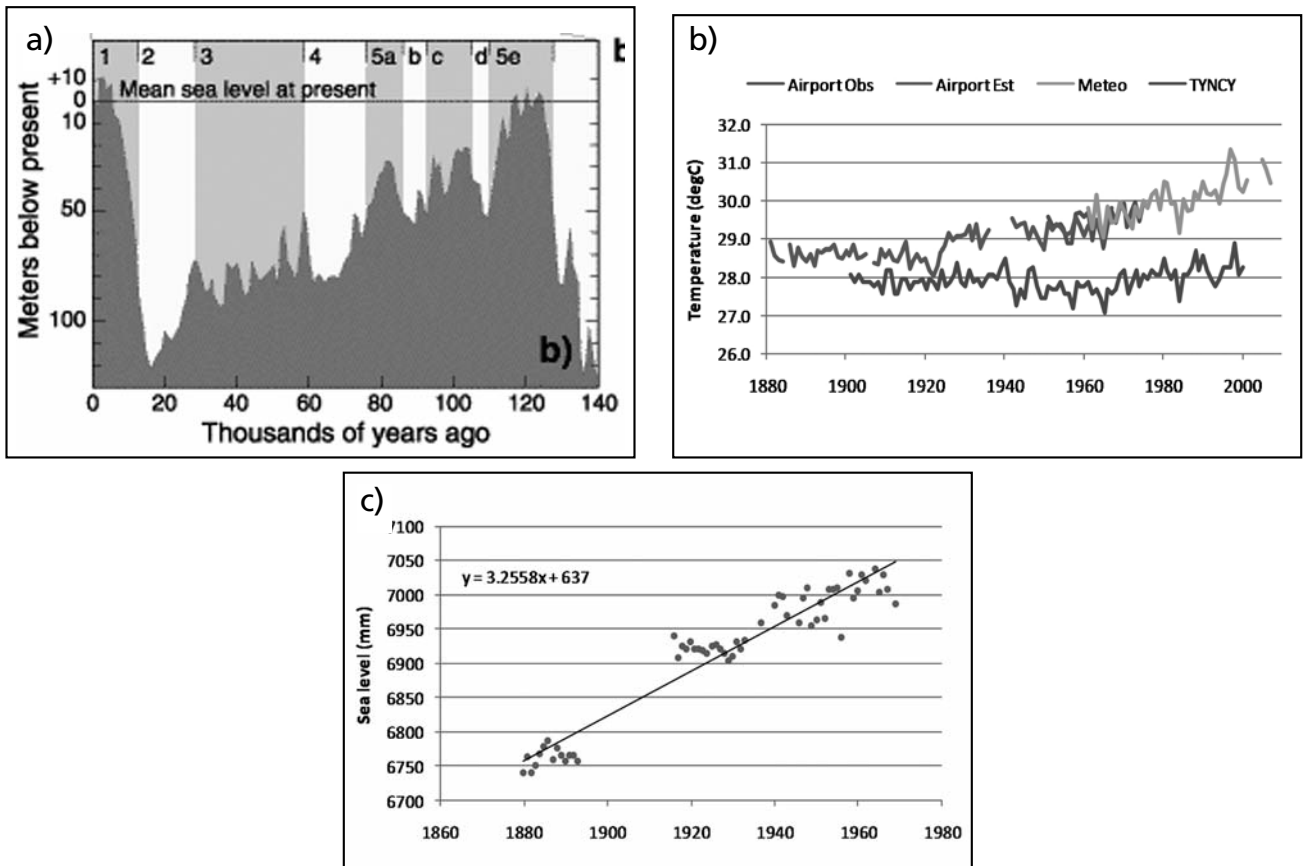


Figura 9. a) Variaciones del nivel del mar en el ámbito global (Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sea\\_level](http://en.wikipedia.org/wiki/Sea_level)); b) Variaciones de la temperatura en Djibouti y c) Variaciones del nivel del mar en Aden, Yemen (Fuente: Wilby y Mora, 2010)

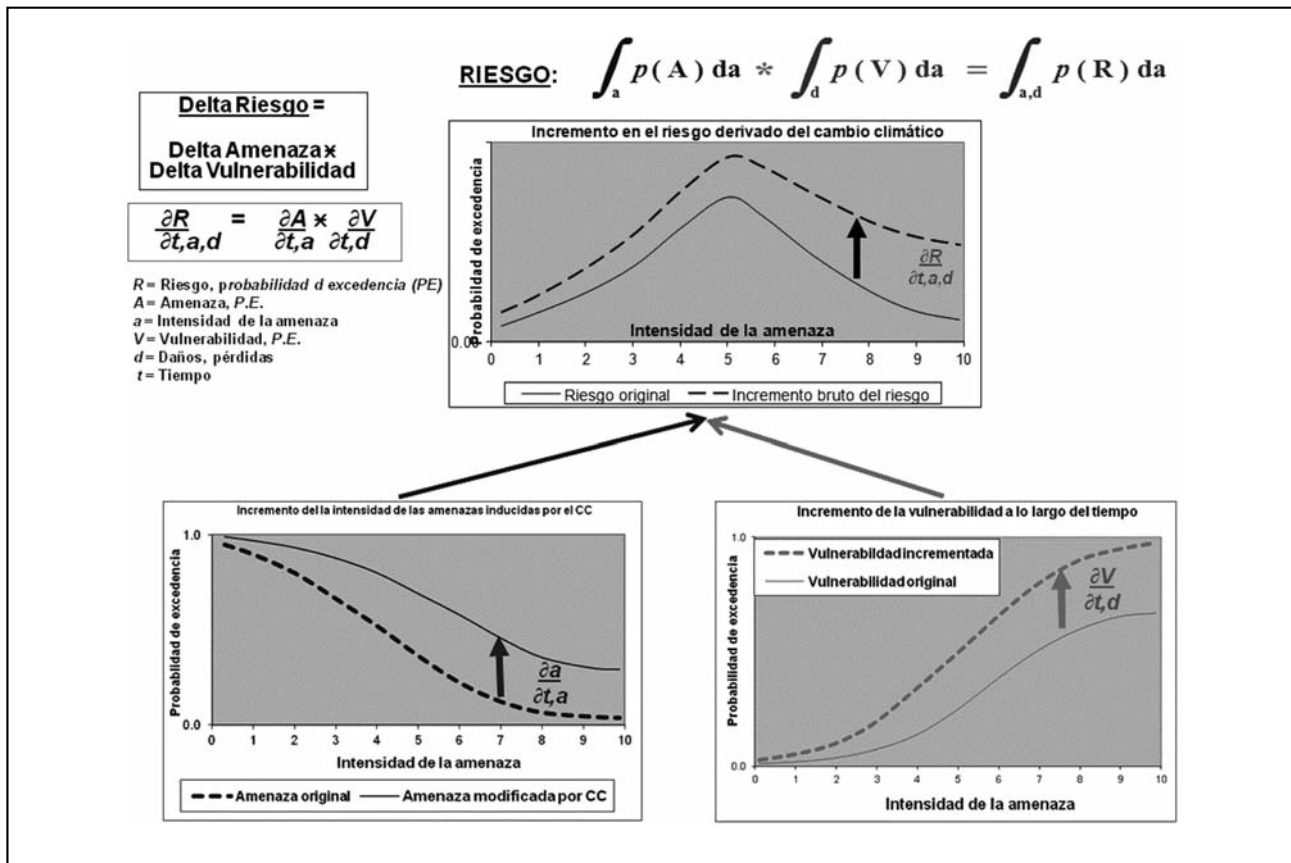


Figura 10. Incidencia del calentamiento global antropogénico sobre el incremento del riesgo ("delta" R) al aumentar, respectivamente, la intensidad y frecuencia de las amenazas hidrometeorológicas ("delta" A) y la vulnerabilidad humana ("delta" V) a través del tiempo y de acuerdo con un nivel de daños potenciales. Elaboración del autor.

la intensidad de los episodios de El Niño-La Niña-ENOS y las sequías e inundaciones? La respuesta no puede ser más que ambigua, al menos por ahora: Todavía no hay pruebas científicas contundentes sobre esto, al menos dentro de los límites de la variabilidad climática.

