



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura

United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional  
International Hydrological Programme

# Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2  
VOL. 2  
SEP. 2010

*Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*

*Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean*

Publicado en el 2010 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Published in 2010 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso, 11200 Montevideo, Uruguay

ISSN 1688-2873

© UNESCO 2010

Foto de portada: © Denise Gorfinkiel, UNESCO.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

The designations employed and presentation of materials throughout the publications do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities or concerning the delimitations of its frontiers or boundaries.

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Subject to availability free copies can be requested to:

Programa Hidrológico Internacional  
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América  
Latina y el Caribe  
UNESCO

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: + 598 2 413 20 75  
Fax: + 598 2 413 20 94  
E-mail: [aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy)  
<http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac>

**CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL COUNCIL**

Eric Alfaro - Clima Universidad de Costa Rica, Costa Rica
Patricia Ávila - Ciencias Sociales / Antropología Social Universidad Nacional Autónoma de México, México
Walter Baethgen - Agua y Agricultura International Research Institute for Climate and Society, USA
Gino Cassasa - Glaciología Centro de Estudios Científicos, Chile
Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos Universidade de Brasília, Brasil
José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Evens Emmanuel - Calidad de Aguas University of Quisqueya, Haiti
Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación National Center for Atmospheric Research, USA
Alfonso Gutiérrez - Hidrología de Superficie Universidad Autónoma de Querétaro, México
Blanca Jiménez - Aguas Urbanas Universidad Nacional Autónoma de México, México
Lilian Laborde - Legislación Universidad de Buenos Aires, Argentina
Michael McClain - Ecohidrología Florida International University, USA
Miguel Mariño - Aguas Subterráneas University of California – Davis, USA
Víctor Pochat - Gestión Integrada UNESCO
Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS Integrating Watersheds and Coastal Area Management in SIDS, Saint Lucia
<b>STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF</b>
<b>Editor en Jefe / Editor in Chief</b> Víctor Pochat UNESCO
<b>Editora Ejecutiva / Executive Editor</b> Zelmira May UNESCO
<b>Coordinador de Edición / Editorial Coordinator</b> Federico Langguth UNESCO
<b>Diseño Gráfico / Graphic Design</b> María Noel Pereyra UNESCO
<b>Diseño de Portada / Cover Design</b> Federico Langguth UNESCO

**CONTENIDO / CONTENTS**

Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. <b>Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Rodrigo Valdés, Claudio Olivares y Francisco Balocchi</b> Evaluation of Surface Water Erosion in Arid and Semi-Arid Zones of Central Chile. ....	1
Pérdida de capacidad de almacenaje en embalses cubanos. Un efecto de la sedimentación. <b>Orlando Laiz Averbhoff y Ernesto Flores Valdés</b> Storage Capacity Lost in Cuban Reservoirs. An Effect of Sedimentation. ....	12
Simulación numérica del flujo en ríos en geometría compleja con transporte de sedimento y contaminantes basado en las ecuaciones de aguas someras <b>Martín Salinas-Vazquez, William Vicente, Hugo Mendoza, Jesús García, Eliseo Carrizosa, Rafael Val, Javier Osnaya, Arturo Palacio y Alejandro Rodríguez</b> Numerical Simulation of River Flows in Complex Geometry Based in the Shallow Water Equations with Sediment and Pollutants Transport .....	22
Mineralogical and Geotechnical Characterization of Dredged Sediments from the Canal Bois-de-Chêne (Port-au-Prince, Haiti) <b>Wolfied Tingué, Molière Emmanuel Marie Gisèle P.A. Pierre</b> Caracterización mineralógica y geotécnica de los sedimentos de dragado resultantes del canal Bois-de-Chêne (Port-au-Prince, Haití) .....	30
Análisis entre escurrimientos y sedimentos históricos en la cuenca del río Apatlaco, Mor <b>J. M. Preciado, J. M. Arganis, S. R. Val y G.A. Ocón</b> Analysis of Runoff and Historical Sediments in the Apatlaco River Basin, Mor .....	39
Erosión y sedimentación en el curso alto del Río Lerma, Estado de México. <b>Juan Antonio García Aragón, Carlos Díaz Delgado, Marivel Hernández Tellez y Emannelle Quentin</b> Erosion and sedimentation in the Upper Course of the Lerma river, State of Mexico .....	45
Historical Review of Topographical Factor LS, of Water Erosion Models <b>José L. García Rodríguez and Martín C. Giménez Suárez</b> Revisión histórica del factor topográfico, LS de los modelos de erosión hídrica .....	56
Análisis de la adecuación de las acciones restauradoras efectuadas en el cono de sedimentación de un curso torrencial, ante la incidencia en el mismo de eventos extraordinarios durante el invierno de 2009-10 <b>Juan A. Mintegui Aguirre, José C. Robredo Sánchez, Pablo Huelin Rueda y Carlos de Gonzalo Aranoa</b> Analysis of the Adequacy of the Restoring Actions Applied to a Sedimentation Fan of a Torrential Stream, during the Extreme Rainfall Events Occurred during the Winter 2009-2010. ....	62
Comparison of Mathematical Algorithms for Determining the Slope Angle in GIS Environment <b>José L. García Rodríguez and Martín C. Giménez Suarez</b> Aplicación de algoritmos matemáticos en la determinación de la inclinación de pendiente en un entorno SIG. ....	78

---

**CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS**

**LUCILA CANDELA**

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España  
Technical University of Catalonia-UPC, Barcelona, Spain

**MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO**

Programa Global para la Sostenibilidad Hídrica (GLOWS),  
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)  
Global Water for Sustainability Programme (GLOWS)  
United States Agency for International Development (USAID)

**DAVID ENFIELD**

Administración Nacional de Asuntos Oceánicos y Atmosféricos (NOAA), EE.UU  
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA

**VIRGINIA GARCÍA ACOSTA**

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México  
Center of Research and Higher in Studies of Social Anthropology (CIESAS), Mexico

**MICHAEL GLANTZ**

Universidad de Colorado, EE.UU  
University of Colorado, USA

**KENRICK LESLIE**

Centro para el Cambio Climático de la Comunidad Caribeña, Belice  
Caribbean Community Climate Change Center, Belize

**ROBERTO PIZARRO**

Universidad de Talca, Chile  
University of Talca, Chile

**CARLOS TUCCI**

Universidad Federal de Río Grande Do Sul, Brasil  
Federal University of Río Grande Do Sul, Brasil

**SUSCRIPCIONES**

Si desea recibir la revista Aqua – LAC en forma  
periódica en formato digital descargue el formulario  
de suscripción de nuestro sitio web:

[www.unesco.org/phi/aqualac](http://www.unesco.org/phi/aqualac)  
y envíelo a  
[aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy)

**SUSCRIPTIONS**

If you would like to periodically receive Aqua – LAC  
journal in digital format download the suscription  
form from our website:

[www.unesco.org/phi/aqualac](http://www.unesco.org/phi/aqualac)  
and send it to  
[aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy)

## EDITORIAL

La revista Aqua-LAC surgió hace poco más de dos años, como una fuente de expresión de las capacidades científicas de los investigadores de la región de América Latina y el Caribe, dado que no existían los suficientes canales para dar a conocer estas inquietudes. Por ello, UNESCO con su oficina Regional de Ciencia y el Programa Hidrológico Internacional, se propusieron conseguir que la revista fuese una realidad y que sobre ella se expresasen las potencialidades de investigadores y profesionales.