Sin embargo, Gray (2011; <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>; <http://hurricane.atmos.colostate.edu/>; Figura 11) afirma categóricamente que esto no es posible, al menos para los plazos corto y mediano, y considerando la mecánica y los balances termodinámicos propios de la atmósfera (Figuras 11, 12, 13 y 14).

La figura 12 muestra las visiones opuestas acerca del efecto de la intensificación continua en la convección profunda dentro de los cumulonimbos y que se deriva del proceso de transferencia, flujo del calor (i.e. infrarrojo-IR) e irradiación hacia el espacio, desde la troposfera. El diagrama superior se focaliza en una magnitud mayor de la convección causada por una fuente de calor más intensa (i.e. calentamiento global antropogénico) e implica un retorno, por subsidencia, de las masas de aire seco y frío. Esto conduce, a su vez, a un incremento en el albedo, una mayor intensidad del flujo e irradiación de calor (IR) hacia el espacio y a un aumento de las lluvias en el suelo. En contraste, el diagrama inferior representa la interpretación de los "modeladores del calentamiento global" (GCM), para quienes el aumento en la columna convectiva implica un aumento en la humedad troposférica y por lo tanto una reducción de la irradiación infrarroja (IR) hacia el espacio. La segunda visión es errónea, según Gray (2011; <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>).

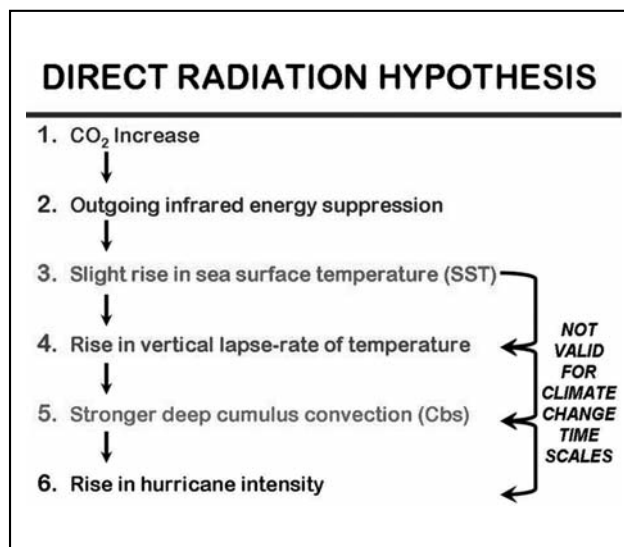


Figura 11. De acuerdo con el IPCC (flujograma de la izquierda), el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el calentamiento global antropogénico resultante, harán que los ciclones tropicales aumenten a su vez de intensidad y frecuencia. Por el contrario, Gray (2011) argumenta (flechas a la derecha) que el postulado del IPCC no es aplicable a la escala temporal (i.e. corto plazo) ni a la mecánica y termodinámica que rigen la actividad ciclónica tropical (<http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>)

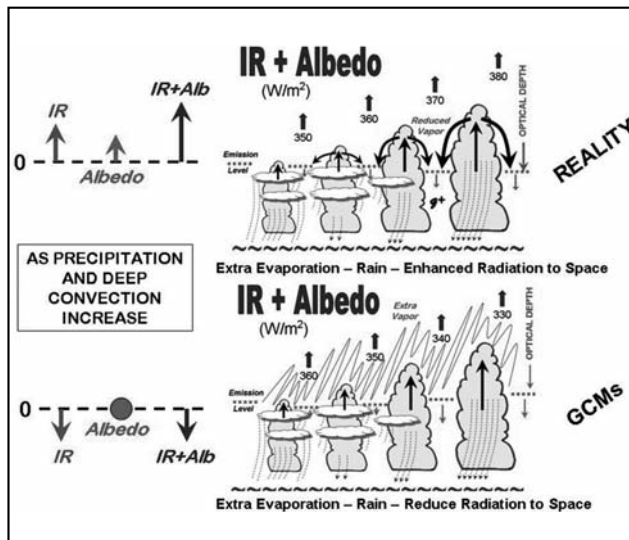


Figura 12. Comparación realizada por Gray (2011) y que muestra dos visiones opuestas acerca del efecto de la intensificación continua en la convección profunda dentro de los cumulonimbos y que se deriva del proceso de transferencia, flujo del calor (i.e. infrarrojo-IR) e irradiación hacia el espacio desde la troposfera. La segunda visión es errónea, según Gray (2011); <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>.

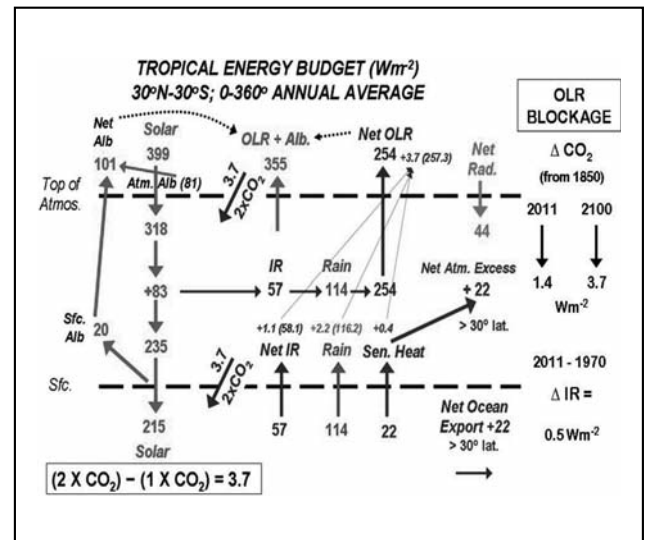


Figura 13. Perfil vertical del balance energético tropical anual (datos del International Satellite Cloud Climatology Project ISCCP y National Center for Environmental Prediction NCEP, periodo 1984-2004; Gray, 2011; <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>). IR: irradiación infrarroja de onda larga; OLR: irradiación infrarroja de onda larga expelida hacia el espacio; Alb: albedo.

Como se muestra en la Figura 13, la región tropical recibe un superávit de alrededor de  $44 \text{ Wm}^{-2}$ , el cual es “exportado” hacia las latitudes medias (alrededor de  $30^\circ$  hacia el norte y sur). Se estima que alrededor de la mitad ( $-22 \text{ Wm}^{-2}$ ) es transportado por la atmósfera y la otra mitad por los océanos. Nótese, en la columna de la derecha del diagrama, que la magnitud del bloqueo del OLR debida al incremento del  $\text{CO}_2$  en la actualidad es relativamente pequeña ( $-1.4 \text{ Wm}^{-2}$ ) y además que el aumento del bloqueo también es relativamente pequeño ( $-3.7 \text{ Wm}^{-2}$ ; a la izquierda, en azul) y se deriva más bien del calentamiento global (al menos hasta 2100), en comparación con otros parámetros energéticos. El crecimiento en el tenor de  $\text{CO}_2$ , sucedido entre 1970 y 2011 (abajo a la derecha) es aún muy pequeño ( $-0.5 \text{ Wm}^{-2}$ ) como para ejercer una influencia detectable sobre la actividad ciclónica tropical.