Al cabo de dos años, ya han sido impresos cuatro números, que han permitido abordar los más variados ámbitos relacionados con los recursos hídricos, los que van desde las orientaciones políticas a la aplicación y expresión de metodologías científicas que permiten obtener respuestas a interrogantes que surgen desde los más variados ecosistemas que la región posee.

Por otra parte, el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO posee un importante conjunto de programas temáticos, que abordan diversas problemáticas, tales como las relacionadas con la ecohidrología, los eventos extremos, la educación y los recursos hídricos, hielos y nieves, etc. Por tanto, surgió la idea de si era posible que la revista Aqua-LAC presentara algunos números especiales referidos a los programas, y en este contexto, respondió afirmativamente el Programa ISI, cuya sigla en inglés responde a la International Sediment Initiative, y cuyo norte es fortalecer la cooperación internacional en la gestión regional acerca de los problemas que generan los sedimentos y en encontrar soluciones locales a esta problemática.

El programa ISI de UNESCO, tiene entre sus principales objetivos el fortalecer en un nivel global, la conciencia acerca de la importancia de los procesos de erosión y los sedimentos, y sus impactos sobre el ambiente físico y humano. Un segundo objetivo es promover el intercambio de información acerca de datos relevantes, el monitoreo y los métodos de gestión y aproximación a la problemática real. Finalmente se plantea establecer cooperaciones en erosión y sedimentación, en el ámbito específico de la investigación y de la educación.

En este contexto, cuando se percibe a la erosión como un problema ambiental, en la mayoría de los países se entiende que es éste un fenómeno que corresponde a áreas forestales y agrícolas, que normalmente son áreas altas de la cuenca. Pero, esta visión es reducida, porque no da cuenta de que el fenómeno erosivo, lleva aparejado un segundo fenómeno, que es la sedimentación aguas abajo de las partículas de suelo arrancadas, que reduce la capacidad de conducción de agua de los canales de regadío; afecta la calidad de las aguas por la mayor turbidez; involucra un cambio de las características de los ecosistemas acuáticos; modifica el cauce de los ríos generando una menor capacidad de conducción de las crecidas, aumentando con ello la posibilidad de inundaciones con riesgo de pérdida de vidas humanas; incrementa la posibilidad de descalce de las cepas de puentes y de los cimientos de obras civiles de alto costo; etc. Por tanto, es un problema mayor que debe saber ser abordado desde una perspectiva país y con fines de resolución integral de un problema que pertenece a muchas personas y a muchos sectores productivos.

Por tanto, es muy grato para mí, como coordinador del Programa ISI en América latina y el Caribe, presentar este número de la revista Aqua lac, que está dedicado íntegramente a la temática de erosión y sedimentación y que ha reunido a un destacado grupo de investigadores de diversos países, lo que habla de la capacidad de la Región para abordar esta problemática desde una perspectiva científica y tecnológica, que nos debe llevar a encontrar más y mejores respuestas a los problemas que nos preocupan hoy en día.

Roberto Pizarro  
Coordinador ISI-LAC

## EDITORIAL

Aqua-LAC journal was launched just over two years ago, as a means of expression of Latin America and the Caribbean researcher's scientific capacities, given that there were not enough channels to disseminate these concerns. Therefore, UNESCO Regional Office for Science and the International Hydrological Programme, were determined to make the journal a reality, and an instrument to express the potential of researchers and professionals.

After two years, there have already been printed four issues, which have allowed to address a wide range of areas related to water resources, from political tendencies to the implementation and expression of scientific methodologies that allow to answer questions arising from the most diverse ecosystems of the region.

In this framework it is worth to mention that the International Hydrological Programme of UNESCO coordinates a number of thematic programmes, dealing with diverse issues, such as those related to ecohydrology, extreme events, education, water resources, snow and ice, etc. Therefore, it was put forward the idea that Aqua-LAC journal could include certain special issues referred to those programmes, and the ISI Programme answered positively. The acronym for ISI responds to International Sediment Initiative, and it is aimed at strengthening international cooperation in regional management related to sediment problems and finding local solutions to such problematic.

The ISI programme of UNESCO has among its main objectives to strengthen the awareness about the importance of erosion and sediment processes, and their impacts over physical and human environment at a global level. A second objective is to promote the exchange of information about relevant data, monitoring and management methods and approximation to reality. Finally, it intends to establish cooperation exchanges in erosion and sedimentation, in the specific field of research and education.

In this context, when erosion is perceived as an environmental problem, in most countries it means that this phenomenon corresponds to forest and agricultural areas, which are normally upper basin areas. But this view is restricted, because it does not take into account that erosion phenomenon also involves a second phenomenon, which is downstream sedimentation of soil particles torn off, which reduces irrigation canals water carrying capacity; affects water quality caused by increased turbidity, involves a modification in water ecosystems characteristics; modifies riverbeds by reducing the flood carrying capacity, thereby increasing the possibility of flooding with risk of life losses, increases the possibility of mismatch of bridge strains and foundations of high-cost civil structures, etc. Consequently, it is a major problem that has to be addressed from a national perspective, with integrated resolution purposes for a problem that affects many people and many productive sectors.

It is therefore very gratifying for me, as coordinator of the ISI Programme in Latin America and the Caribbean, to present this issue of Aqua-LAC, which is entirely devoted to the thematic of erosion and sedimentation and has gathered an outstanding group of researchers from different countries, which shows the capacity of the region to address this problem from a scientific and technological perspective, that should lead us to find more and better answers to problems that concern us nowadays.

Roberto Pizarro  
ISI-LAC Coordinator

---

## **POLÍTICA EDITORIAL**

### **Frecuencia de publicación**

La Revista Aqua-LAC será publicada cada seis meses o dos veces al año.

### **Contenido**

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social. El contenido de la publicación buscará abarcar las necesidades de la comunidad científica, gestores de los recursos hídricos, tomadores de decisiones y el público en general.

### **Idioma**

La publicación Aqua-LAC aceptará manuscritos en inglés y español, y publicará el resumen en el idioma original del texto y un resumen en el otro idioma oficial de la revista.

### **Aceptación de los manuscritos**

Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión.

El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

### **Proceso de revisión**

Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, no necesariamente miembros del Comité Editorial. Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos. En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos. El (Los) autor(es) tendrán 60 días para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe, claramente indicando los cambios realizados o enviando una declaración escrita solidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

### **Derechos de reproducción (Copyrights)**

Los autores de artículos aceptados para ser publicados, aceptarán de manera automática que los derechos de autor se transferirán a la revista.

### **Responsabilidad**

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que *“Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización”*.

---

## **EDITORIAL POLICY**

### **Frequency of publication**

The journal Aqua-LAC will be published every six months or twice a year.

### **Contents**

The journal Aqua-LAC contains scientific, policy-related, legislative, educational, social, and communication articles and revisions related to water sciences and water resources topics. The content of the journal is aimed to meet the requirement of the scientific community, water resources managers, decision-makers, and the public in general.

### **Languages**

The journal Aqua-LAC accepts manuscripts in English or Spanish and publishes abstracts in both languages.

### **Acceptance of manuscripts**

Manuscripts submitted for publication must be originals that have not been submitted for possible publication elsewhere. Submitted manuscripts will be undergoing a review process. Invited articles or articles in special topical editions, will not necessarily be submitted to review.

The Editor in Chief, in consultation with the Board of Directors, reserves the right to reject a manuscript if its contents is deemed substantially or formally inconsistent with the editorial line of AQUA-LAC magazine

### **Review process**

All manuscripts submitted for publication will be reviewed by at least two qualified reviewers, not necessarily members of the Editorial Committee. A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundamentals for not addressing comments by the reviewers.

### **Copyrights**

The authors of accepted papers automatically agree the author rights to be transferred to the Journal. The author(s) are expected to sign a copyright form available in the Aqua-LAC webpage.

### **Disclaimer**

Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that *“The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors are responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization”*.

**EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL EN ZONAS  
ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DE CHILE CENTRAL**  
**EVALUATION OF SURFACE WATER EROSION  
IN ARID AND SEMI-ARID ZONES OF CENTRAL CHILE**

Pizarro, R.<sup>1</sup>, Morales, C.<sup>2</sup>, Vega, L.<sup>3</sup>, Valdés, R.<sup>4</sup>, Olivares, C. y Balocchi, F.<sup>5</sup>

**Resumen**

En el presente documento, se analiza la erosión hídrica superficial junto al conglomerado de procesos erosivos que toman lugar en la IV Región de Coquimbo, a través del método de parcelas de clavos de erosión. Los datos fueron obtenidos mediante mediciones realizadas en parcelas experimentales, en 30 sectores a lo largo de la Región, durante los años 2007 y 2008, en el marco del proyecto "Restauración Hidrológico Forestal y Oasificación: Herramientas Claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo", desarrollado por el Instituto Forestal y la Universidad de Talca. Junto a esto, se obtuvieron las densidades aparentes y texturas de cada suelo, además de las lecturas de 18 pluviógrafos instalados en la región.

En este sentido, se demostró a nivel general que las densidades de los suelos no difieren en demasía entre el total de sectores, sin embargo, se observó un amplio mosaico de texturas, predominando los suelos del tipo franco arenoso. Los resultados pluviométricos evidenciaron una amplia variabilidad para los períodos considerados, asimismo, se observó un leve aumento en la cuantía e intensidad de las precipitaciones al avanzar hacia el sur. Respecto a los procesos erosivos considerados (erosión, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado) se observó una pérdida de suelo neta decreciente de Norte a Sur, lo que no fue representativo para el total de procesos, los cuales presentaron fluctuaciones.

Finalmente, es importante señalar que en este estudio se trazaron los primeros lineamientos, con el fin de lograr la modelación de los procesos erosivos para la Región de Coquimbo y sus provincias, lo cual se puede lograr relacionando gráficamente los procesos analizados, con las variables pluviométricas consideradas. Debido a lo anteriormente señalado, en este estudio se deja de manifiesto que resulta de suma importancia seguir recopilando información durante los años siguientes, mediante la metodología aquí propuesta.

**Palabras clave:** Erosión, sedimentación, parcelas de clavos de erosión, erosión neta, suelo movilizado

**Abstract**

In this document discusses de surface water erosion along the conglomerate of erosive processes taking places in the Coquimbo Region, through the method of erosion plots nails. The data were obtained from measurements made in experimental plots in 30 sectors throughout the region, during 2007 and 2008 years, under the project "Restoring forest hydrological and oasification: key tools for increasing productivity of degraded soils of the Coquimbo Region", developed by the Forest Institute and the University of Talca. Alongside this, was the obtained the apparent densities and textures of each floor, plus reading of 18 recording rain gauges installed in the Region.

It showed that, in general, the densities of soil do not differ too much between total sectors, however, there was a lot a broad mosaic textures, the predominant type of frank sandy soils. The results showed a wide variability rainfall for the periods concerned, and, though weak, was seen an increase in amount and intensity of rainfall as they move southward. Whit regard to the erosive processes in question (erosion, sedimentation, net erosion and mobilized soil) showed a net loss of soil decreasing from north to south, which was not representative for the total processes, whit showed fluctuations.

Finally, this study charted the first guidelines to achieve shaping the erosive phenomenon in the Coquimbo Region, linking graphically processes studies whit rainfall variables considered. For the foregoing, it is imperative to continue the study proposed here.

**Key words:** Erosion, sedimentation, plots of nails of erosion, net erosion, mobilized soil.

**INTRODUCCIÓN**

La erosión corresponde a la pérdida de suelo, proceso que se inicia cuando las gotas de lluvia impactan en el suelo y disgregan las partículas de éste; asimismo, la magnitud con que ocurre el fenómeno, depende del tamaño y la velocidad de las gotas de lluvia. De esta forma Pidwirny (2006) define la erosión

como la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua.

Así, las partículas del suelo disgregadas son arrastradas después por escurrimiento superficial y algunas de ellas se depositan en los poros del suelo,

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca, Chile. rpizarro@utalca.cl

disminuyendo la capacidad de éste para infiltrar el agua de lluvia, hecho que aumenta la probabilidad de generar procesos erosivos, ya que la erosión se produce cuando la intensidad de las precipitaciones supera a la capacidad de infiltración del suelo.

El proceso de pérdida de suelo por la erosión es mucho más rápido que el proceso de formación de éste. Por eso, la pérdida de la capa superficial del suelo disminuye la fertilidad y ocasiona una disminución de los rendimientos de las cosechas. La tierra arastrada contribuye además a la contaminación y el aterramiento de los ríos. Asimismo, la Corporación Chilena de la Madera (CORMA, 2005) agrega que en términos prácticos el suelo no es un recurso natural renovable, por lo que su pérdida debe considerarse irreversible.