Por otra parte, es necesario señalar que la imprecisión de los modelos de cálculo y la escasez de datos en las series temporales instrumentales de larga duración (más de 50 años) y de los indicadores “proxy” (glaciología, geología histórica, paleontología), aparte de ser todos geográficamente dispersos e insuficientemente densos, precisos y largos, no permite ir más allá de la proyección empírica y estocástica, muchas veces imprecisa, con grandes rangos de error, dispersión e incertidumbre.

El pronóstico y la predicción del tiempo tan solo es posible realizarlos con precisión para los próximos 3 a 10 días como máximo, a condición de poseer los datos e informaciones en tiempo real que los sustenten. Por su parte, las proyecciones climatológicas para 50 años o más años son mucho menos precisas y pueden ser incluso irrealistas. Cualquier afirmación categórica sobre su precisión, además de temeraria y arriesgada, puede ser también irresponsable, pues puede confundir el proceso de toma de decisiones, a la formación racional de la opinión pública y a la asignación de prioridades políticas y económicas que corresponden. Sin duda, debe quedar claro que no es el pequeño

incremento observado en la temperatura superficial del globo lo que causará un incremento sustancial del riesgo derivado del aumento de la intensidad y frecuencia de las amenazas hidrometeorológicas y climáticas, sino más bien y definitivamente el incremento galopante de la vulnerabilidad humana.

## GESTIÓN DEL RIESGO

### Desastre

Este término se aplica comúnmente al resultado y consecuencias de un “suceso natural destructivo”, según el enfoque de las ciencias naturales, mientras que desde la perspectiva de la ingeniería puede verse como la consecuencia de la “falta de resistencia física” al haberse incumplido los requisitos de un diseño “seguro”. También resulta de la “exposición en áreas propensas” según la planificación territorial y también como derivación de “un problema del déficit no resuelto en el desarrollo”. Por ser “construidos socialmente”, según las ciencias sociales, los desastres se convierten en un pasivo socioeconómico y ambiental, la mayoría de las veces creado por la inacción o por la ausencia de inversiones en la gestión del riesgo y que, a fin de cuentas, se termina por pagar tarde o temprano. Sin embargo, no hay duda que los desastres son el producto de la vulnerabilidad y por esta razón, no se les debe aplicar el adjetivo de “naturales”. La gestión del riesgo debe concentrarse, por lo tanto, en resolver cómo surge, aumenta, se acumula y se resuelve la vulnerabilidad humana. Bajo estas premisas y en adelante, será discutido el nexo de los desastres y de la gestión del riesgo con el calentamiento global antropogénico.

### Enfrentar al cambio climático como parte de una estrategia integral y racional de gestión del riesgo

Al haber dos orígenes distintos -natural y antropogénico- para el cambio climático, debe definirse una estrategia racional para enfrentarlo. No hay duda de que para planificar la