Aunque la erosión hídrica es un proceso natural ocasionado fundamentalmente por las lluvias intensas; la topografía, el bajo contenido de materia orgánica del suelo, así como el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, coayudan a producirla. De esta manera, las actividades humanas como las técnicas de cultivo inapropiadas, las modificaciones de las condiciones hidrológicas, la deforestación y la marginalización o abandono de tierras, contribuyen a intensificarla y acelerarla. Adicionalmente, cabe señalar que este tipo de erosión constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y representa una de las formas más completas de degradación, englobando tanto la degradación física del suelo como la química y la biológica (De Regoyos, 2003 citando a Colomer, 2001).

En el mismo contexto, se debe señalar que la degradación de las tierras en Chile, verificada en zonas áridas y semiáridas, adquiere una alta importancia, dada la fragilidad de estos ecosistemas, en donde predominan condiciones de cobertura vegetal reducida o casi ausente, ligadas a eventos de precipitación escasos, pero de alta intensidad; ello conduce irremediablemente a procesos de desertificación, fenómeno que según Pizarro et al. (2003a), se ha constituido en uno de los problemas socio-económico-ambientales más serios del país. Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) en 1994, concordaron en señalar que la distribución de los terrenos erosionados en Chile no sigue un patrón regular, y es posible encontrar tanto áreas escasamente erosionadas, como sectores en los cuales la pérdida y el deterioro hacen irre recuperable el recurso, tanto en términos físicos como productivos.

En este marco, la Región de Coquimbo, ubicada aproximadamente a unos 350 Km. al norte de Santiago de Chile, es la Región que presenta la situación más crítica del país, en donde las precipitaciones torrenciales, a pesar de ser escasas, arrastran consigo significativas porciones de suelo con las mejores condiciones de fertilidad (Benedetti y Pizarro, 2006). Por lo tanto, se puede señalar que es una zona en

donde los procesos de desertificación y erosión tienen una alta importancia, a pesar de las múltiples medidas aplicadas. Ello es función principalmente de la sobreexplotación de los recursos edáficos y vegetacionales, aunque las altas tasas de migración campo ciudad producidas en esta zona, en los últimos 10 años, han aliviado la presión sobre los recursos naturales y han permitido una incipiente recuperación de los ecosistemas, hecho que aún corresponde a zonas específicas y no es una generalidad del territorio de esta Región.

En este ámbito, se debe señalar que la falta de información cuantitativa sobre el tema de la erosión en Chile, es un problema evidente y ello es más explícito en zonas áridas y semiáridas. Por tanto, resulta de alta importancia el contar con herramientas matemáticas y/o computacionales que permitan estimar las tasas de erosión, con el propósito de facilitar la toma de decisiones técnicas y con ello conseguir un manejo sustentable del recurso suelo.

En función de lo anteriormente expuesto, y dado que no existen referencias de estudios similares que aborden la temática de la erosión hídrica en el país, este estudio se enmarca en la evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Región de Coquimbo, Chile, mediante la aplicación de la metodología de parcelas con clavos de erosión.

## METODOLOGIA

La metodología empleada en este estudio para la medición de la erosión y/o sedimentación, corresponde a la utilización de parcelas con clavos de erosión, cuya instalación y mediciones se han efectuado en el marco del proyecto "Restauración hidrológico forestal y Oasificación: Herramientas claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo", proyecto que fue financiado por la Agencia Estatal Corfo/Innova de Chile, y el cual ha tomado lugar los años 2006, 2007, 2008 y 2009. Los resultados entregados en este artículo, corresponden a los de los años 2007 y 2008.

El método de las parcelas con clavos de erosión, corresponde a parcelas rectangulares, abiertas en términos de permitir el flujo líquido y sólido desde la parte alta de la ladera hasta la parcela, a las cuales se les instalan clavos, los que son medidos inicialmente desde la cabeza de cada clavo, hasta el nivel del suelo, medida que fija la lectura inicial. De forma posterior a la ocurrencia de una tormenta, se vuelve a repetir el proceso de medición, y si la distancia entre la cabeza del clavo y el nivel del suelo se ha incrementado, con respecto a la medición inicial, entonces se entiende que ha existido un proceso erosivo. Si por el contrario, dicho vector ha visto reducida su dimensión, entonces ha ocurrido un proceso de sedimentación (Figura 1). Lo anterior permite establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo, y al-

canzar una mejor estimación de los procesos erosivos. (Pizarro y Cuitiño, 2002).

Respecto a lo expuesto, Pizarro y Cuitiño, 2002, señalan que si existen procesos de erosión (E) y sedimentación (S), entonces es posible establecer un nuevo concepto, llamado erosión neta (En), que se entiende como la diferencia entre ambos procesos, es decir,  $En=E-S$ ; por tanto si el valor de En es posi-

tivo, entonces se advierte que hubo un predominio de la erosión sobre la sedimentación; y si es negativo, es la sedimentación la que prevaleció sobre la erosión. Asimismo, es importante agregar el concepto de suelo movilizado, SM, entendido como el total de suelo que se movilizó sobre la superficie, y que corresponde a la suma de los procesos de erosión y sedimentación, es decir,  $SM=E+S$ .

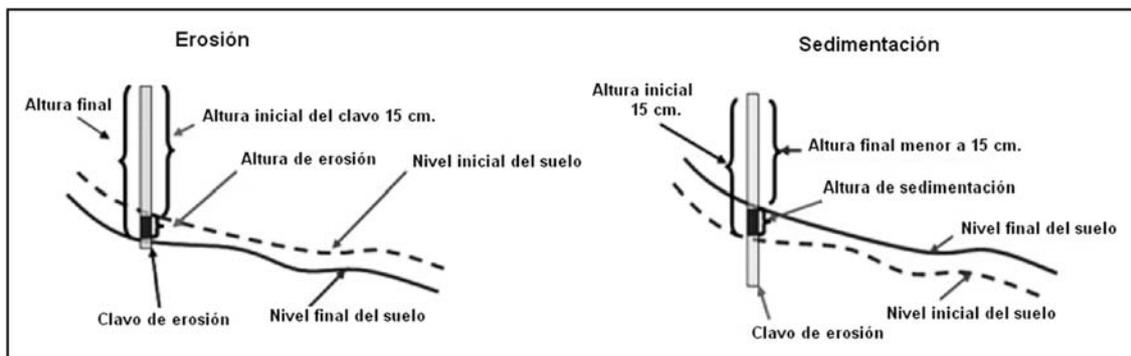


Figura 1. Forma de medición de la altura de erosión y la altura de sedimentación.

En relación al emplazamiento del experimento en cada parcela, éste consta de clavos de unos 30 cm de largo, los cuales se instalan verticalmente en cada sitio, siendo el número de éstos función del grado de exactitud que se quiera lograr. Para una mayor precisión, lo recomendable es que cada parcela posea dos repeticiones en el lugar, lo que da un total de tres parcelas en cada área en estudio.

Por otra parte, los clavos se instalan sobre suelo desnudo, debido a que la existencia de vegetación hace muy difícil la medición, y ello es aún más importante, si se considera que las mediciones se hacen con un diferencial de un tercio de milímetro. Por tanto, estas parcelas son muy adecuadas para zonas áridas y semiáridas y no son recomendables para zonas húmedas en donde existe abundancia de vegetación. Si se visualiza presencia de vegetación, es necesario eliminarla. De esta manera, la estimación de erosión que se hace por estas parcelas, es la máxima o potencial para cada situación, dado que la presencia de vegetación reduciría la escorrentía sólida.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la Región de Coquimbo, Chile, la cual se extiende entre los 29°20' - 32°10' Latitud Sur y los 69°49' - 71°43' Longitud Oeste, abarcando una superficie aproximada de 40.579,9 km<sup>2</sup>. La región se divide administrativamente en tres provincias, las que ubicadas de norte a sur, corresponden a Elqui, Limarí y Choapa. Asimismo, cada provincia está subdividida en comunas o municipios (Figura 2).

La Región de Coquimbo es llamada zona de los Valles Transversales. Presenta tres unidades de relieve definidas, de este a oeste y estas son: La Cordillera

de Los Andes, la depresión intermedia y la Cordillera de la Costa.

La Cordillera de los Andes se presenta con altas cumbres, sobre los 6000 m y desciende de norte a sur. También se puede señalar que no presenta volcanismo activo.

En la depresión intermedia, en las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, y en sus valles correspondientes, se verifica la presencia de cordones montañosos, conocidos como Valles Transversales. Los principales ríos, que llevan el nombre de las cuencas, desembocan en el mar y están formados de la siguiente forma; el río Elqui está formado por los ríos Turbio, Claro y Cochiguaz; el río Limarí por los ríos Hurtado, Grande, Los Molles y Cogotí; y el río Choapa está formado por los ríos Cuncumén, Illapel y Chalinga. El agua transportada por estos ríos proviene del derretimiento de las nieves depositadas en la Cordillera de Los Andes y de las lluvias experimentadas durante el año, por lo que generalmente sus caudales son irregulares, y producto de las sequías cíclicas que experimenta la región, en algunos años, son bastante escasos. Ésto ha hecho necesaria la construcción de embalses para una mejor administración del recurso hídrico, como el Puclaro (en el río Elqui), Cogotí (en el río Cogotí), Recoleta (en el río Hurtado) y La Paloma (en el río Grande).

La Cordillera de la Costa es amplia y deja una zona de Planicies litorales, en contacto directo con el Océano Pacífico. Estas son especialmente anchas en la desembocadura del río Limarí

## Selección de los sectores y ubicación de las parcelas

Tal como lo muestra el cuadro 1, en la región se seleccionaron 30 sectores, 10 por cada provincia ad-

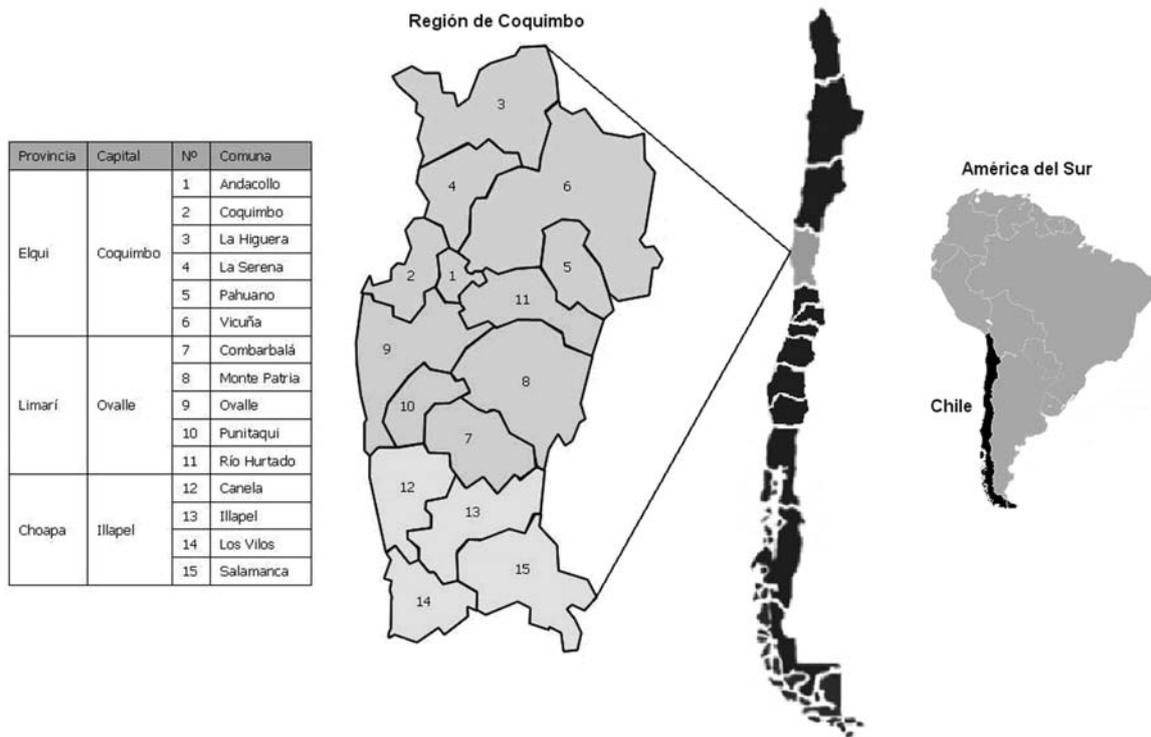


Figura 2. Mapa administrativo de la Región de Coquimbo, Chile.

ministrativa, los cuales fueron objeto de estudio de los procesos erosivos, mediante la implementación y medición de parcelas de clavos de erosión.

Para el experimento se consideró la instalación y medición de 130-135 clavos por parcela, considerando 3 parcelas por sector y para los 30 sectores analizados. Esto significa que después de cada tormenta, la medición total involucró aproximadamente 11.970 clavos. Es importante mencionar que las parcelas se instalaron sobre suelo desnudo, donde en ocasiones fue necesaria la aplicación de matamalezas.