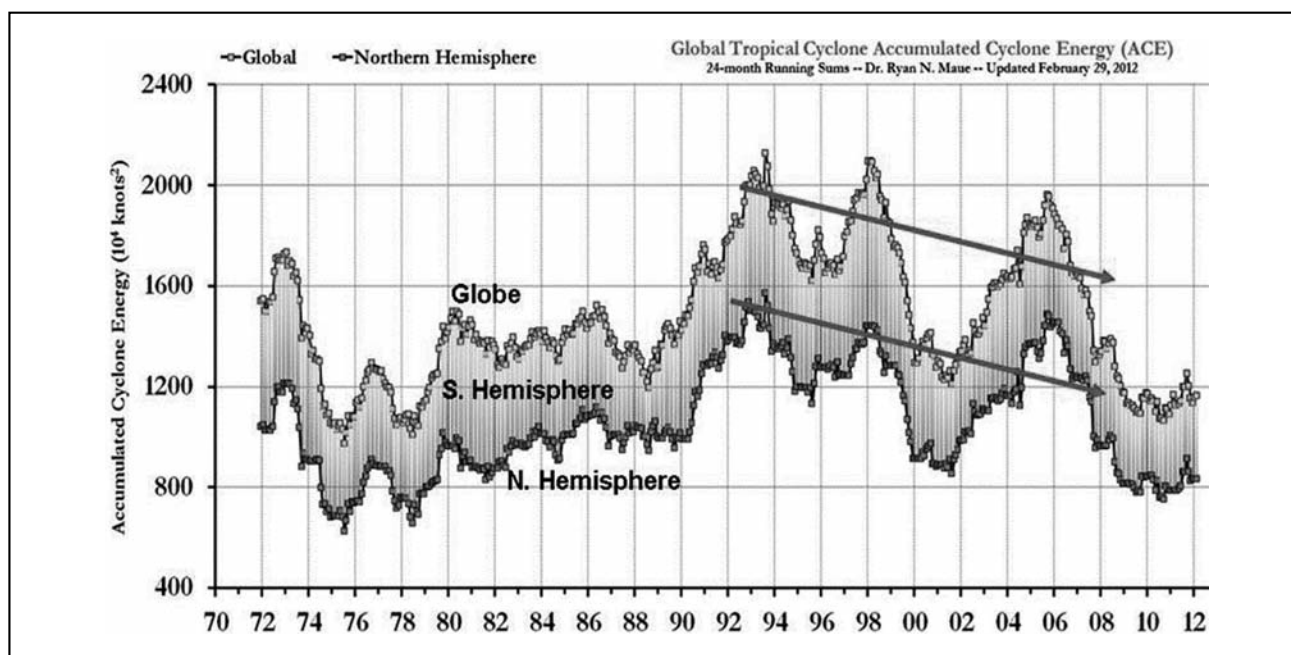


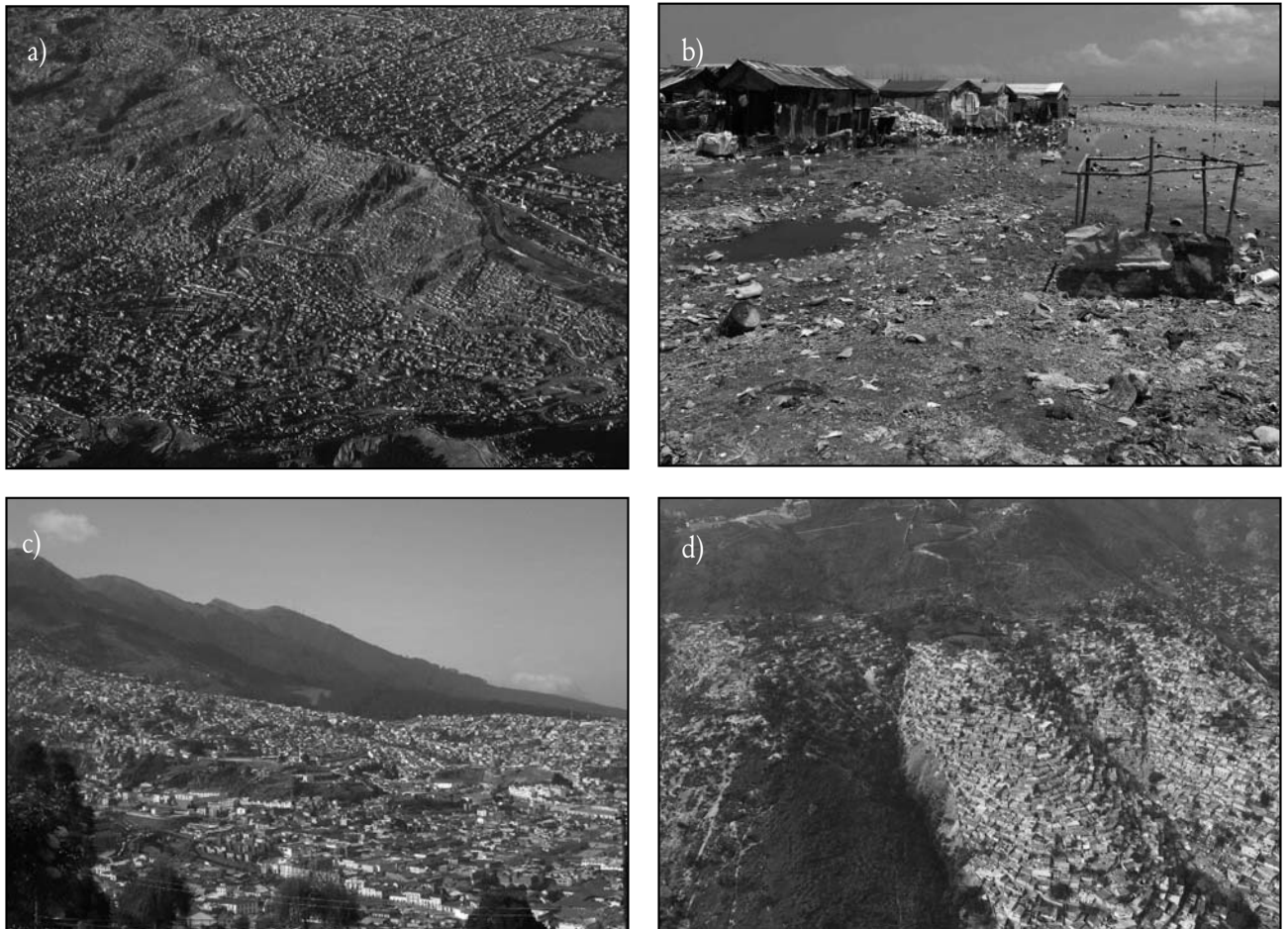
Figura 14. Variaciones de la energía ciclónica acumulada (ACE;  $\Sigma V_{max}^2/\text{año}$ ) en el globo y en los hemisferios norte y sur durante el período diciembre de 1971a febrero de 2012 (Gray 2011; Klotzbach y Gray 2012; adaptado de Maue, 2011; <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/2012/apr2012/apr2012.pdf>). Las flechas rojas indican que la tendencia general del ACE es de una reducción durante los últimos 20 años, generada por los cambios en la influencia de la circulación termo-halina en el océano Atlántico, aún y cuando haya habido un incremento importante en el contenido de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera.

gestión del riesgo con respecto al de origen antropogénico, las medidas deben ser: antropogénicas. Con respecto al de origen natural, se debe saber dónde poner un límite a las acciones, pues no se puede tener la ilusoria intención de combatir a la Naturaleza. Se puede comenzar por postular que, para resolver el problema que genera el calentamiento global antropogénico, se requiere primero resolver sus causas y luego reducirlas para que sus efectos sean menores. Pero esta no será una tarea fácil, no solamente al intentar reducir el daño ya consumado por los países industriales, sino porque ahora también hay que agregar el que se gesta los países “emergentes”, quienes reclaman su derecho a alcanzar los niveles deseados de desarrollo, a veces sin importar el costo, y al igual que otrora lo hicieron los primeros. Al ritmo actual, si los responsables principales del escenario (e.g. países “desarrollados”, industrializados, “emergentes” y productores de petrolero) no asumen su responsabilidad ni toman las medidas del caso, las emisiones excesivas de gases, vapores y partículas a efecto de invernadero aumentarán al doble en un plazo de alrededor de medio siglo, lo que podría implicar un ascenso adicional de la temperatura global hasta niveles preocupantes de alrededor de 0,5 a 1°C (si se toman los datos del IPCC-4 como válidos, lo cual no está aún completamente aclarado). Este escenario podría traer consecuencias graves para la estabilidad de la población, del ambiente y de los recursos naturales, sobre todo en algunas áreas en donde posiblemente se concentrarán sus efectos por causas micro-climáticas e hidrográficas locales y sobre todo en los países pobres, en donde se refleja con mayor proporción relativa el efecto de los desastres, aunque paradójicamente su origen, como en este caso, se localice fuera de sus fronteras, en los países más ricos.

Ahora bien, la variabilidad climática (VC) causa actualmente impactos y efectos negativos mayores que el calentamiento global antropogénico (CGA). La variabilidad climática, al ser

de frecuencia y alcance estacional y anual, afecta el día a día de las actividades humanas, pero curiosamente no figura en los planes de desarrollo ni posee una alusión explícita en los presupuestos nacionales, aunque sea la que más frena el desarrollo de los países, al consumir recursos en la respuesta y reconstrucción de los desastres que genera recurrentemente. Aún así pareciera ser invisible para muchos tomadores de decisiones, mientras que sobre el cambio climático se organizan foros y paneles internacionales del más alto nivel científico y político, forma parte obligada de los programas de desarrollo de casi todos los países, posee una oficina especial en las Naciones Unidas y está dotado de presupuestos y financiamientos generosos. Esta visión “prioritaria” oculta y opaca otras realidades igual o más apremiantes y quizás hasta más dañinas y que deberían estar en la primera línea del proceso de toma de decisiones de muy corto plazo. Paradójicamente, el cambio climático ha creado entonces un efecto perverso sobre la gestión integral del riesgo.

Bajo la misma premisa, es claro que el aumento del riesgo y, eventualmente de los daños potenciales, proviene sobre todo del incremento -“delta-gradiente”- de la vulnerabilidad (ejemplos en las Figuras 10 y 15a, 15b, 15c y 15d). Hasta la fecha y en la mayoría de los casos, la incidencia real y objetiva del cambio climático sobre el riesgo no ha sido relevante, si se compara con la incidencia de los eventos extremos propios de la variabilidad climática, de otras amenazas naturales que no tienen relación con el clima y del aumento galopante de las facetas múltiples de la vulnerabilidad. Para reducir el impulso del cambio climático sobre el riesgo y buscar mayor efectividad en su gestión, es más factible intentarlo controlando y reduciendo la vulnerabilidad y tomando en cuenta sus dimensiones sociales, políticas, económicas, ambientales y de gobernabilidad. Esto, claramente, no debe restringir las medidas para reducir las causas antropogénicas del calentamiento global, involucrando para



**Figura 15.** La efectividad de las acciones de la gestión del riesgo, al igual que la reducción del impacto del calentamiento global, debe plasmarse primero en la reducción de la vulnerabilidad ya existente. No parece necesario inventar fórmulas nuevas: a) La Paz y el Alto en Bolivia, expuestas a la inestabilidad de laderas y sismos; b) Martissant, Puerto Príncipe, Haití, expuesto a inundaciones marinas –tsunami, marejadas- y a la licuefacción de suelos; c) Quito, Ecuador, expuesta a la actividad del volcán Pichincha, los sismos y deslizamientos, y d) Jalousie, Pétienville, Haití, expuesto a la inestabilidad de laderas y a los sismos. Fotos del autor.

ello a los países que más GVP-EI producen y quienes tienen la obligación de asumir la responsabilidad que les corresponde. En el ámbito mundial, las políticas y prioridades deberán ser más claras de lo que son actualmente, puesto que no hay duda alguna de dónde se concentran las mayores pérdidas económicas y humanas, incluidos el trauma y el deterioro de la calidad de vida correspondiente. La verdad es que no es necesario inventar fórmulas nuevas, ni panaceas o dogmas, que más bien confunden y distraen el proceso de toma de decisiones.