Las mediciones se efectuaron con una huincha métrica al costado de cada clavo, expresadas en milímetros. Los datos fueron capturados de manera periódica tras cada tormenta, resultando en un total de 4 medidas de datos realizadas como promedio anual, dado que ciertos lugares en estudio presentan una mayor frecuencia de eventos de lluvia, en relación con otras zonas de la región. Asimismo, la medición de los clavos se realiza al menos 1 semana después de ocurrida la tormenta, para que dicha medición se haga a un mismo nivel de humedad presente en el suelo (figura 3)

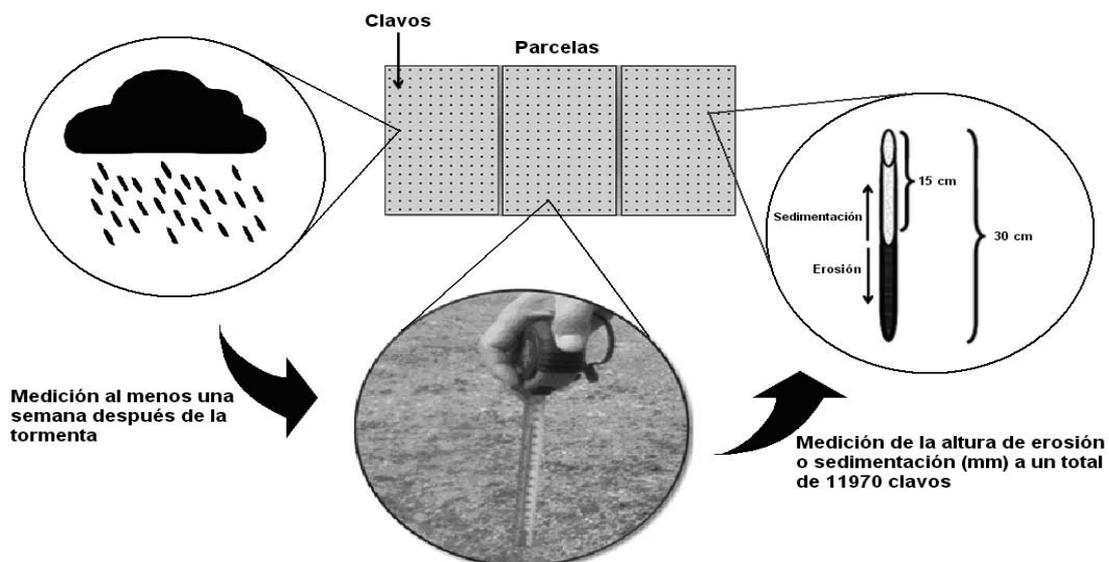


Figura 3. Descripción de parcelas, clavos y herramientas de medición.

Cuadro 1. Resumen de los sectores analizados.

Región	Provincia	Sectores Analizados	Coordenadas geográficas	
			Latitud	Longitud
Coquimbo	Elquí	El Tambo	30°1,600'	70°46,825'
		Gualliguaica	29°59,751'	70°48,565'
		Quebrada Talca	30°0,565'	71°2,457'
		Quebrada Honda	29°35,137'	71°12,507'
		Caldera y Damas	30°17,702'	71°9,190'
		Las Cardas	30°17,389'	71°16,362'
		El Chacay	29°40,583'	71°11,869'
		Quitallaco	30°8,584'	71°14,450'
		Tangué N°1	30°21,013'	71°33,204'
		Tangué N°2	30°27,534'	71°27,774'
	Limarí	Alcones	30°44,135'	71°31,199'
		Fray Jorge	30°40,281'	71°37,808'
		El Sauce	31°04,036'	71°07,715'
		Cogotí 18	31°06,222'	70°57,211'
		Pichasca	30°23,618'	70°52,768'
		La Colpa	30°29,513'	71°04,839'
		Romeralsillo	30°27,990'	71°09,215'
		Barraza	30°41,245'	71°28,044'
		El Espinal	30°44,237'	71°24,701'
		La Rinconada	30°50,976'	71°21,571'
	Choapa	Huanque	31°44,343'	70°55,211'
		Las Chinchillas	31°30,802'	71°05,565'
		Tunga Norte	31°38,023'	71°19,060'
		Atelcura	31°33,394'	71°21,770'
		Agua Fría	31°29,293'	71°22,221'
		Carquindaño	31°28,173'	71°24,756'
		El Chilcal	31°21,893'	71°26,097'
		Yerba Loca	31°33,394'	71°21,770'
		Cañas del Choapa	31°44,883'	71°18,650'
		Caracas los Vilos	31°53,762'	71°27,771'

### Determinación de los valores de erosión y sedimentación

Para cuantificar los procesos erosivos, se procedió a lo planteado por Pizarro y Cuitiño, 2002. Así, después de cada evento de lluvia, se sumó el valor de cada uno de los clavos que denotó la presencia de una altura de erosión en la parcela, sin considerar los clavos que presentaron sedimentación, y el valor de esa sumatoria, fue dividido por el número total de clavos medidos. Para estimar la sedimentación, se sumó el valor de la altura de sedimentación que denotó cada clavo, sin considerar para ello a los que mostraron erosión, y la suma total fue dividida por el número total de clavos medidos. De esta manera se tuvo un valor promedio de la altura de erosión y de sedimen-

tación para la parcela, y ello tras cada tormenta o evento de lluvia. Asimismo, cada sector en estudio entregó un valor promedio de altura de erosión y de sedimentación, por medio de la obtención del promedio entre las tres parcelas establecidas en cada uno de los sectores señalados. Para definir el valor de la erosión y la sedimentación en ton/ha, se usa la expresión siguiente:

$$X = Y * Da * 10$$

Donde X es el suelo erosionado o sedimentado (ton/ha); Y es la altura media de suelo erosionado o sedimentado (mm) y Da corresponde a la densidad aparente del suelo (ton/m<sup>3</sup>). Por tanto, con esta información fue posible estimar adicionalmente los valores de erosión neta y suelo movilizado.

**Cuadro 2. Resumen de los sectores con instrumental pluviográfico.**

Región	Provincias	Pluviógrafo		
Coquimbo	Elqui	El Tambo	Quebrada Honda	Las Cardas
		Gualiguaica	Caldera y Damas	Tangue N°1
	Limarí	Fray Jorge	Pichasca	Barraza
		El Sauce	Romeralsillo	La Rinconada
	Choapa	Huanque	Atelcura	Cañas del Choapa
		Las Chinchillas	El Chilcal	Caracas los Vilos

### Cálculo de las precipitaciones e intensidades de lluvia

La información pluviométrica de los sectores se obtuvo mediante las lecturas de 18 pluviómetros instalados en los sectores que señala el cuadro 2. Cada pluviómetro instalado midió y presentó la información registrada en rangos de 0,2 milímetros (mm), especificando la fecha y hora exacta en la cual se produjeron los eventos de precipitación. Con esta información, se identificaron en sus montos y comportamientos las tormentas a analizar, además de seleccionar tormentas con un monto igual o superior a 0,4 mm de lluvia. Posteriormente, para cada tormenta se obtuvieron los montos totales de precipitación, MTpp, la intensidad promedio IT y la intensidad máxima para 1 hora lmax1h.

Los pluviómetros instalados cubrieron una superficie correspondiente a más de un sector en estudio; para determinar los sectores que fueron cubiertos por uno u otro pluviómetro, se utilizó la metodología de los Polígonos de Thiessen, que permitió definir el área de influencia de cada pluviómetro, utilizando para ello el software de libre distribución GeoDATM.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados se logró determinar para los 30 sectores analizados, que la textura predominante del suelo fue franco-arenosa. Cabe mencionar que dicha textura presenta entre un 50-70% de arena y aproximadamente un 20% de arcilla.

Por otra parte, se puede señalar que para la región de Coquimbo la densidad aparente del suelo alcanzó un valor promedio de 1,31 gr/cm<sup>3</sup>. En el Cuadro 3, se observan las clases texturales predominantes y las densidades promedio del suelo, por provincia.

Al analizar el comportamiento latitudinal de la textura del suelo, se puede señalar que no se evidenció una relación que permitiera reforzar dicha idea. Así, la mayor variedad de texturas se localizó en el sector Sur, correspondiente a la Provincia de Choapa, en donde se encontraron 6 clases texturales. Asimismo, es importante mencionar que el sector sur es el que denota la mayor presencia de lluvias y por ende es el de mayor vegetación relativa en esta zona.

**Cuadro 3. Clases texturales y densidades promedio por provincia.**

Provincia	Clase textural predominante	Densidad promedio (g/cc)
Elquí	Franco arcilloso arenoso	1.276
Limarí	Franco arenoso	1.370
Choapa	Franco arenoso	1.293

Con respecto a la pluviometría, es importante referirse al número de tormentas analizadas, con lo cual se puede señalar que en el año 2007 se analizaron 52 tormentas y en el año 2008 se analizaron 98 tormentas, también se debe mencionar que en el primer año 28 sectores tenían registro pluviométrico y en el segundo año 29 sectores, tal como lo muestra el cuadro 4. Adicionalmente, se aprecia que cada sector tuvo en promedio de 3 a 4 tormentas anuales.

**Cuadro 4. Número de tormentas y sectores analizados por provincia.**

Provincia	Número de sectores y tormentas analizadas			
	2007		2008	
	Sectores	Tormentas	Sectores	Tormentas
Elquí	10	16	10	35
Limarí	8	10	9	31
Choapa	10	26	10	32
Total Regional	28	52	29	98

En el contexto anterior, se puede agregar que el número de tormentas aumentó considerablemente el año 2008 con respecto al año 2007, tanto a nivel regional como provincial. Lo cual deja de manifiesto un posible aumento del monto de precipitación entre un año y otro.

En el cuadro 5, se presentan los resultados promedio de las variables pluviométricas consideradas, a saber MTpp (monto total de precipitación de la tormenta en mm); IT (intensidad promedio de la tormenta en mm/h); e lmax1h (intensidad máxima de la tormenta

**Cuadro 5. Resultados promedios para las variables pluviográficas consideradas.**

Año	Proceso Erosivo	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limari	Choapa	
2007	Mtpp (mm)	8,05	11,97	20,80	<b>13,61</b>
	IT (mm/h)	4,41	0,81	1,15	<b>2,12</b>
	Imax1h (mm/h)	19,46	3,28	6,5	<b>9,74</b>
2008	Mtpp (mm)	34,37	21,97	42,05	<b>32,8</b>
	IT (mm/h)	2,39	2,67	1,39	<b>2,15</b>
	Imax1h (mm/h)	8,81	16,34	21,33	<b>15,49</b>
Promedio Provincial	Mtpp (mm)	<b>21,21</b>	<b>16,97</b>	<b>31,43</b>	<b>23,21</b>
	IT (mm/h)	<b>3,4</b>	<b>1,74</b>	<b>1,27</b>	<b>2,14</b>
	Imax1h (mm/h)	<b>14,14</b>	<b>9,81</b>	<b>13,92</b>	<b>12,62</b>

en una hora en mm/h), tanto para la Región de Coquimbo como para las provincias de Elqui, Limari y Choapa. Como se mencionó anteriormente, dichas variables fueron obtenidas luego de la selección y caracterización de tormentas registradas por los pluviógrafos.

Donde MTpp es Monto total de precipitación, IT es intensidad máxima promedio por tormenta e Imax1h corresponde a la intensidad máxima para 1 hora.

A contar de la información anterior, se aprecia que el monto total de precipitación por tormenta (MTpp) para la Región de Coquimbo, fue mayor durante el año 2008, registrándose en promedio 32,80 mm por tormenta. Por su parte, el año 2007 presentó los valores de MTpp promedio más bajos, tanto a nivel provincial como regional, registrándose 13,61 mm por tormenta como promedio para la Región.

A nivel territorial se observa que la provincia que tuvo el mayor monto total de lluvia por tormenta o evento de precipitación, en el total del periodo estudiado (2007-2008), fue Choapa, con un promedio para la provincia de 31,43 mm por tormenta. Por su parte, Limari fue la que presentó el menor valor del monto de precipitaciones por tormenta para el mismo periodo, con un promedio provincial de 16,97 mm por tormenta, en tanto que la provincia de Elqui presentó un valor promedio por tormenta de 21,21 mm.

Con respecto a la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT), en la Región de Coquimbo se observa que el año 2007 es el que ha presentado los valores más bajos de intensidad, con un valor regional de 2,12 mm/h, el cual es superado levemente por el valor encontrado en el año 2008 correspondiente a 2,15 mm/h.

Adicionalmente, es importante mencionar que el comportamiento de la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta, para cada una de las provincias analizadas, es totalmente distinto respecto a lo sucedido con el monto total de precipitaciones. Si

bien, la provincia de Choapa fue la que presentó el mayor MTpp, su intensidad promedio por tormenta (IT) fue la menor de las tres provincias (1,27 mm/h); en segundo lugar se ubicó la provincia de Limari (1,74 mm/h); y en primer lugar la provincia de Elqui, en la cual fue encontrado un valor de intensidad de 3,40 mm/h. De esta forma, es posible afirmar que no existe relación entre el monto y la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta. Dicho de otra manera, las precipitaciones de una provincia o una región pueden ser más intensas cierto año, pero eso no significa que llueva más.