En el ámbito mundial, las políticas y prioridades deberían ser más claras de lo que son en la actualidad, puesto que no hay duda acerca de dónde se concentran las mayores pérdidas humanas, el trauma y deterioro de la calidad de vida. Según la Organización Mundial de la Salud y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, las muertes anuales causadas por el cambio climático, combinando todas sus variables, alcanzan un promedio de alrededor de 150.000 (Climate Change and Human Health: Risk and Responses; World Health Organization; 2003; <http://apps.who.int/bookorders/langlais/detart1.jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=15&codcch=551>), una cifra preocupante, pero que ciertamente debe verificarse y validarse. Sin embargo, si se compara con los 2 millones de muertes anuales causadas por la insuficiencia de micronutrientes (Zn, Fe, Vit. A),

4 millones por desnutrición (que afecta a la mitad de la población mundial), 2 millones por falta de agua potable (The World Health Report, Reducing risk, promoting a healthy life; World Health Organization; 2002; <http://www.who.int/wbr/2002/en/index.html>), 1,1 millones por malaria (World Malaria Report; <http://www.rollbackmalaria.org/wmr2005/html/toc.htm>; World Health Organization & UNICEF; 2005), 3 millones por SIDA (Report on the AIDS epidemics. World Health Organization; 2008; <http://apps.who.int/bookorders/langlais/detart1.jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=88&codcch=54#>), 2,5 millones por contaminación del aire (The World Health Report. Changing history; World Health Organization, 2004; <http://www.who.int/wbr/2004/en/>), 52 millones afectados por los extremos naturales de la variabilidad climática (United Nations Development Programme: [http://www.undp.org/cpr/whats\\_new/publications.shtml](http://www.undp.org/cpr/whats_new/publications.shtml)), sin contar los efectos de las otras amenazas naturales que no tienen relación con el cambio climático antropogénico (e.g. sismos, volcanes, licuefacción, tsunamis, ciclones, aludes torrenciales, sequía, El Niño-LaNiña/ENOS, degradación de tierras, incendios forestales), y su relación con todo lo que se deriva de la pobreza y la desigualdad social). Pareciera razonable pensar entonces, que es necesario redefinir las prioridades (Tabla 1).

#### Las prioridades para la gestión del riesgo

**Tabla 1. Número de muertes, por año, causadas por varios tipos de problemas, de acuerdo con el análisis de la Organización Mundial de la Salud, Naciones Unidas. Elaboración del autor, con base en la información y referencias consignadas.**

Situación	Número de muertes/año	Fuente
Cambio climático	150.000	WHO, WMO, UNEP; 2003. Climate change and human Health: Risk and responses, Summary. Geneva: World Health Organization; <a href="http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&amp;codlan=1&amp;codcol=15&amp;codcch=551">http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&amp;codlan=1&amp;codcol=15&amp;codcch=551</a>
Desnutrición	4 millones; afecta ½ de la población mundial	World Health Organization; 2002. The World health report. Reducing risk, promoting healthy life; <a href="http://www.who.int/whr/2002/en/index.html">http://www.who.int/whr/2002/en/index.html</a>
Insuficiencia de micronutrientes (Zn, Fe, Vit. A)	2 millones	
Falta de agua potable de buena calidad	2 millones	
Malaria	1,1 millones	World Health Organization & UNICEF; 2005. World malaria report; <a href="http://www.rollbackmalaria.org/wmr2005/html/toc.htm">http://www.rollbackmalaria.org/wmr2005/html/toc.htm</a>
SIDA	3 millones	World Health Organization; 2008. Report on the AIDS epidemics: <a href="http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&amp;codlan=1&amp;codcol=88&amp;codcch=54#">http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&amp;codlan=1&amp;codcol=88&amp;codcch=54#</a>
Contaminación del aire (libre y exterior)	2,5 millones	World Health Organization; 2004. The World health report. Changing history; <a href="http://www.who.int/whr/2004/en/">http://www.who.int/whr/2004/en/</a>

En cada país las prioridades deberán definirse según sus condiciones y especificidades propias. Las iniciativas propuestas bajo el Marco de Acción de Hyogo (<http://www.unisdr.org/eng/hfa/docs/HFA-brochure-Spanish.pdf>) y la estrategia de “Adaptación al Cambio Climático” (ACC) (<http://www.eird.org/publicaciones/Climate-Change-DRR.pdf>), impulsadas por las Naciones Unidas, incorporan aspectos y visiones racionales, aunque han generado también un foco de atención relativamente excesivo y concentrado en el tema del cambio climático, en particular. Debe tomarse en cuenta que el cambio climático antropogénico no solo genera impactos negativos; también puede generar impactos positivos e incluso algunas oportunidades para el desarrollo de los países. Para ello ver, entre otros:

- <http://www.environmentalgraffiti.com/offbeat-news/the-top-5-positive-effects-of-global-warming/728?image=2>
- [http://unfccc.int/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/climate\\_change\\_information\\_kit/items/288.php](http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/climate_change_information_kit/items/288.php)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Economic\\_impacts\\_of\\_climate\\_change](http://en.wikipedia.org/wiki/Economic_impacts_of_climate_change)
- <http://www.epa.gov/climatechange/effects/agriculture.html>;  
<http://news.nationalgeographic.com/news/2007/10/071017-gre-enland-warming.html>
- [http://www.google.com/search?q=positive+impacts+of+climate+change&hl=en&source=hp&gbv=2&gs\\_sm=3&gs\\_upl=383815039/01535117171010101010109157716.11710&oq=positive+impacts+of+climate+change&aq=f&aqi=g1g-v1g-j1g-b1&aql=](http://www.google.com/search?q=positive+impacts+of+climate+change&hl=en&source=hp&gbv=2&gs_sm=3&gs_upl=383815039/01535117171010101010109157716.11710&oq=positive+impacts+of+climate+change&aq=f&aqi=g1g-v1g-j1g-b1&aql=)
- <http://www.amazon.com/Cool-Skeptical-Environmentalists-Global-Warming/dp/0307266923>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Bj%C3%B8rn\\_Lomborg](http://en.wikipedia.org/wiki/Bj%C3%B8rn_Lomborg)

También es necesario considerar, a la hora de evaluar las políticas y procesos de adaptación, cuánto se puede adaptar la sociedad a los extremos y además, si es socio-económicamente factible concentrarse en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>

como punto focal de las prioridades. Es importante subrayar que las estrategias de adaptación al cambio climático no incorporan usualmente un análisis económico riguroso de sus opciones, lo cual es un déficit de conocimiento que debe ser corregido, pues no hay una idea clara de la relación beneficio/costo implicada; este es el caso, entre otros, de la estrategia “carbono-neutral” de Costa Rica (<http://www.encc.go.cr/>).

También, es posible afirmar que es bajo los preceptos de la Gestión del Riesgo que, de manera integral, se deben concentrar los esfuerzos para reducir la vulnerabilidad, que ya es la causa de muertes y pérdidas económicas cuantiosas. La ACC no debe pues competir por los recursos ni el protagonismo, y más bien debe complementar a la gestión integral del riesgo (<http://www.fmreview.org/FMRpdfs/FMR31/46.pdf>; <http://climatechange.worldbank.org/climatechange/content/adaptation-guidance-notes-key-words-and-definitions>; [http://www.hls-esc.org/1st\\_HLS\\_ESC/presentations/BP5.pdf](http://www.hls-esc.org/1st_HLS_ESC/presentations/BP5.pdf)), pues a fin de cuentas no es más que uno de sus subconjuntos. No hay panaceas únicas, tan solo soluciones parciales y complejas para resolver un problema tan complicado. Cualquier acción de la Gestión del Riesgo, como política de Estado para reducir la vulnerabilidad en todas sus formas, reducirá automáticamente las causas y consecuencias del cambio climático.

Ahora bien, considerando el impulso político y visibilidad sin precedentes que ha recibido, la ACC puede aprovecharse para seguir captando recursos, resaltar la bondad del conocimiento científico-tecnológico y promover las acciones preventivas que de ella se derivan, al igual que la multiplicación de los instrumentos y opciones para reducir, retener y/o transferir el riesgo. Recientemente, el IPCC ha publicado el informe “Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)” (<http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/>), el cual se enfoca en estrategias nuevas y mejor estructuradas, que plantean la necesidad de entablar una visión más concentrada sobre la reducción de la vulnerabilidad, sin ol-

vidarse de los eventos de intensidad extrema causados por otras amenazas naturales. Esperaremos para constatar si este es en realidad el inicio de un criterio más realista y si surte el efecto esperado en los tomadores de decisiones.

#### Los bio-combustibles: ¿Una solución?

Aunque no es el objetivo de este artículo entrar en detalles técnicos sobre este tema, pues forma parte de un debate separado, es importante tocar ciertos aspectos relevantes enlazados con la idoneidad de los biocombustibles como herramienta para contrarrestar el impacto del sector energético, por sus emisiones de GVP-EI, tan proporcionalmente elevadas, y por lo tanto ser uno de los conductores de mayor influencia en la gestación del CGA. La producción y consumo de la energía requerida para el desarrollo de la agricultura, el transporte, la electricidad, la industria, las telecomunicaciones y prácticamente toda la producción de bienes, servicios y funciones comunes de la sociedad moderna, contribuyen en mayor o menor medida con las emisiones con efecto de invernadero. La excepción son las fuentes de energía consideradas como "renovables": hidroelectricidad, geotermia, solar, eólica.

Dado que entre las medidas para reducir las causas del CGA se ha identificado a los biocombustibles como una de las soluciones alternas más efectivas, deben mencionarse algunos de los aspectos relevantes que los acompañan. Por su retraso tecnológico, causado por múltiples factores vinculados a los intereses geopolíticos y económicos, los biocombustibles no alcanzan aún su eficiencia energética y financiera, la que seguramente tienen. Sin embargo, esta eficiencia debe analizarse con cuidado, pues posee muchas variables, aristas, sesgos, factores y parámetros sociales, políticos, económicos y ambientales que van más allá de la simple ingeniería financiera, de sus externalidades y los mecanismos para internalizarlas. Es claro que cuando su desarrollo tecnológico alcance la factibilidad, el consumo de los biocombustibles reducirá significativamente las emisiones nocivas hacia la atmósfera. Sin embargo, quedan algunas incógnitas que deberán esclarecerse, en la medida con que estos materiales sean considerados como opciones válidas para el futuro.

Existe el debate de si la producción masiva de materias primas, necesarias para su transformación ulterior en biocombustibles, generaría un desequilibrio mayor en la frontera agropecuaria y causaría con ello cambios y deterioros importantes en el uso de la tierra debidos a la expansión de los cultivos y fuentes "energéticas" (e.g. caña de azúcar, remolacha, soya, maíz, jatropha, colza, girasol, biomasa-estiércol, palma africana, celulosa, algas, salicornia, coco, maní, cáñamo, algunas grasas animales), a expensas de los bosques, del equilibrio del ecosistema y de los cultivos alimenticios. Esto, a su vez, podría impactar la seguridad alimentaria de las poblaciones, particularmente de las más empobrecidas, pues se dejan de cultivar productos básicos de la dieta común para dar lugar a otros con mayor valor financiero de corto plazo. Esto obligará a importar los alimentos básicos desde alguna otra región o país en donde la prioridad energética todavía no los haya desplazado, o mientras el equilibrio de oferta y demanda de las opciones no se haya distorsionado. El escenario implicaría un proceso, posiblemente inevitable e irreversible, de encarecimiento de los productos de consumo alimentario. Pero el impacto socio-económico negativo de los bio-combustibles puede no terminar ahí, pues esa actividad acarrea, de hecho, una serie de incógnitas acerca del uso de agroquímicos, variedades genéticas modificadas y de la calidad social del empleo generado, en su mayoría estacional y

muchas veces cuestionable por las condiciones en las que se desenvuelve la mano de obra requerida.

Otra pregunta relevante se eleva alrededor del costo de la modificación del parque automotor y electro-generador. En particular, se debe preguntar qué le pasará a los motores de los vehículos en posesión de los segmentos de bajo poder adquisitivo, los cuales posiblemente no podrán invertir en su reconversión y simplemente quedarían destinados a funcionar con ineficiencia y eventualmente evolucionar hacia su deterioro y destrucción. No hay duda de que existen preguntas que requieren de meditación y de respuestas racionales, antes de proseguir con la carrera de los biocombustibles.

#### CONCLUSIÓN:

##### ¿Se debe enfrentar al Cambio Climático con sicosis?


Si bien se conocen cada vez mejor las variables del riesgo y, entre ellas, las circunstancias asociadas con el cambio climático antropogénico, todavía no es posible garantizar un enfoque puro y objetivo al respecto. Sin embargo, esto no autoriza, por un lado la inacción, ni el extremo opuesto favorece la visión fundamentada en el miedo, el alarmismo y el catastrofismo. El panorama, aunque a veces pareciera un callejón sin salida, luego de los fracasos y placebos generados por las reuniones frustrantes y decepcionantes en Copenhagen-2009 ([http://unfccc.int/meetings/copenhagen\\_dec\\_2009/meeting/6295.php](http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/meeting/6295.php)), Cancún-2010 ([http://unfccc.int/meetings/cancun\\_nov\\_2010/items/6005.php](http://unfccc.int/meetings/cancun_nov_2010/items/6005.php)) y Durban-2011 ([http://unfccc.int/meetings/durban\\_nov\\_2011/meeting/6245.php](http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245.php)), no es tan adverso como se ha planteado, aunque en ocasiones se promueva una actitud de sicosis apoyada en la desinformación, intereses creados, política, el fundamentalismo extremista del "ecologismo-ambientalismo", la mediatización, la búsqueda desesperada de visibilidad, el oportunismo, la incompetencia y desconocimiento de la burocracia nacional e internacional, quienes a propósito o por ignorancia, confunden y atribuyen los efectos de la variabilidad climática al calentamiento global (Figuras 16a, 16b, 16c y 16d).

El cambio climático no debe ser tratado bajo la misma clase de desorientación, ni de los mismos impulsos sensacionalistas, con infusión del miedo, que se utilizan para enfrentar al terrorismo, al narcotráfico o a las dudosas pandemias de gripe, entre otros. Tampoco debe alimentarse del criterio de que quien tenga dudas al respecto, aún razonables y fundamentadas, debe ser etiquetado como "escéptico", "negacionista" y enemigo irracional de la humanidad. Es claro que la ansiedad creada, alimentada y magnificada en algunos foros y sectores, puede convertirse en un mercado jugoso. Pero también es claro que el pánico que suscita tiende un espejo sobre el que se reflejan las realidades de la sociedad, sus intereses, los fantasmas y las sombras del oportunismo que, a toda costa, son capaces de hacer retroceder a la sociedad, sin miramientos, hacia el oscurantismo y la manipulación.

El momento parece propicio para evitar caer en la angustia sin medida, pues sin subestimar los elementos en juego es necesario comprender mejor las causas, las consecuencias y las medidas para la gestión del riesgo derivado del cambio climático antropogénico. Sin embargo, el rápido crecimiento demográfico y su concentración en áreas urbanas, desordenadas y expuestas a las amenazas naturales (e.g. litorales, riberas fluviales, laderas con pendiente elevada, a proximidad de fallas y volcanes activos), y que además incorporan la realidad de la pobreza, la desigualdad y la exclusión, cierran y exacerbaban la vulnerabilidad y

# FAST FACTS

United Nations Development Programme



Empowered lives.  
Resilient nations.

## UNDP and climate change in Africa

Africa will be the continent hardest hit by climate change because it faces more severe climatic effects than other regions, its economies rely on climate-dependent sectors such as agriculture and its capacities to cope and adapt are generally limited.

The World Bank estimates that Africa's average annual temperature is likely to rise an additional 3-4 degrees by 2099. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, by 2020, 75-250 million people across sub-Saharan Africa could face water shortages, and rain-fed agriculture could contract by 50% in some African countries.



Climate change is an urgent developmental challenge with the potential to derail progress towards achieving all eight Millennium Development Goals (MDGs) in Africa. From Morocco to Mozambique, the poor, and especially women, will be the hardest hit. They rely on natural resources and ecosystems for their livelihoods, are vulnerable to the spread of tropical diseases such as malaria and dengue fever and are more likely to be affected by extreme weather events.

### MATTERS OF FACT

- The Intergovernmental Panel on Climate Change estimates that by 2020, **75-250 million** people across sub-Saharan Africa could face water shortages, and rain-fed agriculture could contract by 50% in some African countries.
- According to the World Bank, even a minimum rise in temperature could cause permanent **GDP losses of 4-5%** for Africa.
- In Ethiopia, a survey of 48 annual crops grown in the Nile Basin shows that farmers who adapted to climate change produced about 95-300kg more food per hectare than those who chose not to adapt.
- The right combination of solar and hydropower could meet **80%** of the continent's electricity demands.
- African forests absorb **20%** of the carbon that is absorbed by trees across the world.

### UNDP in action

With its presence in every African country and its extensive network of partners across the continent, UNDP provides services to help African countries and regional institutions to incorporate climate mitigation and adaptation into their strategies so they can attain sustainable, people-centered development:

**1. We help decision-makers to tackle climate-related issues and access international finance:** Thanks to a \$5.6 million initiative called "Boots on the Ground", we mobilized climate experts in 15 African Least Developed Countries, helping them to grasp climate-related issues, craft climate policies, and access and implement climate financing.

For instance, UNDP is currently helping **Mali** to establish a national executing agency with direct access to the Adaptation Fund, to shape a national climate fund and to develop its national climate adaptation plan. In **Niger**, a parliamentary network on climate change, environment and sustainable development has been established with technical advice from UNDP.

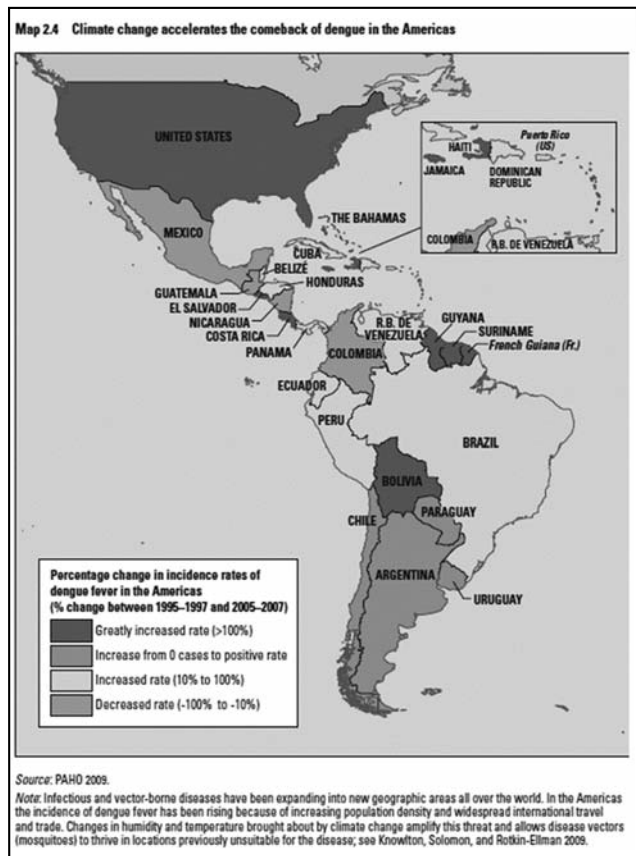


Figura 16. Información sesgada y subjetiva acerca del CGA: a) Confusión entre CGA y VC ([http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/fast-facts/english/FF\\_climate\\_change\\_africa-EN.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/fast-facts/english/FF_climate_change_africa-EN.pdf)); b) Información incompleta acerca del efecto posible del CGA sobre la dispersión del dengue en el hemisferio occidental; no toma en cuenta una línea de base, ni la proporcionalidad y evolución demográfica; c) Afiche alarmista con información gráfica sobre una inundación fuera de contexto (Terminal Retiro, Buenos Aires, Argentina); d) Afiche alarmista con información confusa acerca de una laguna africana que, de manera normal y recurrente, se seca estacionalmente: "El cambio climático presente: Escasez de agua, la próxima gran amenaza del planeta, pronto cerca de su casa. Proteja su salud contra el cambio climático"; Fuente: Organización Mundial de la Salud.

por lo tanto el ciclo vicioso de la materialización del riesgo hacia los desastres.

Pero de nuevo, no hay necesidad de oscurecer innecesariamente el panorama: La humanidad dispone actualmente de capacidades científicas y tecnológicas suficientes como para comprender las variables y factores del calentamiento global an-

tropogénico, para ir más allá de las medidas reactivas de atención y respuesta a los desastres y para enfocarse más bien en las prioridades verdaderas: conocer mejor el riesgo y sus variables, reducir sus causas, reducir anticipadamente sus consecuencias, generar los mejores instrumentos posibles para la protección financiera y social y realizar la mejor gestión posible de las emergencias y desastres que, de todas maneras, pudiesen suceder.

Todo esto, sin embargo, debe enmarcarse dentro de un orden específico y riguroso de prioridades, las cuales solo podrán atenderse conociendo las realidades y capacidades de cada país, pero sobre todo tomando en cuenta las responsabilidades extraterritoriales respectivas, tanto por parte de los países que han originado la mayor parte del problema, como las de aquellos en donde se generan e internalizan sus consecuencias.

El calentamiento global es una realidad que requiere de acciones concretas y urgentes, sin duda. Pero también hay otros problemas que también requieren de atención y prioridad, incluso mayores en algunos casos, por lo que los tomadores de decisiones deben mantener la objetividad que les correspon-

de, al igual que la comunidad científica e ingenieril que los asesora.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a Gerardo Soto Bonilla, Jorge Bejerman y Rosalba Barrios por la revisión y múltiples sugerencias aportadas a este texto y que sin duda lo han mejorado considerablemente.

Aclaración: El autor desea aclarar que las opiniones e interpretaciones incluidas en este texto son de su propia cosecha y no representan las de sus empleadores.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

GRAY, W. 2010.

Gross errors in the IPCC-AR4 report regarding past and future changes in global tropical cyclone activity (a Noble Disgrace).

*Science and Public Policy Institute*. 122pp.

<http://hurricane.atmos.colostate.edu/Includes/Documents/Publications/gray2011.pdf>

HAYS, JD; IMBRIE, J; SHACKLETON, NJ; 1976.

Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages;

*Science* 10 December 1976: Vol. 194 no. 4270 pp. 1121-1132; DOI: 10.1126/science.194.4270.1121

MORA, S.

Disasters are not natural: risk management, a tool for development.

*Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications* 2009; v.22; p.101-112; doi10.1144/EGSP22.7

MORA S, ROUMAGNAC A, ASTE JP, CALAIS E, ZAHIBO N, SABORIO J, MARCELLO M, MILCE JE. 2010.

Multiple hazards assessment in Haiti.

*Government of Haiti, World Bank, Inter-American Development Bank, United Nations system*. 65 pp.

[http://gfdrr.org/docs/Haiti\\_Multi-Hazard\\_RiskAssessment\\_Report\\_EN.pdf](http://gfdrr.org/docs/Haiti_Multi-Hazard_RiskAssessment_Report_EN.pdf);

<http://community.understandrisk.org/group/haitijanuary12handbeyond/forum/topics/multihazards-assessments>;

[http://www.iris.edu/hq/haiti\\_workshop/docs/Report-MULTIHAZARDS-HA-English-SergioMora-Final-Red.pdf](http://www.iris.edu/hq/haiti_workshop/docs/Report-MULTIHAZARDS-HA-English-SergioMora-Final-Red.pdf)

MORA, S. ET AL.

Multi-natural hazards assessment in Haiti. 2012. Phase 2: NATHAT 2. GoHA, the World Bank, GFDRR.

*Three volumes (i. Regional analysis, ii. Natural hazards at the metropolitan area and selected neighborhoods,*

*Port-au-Prince, iii. Methodological guide for multi-hazards assessments)*. November 2011 (in final preparation)

MORA, S. 2010.

Disasters should not be the protagonists of Risk Management.

*Keynote speech at the 11th International Congress, International Association of Engineering Geologist and*

*the Environment*. Auckland, New Zealand. 2010. 18pp. <http://www.iaeg2010.com/programmes/62>;

[https://docs.google.com/leaf?id=17RwGccg6rVVN\\_CWuUMLvJpi3GukpxPYa0-tGG28D-](https://docs.google.com/leaf?id=17RwGccg6rVVN_CWuUMLvJpi3GukpxPYa0-tGG28D-CW5Jc9uxvQJMAwdb7J7&hl=es&authkey=CLfgg6IP&pli=1)

<http://www.scribd.com/doc/40784124/Manejo-del-riesgo-Sergio-Mora-geologo>

MORA, S; KEPI, K; 2006.

Disaster Risk Management in development projects: models and checklists.

*Bull. Engineering Geology and the Environment* (2006) 65:155-165. DOI 10-1007/s10064-005-0022-1;

<http://www.springerlink.com/content/y56j7l5m73603441/>

WILBY, R; MORA, S; ABDALLAH, A; ORTIZ, A. 2010.

Confronting climate variability and change in Djibouti through risk management.

*Geologically Active - Williams et al. (eds)*. © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7.

*11th International Congress, International Association of Engineering Geology and the Environment; Auckland, New Zealand*. pp. 511-522.



# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

*La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Comunicaciones cortas, 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 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 correo electrónicos en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. Se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras; un "Abstract", y opcionalmente se podrá incorporar el "Resumo" en portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes "Keywords" y "Palavras chave" en portugués.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el "Abstract", además de un resumen en el idioma en el que está escrito el trabajo. A continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.

El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes 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 Comunicaciones Cortas no deberá superar las 3 carillas y en el resto de las situaciones mencionadas la extensión no deberá superar a una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo:  $Sy/Xm$  en lugar de  $\frac{Sy}{Xm}$
- Aquellas ecuaciones explícitamente referenciadas en el texto deben numerarse sucesivamente al lado derecho, entre paréntesis.
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo,  $Ca^{2+}$  y  $CO_3^{-2}$ , no como  $Ca^{++}$  o  $CO^{-3}$ .
- Los números de isótopos deben anteceder a los símbolos, 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, 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.
- 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 las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps).



Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo.

- 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, y tener una resolución mínima de 300 dpi. Deben ser enviadas como archivos .tif o .jpg. 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.
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados, claros y con una resolución mínima de 300 dpi.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto.
- 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**

- Cuando el autor cite en el artículo enviado un párrafo, frase o contenido de cualquier tipo, procedente del trabajo de otro autor o autores, sea un libro, artículo de revista o cualquier otro documento, el mismo se deberá indicar en itálica y entre comillas y la cita entre paréntesis.
- 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 tres autores se usará et al. (en itálica, no subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:  
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
- Los artículos en textos:  
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:  
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
- Cuando los autores del trabajo citado en el texto sean más de dos, se indicará Casio et al. (1980).
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, la cita deberá aparecer entre paréntesis y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,..... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de 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. Re-assessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En Environmental Assessment Lecturer’s Handbook, ed. T B Fisher et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta.eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

#### **e) Arbitraje**

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.

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

**FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA**

ENVIAR A:

**Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería**  
Maipú 645 - Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) [ ]

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

\_\_\_\_\_ [ ]

3. Deseo comprar los artículos:

\_\_\_\_\_ [ ]

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

**FORMA DE PAGO**

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

**PRECIO DE COMPRA (Desde 01-04-2012):**

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

- Compra de número vigente: **230** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **90** Pesos por artículo

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

- Compra de número vigente: **52** Dólares
- Compra de número atrasado: **43** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-04-2012):**

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

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **240** Pesos
- Suscripción en formato electrónico: **170** Pesos
- Suscripción Instituciones: **960** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **110** Pesos por artículo

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

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **54** Dólares
- Suscripción en formato electrónico: **38** Dólares
- Suscripción Instituciones: **216** Dólares
- Compra de número atrasado: **430** Dólares

**Envíos fuera de Argentina:** se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: [www.correoargentino.com.ar](http://www.correoargentino.com.ar)

Se pueden enviar los números completos de la Revista por correo electrónico en formato .pdf en cuyo caso, no se cobran gastos de envío.


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

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




**10<sup>o</sup>** Simposio de Geología Aplicada  
a la Ingeniería y al Ambiente

CORDOBA  
Carlos Paz. 15, 16 y 17 de agosto de 2012



Más información en  
[www.asagai.org.ar](http://www.asagai.org.ar)  
[simposio@asagai.org.ar](mailto:simposio@asagai.org.ar)



ASOCIACION ARGENTINA  
DE GEOLOGIA APLICADA  
A LA INGENIERIA

La Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI), Grupo Nacional Argentino de la Internacional Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), se complace en invitarle a participar del Simposio que tendrá lugar los días 15, 16 y 17 de agosto de 2012 en la Ciudad de Villa Carlos Paz. El mismo permitirá el intercambio de ideas y experiencias así como tomar conocimiento sobre el estado del arte en los diversos temas que se abordarán durante su realización.

Además se ha previsto la entrega del Premio Horacio V. Rimoldi, máxima distinción otorgada por la Asociación.

### Temario

- Agua subterránea
- Aspectos geológico ingenieriles en la construcción de obras
- Cartografía temática
- Casos de obras
- Conservación de la roca ornamental
- Contaminación y degradación de recursos naturales
- Enseñanza de la geología aplicada a la ingeniería
- Estudios geotécnicos
- Evaluación ambiental de planes, proyectos y obras.
- Geoindicadores.
- Geología ambiental.
- Geoquímica aplicada
- Gestión integrada de recursos hídricos
- Hidrología superficial
- Materiales de construcción.
- Ordenamiento territorial.
- Peligros geológicos.
- Recuperación de espacios degradados.

Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2011  
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Junio de 2012