Al analizar la intensidad máxima de la tormenta en una hora (Imax1h), como valor promedio para la región de Coquimbo, se observa un aumento desde el año 2007, con un valor promedio por tormenta de 9,74 mm/h. Luego en el año 2008 dicho valor se incrementó a 15,49 mm/h. Con esto, se puede agregar que existe una importante variabilidad en los eventos pluviométricos de la región y también en los niveles de torrencialidad que se expresan en la intensidad máxima en una hora, la cual es similar a la que presentan como valores máximos otras zonas al sur del país, que están clasificadas como zonas húmedas.

La variabilidad mencionada anteriormente se puede apreciar de mejor forma en la figura 4, que muestra gráficamente el coeficiente de variación para las variables pluviográficas de las estaciones, ubicadas éstas de norte a sur del país, donde la tendencia de la gráfica se muestra variable.

A continuación, en el cuadro 6 se muestran los resultados promedio para cada año, los cuales corresponden a la suma de las erosiones anuales ocurridas por sector, dividida por el número de tormentas o eventos de lluvia de los procesos erosivos. Dichos resultados son presentados en ton/ha, tanto a nivel provincial como regional.

Donde E: Erosión, S: Sedimentación, En: Erosión neta y Sm: Suelo movilizado.

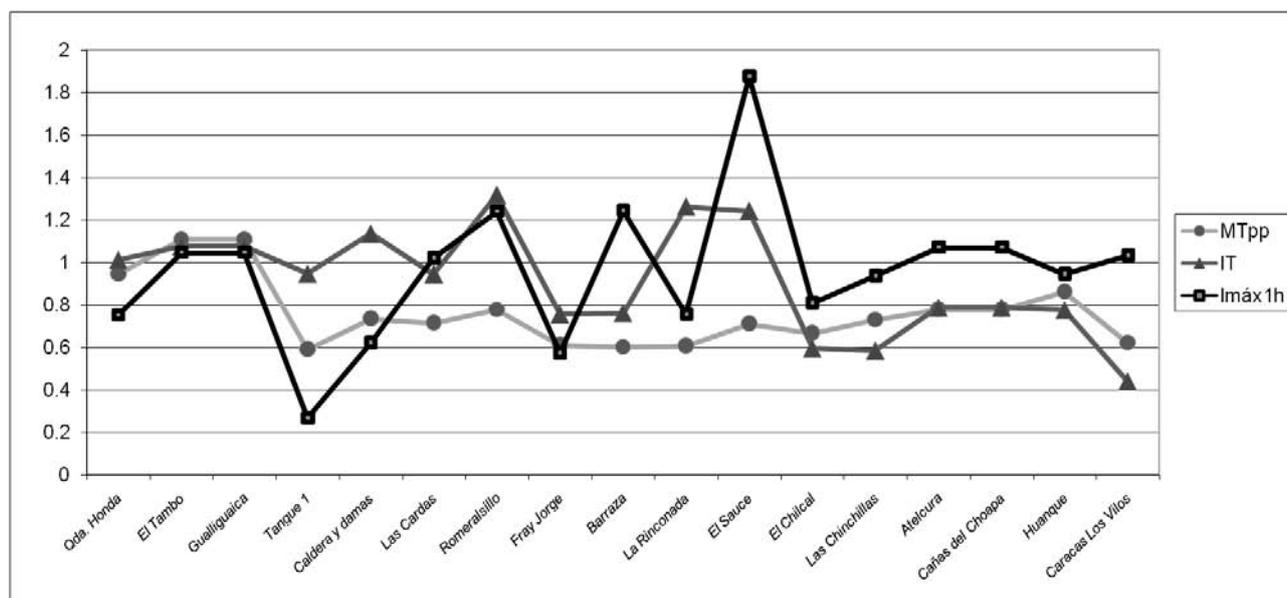


Figura 4. Coeficiente de variación (CV) para las variables pluviométricas por sector en disposición Norte – Sur.

Cuadro 6. Resultados medios para las variables del proceso erosivo.

Año	Proceso Erosivo	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limari	Choapa	
2007	E(ton/ha)	5,81	4,75	2,96	<b>4,51</b>
	S(ton/ha)	2,47	2,31	3,55	<b>2,77</b>
	EN(ton/ha)	3,34	2,44	-0,59	<b>1,73</b>
	SM(ton/ha)	8,28	7,06	6,51	<b>7,28</b>
2008	E(ton/ha)	3,67	4,75	4,32	<b>4,25</b>
	S(ton/ha)	2,27	2,84	1,46	<b>2,19</b>
	EN(ton/ha)	1,40	1,91	2,86	<b>2,06</b>
	SM(ton/ha)	5,94	7,59	5,79	<b>6,44</b>
Promedio Provincial	<b>E(ton/ha)</b>	<b>4,74</b>	<b>4,75</b>	<b>3,64</b>	<b>4,38</b>
	<b>S(ton/ha)</b>	<b>2,37</b>	<b>2,58</b>	<b>2,51</b>	<b>2,48</b>
	<b>EN(ton/ha)</b>	<b>2,37</b>	<b>2,18</b>	<b>1,14</b>	<b>1,90</b>
	<b>SM(ton/ha)</b>	<b>7,11</b>	<b>7,33</b>	<b>6,15</b>	<b>6,86</b>

De la tabla anterior se desprende que el proceso de erosión ha sido mayor durante el año 2007, con un valor promedio regional de 4,51 ton/ha, el cual supera levemente al valor encontrado en el año 2008, correspondiente a 4,25 ton/ha.

También es importante mencionar que durante el año 2007, los suelos de los sectores de la provincia de Elqui se erosionaron en 5,81 ton/ha, como valor medio de las parcelas existentes en esta provincia, siendo ésta la que presentó el mayor valor de

erosión en dicho año, superando a la provincia de Limarí (4,75 ton/ha) y también sobrepasando en más de dos veces el valor encontrado en la provincia de Choapa (2,96 ton/ha). Durante el año 2008 la provincia de Limarí presentó el mayor valor de erosión de la Región (4,75 ton/ha). Por su parte, la provincia de Elqui presentó un valor de erosión del suelo de 3,67 ton/ha, considerando el mismo año, siendo éste, el valor promedio más bajo encontrado en la Región durante el año 2008. Lo anterior da cuenta de la vari-

abilidad que denotan las zonas áridas y semiáridas, en lo que respecta a los procesos precipitación-es-correntía.

Al analizar los valores promedio de erosión por provincia, para el período estudiado (2007-2008) se observó que la provincia de Limarí presentó el mayor valor, correspondiente a 4,75 ton/ha; en segundo lugar se ubicó la provincia de Elqui con 4,74 ton/ha y finalmente Choapa con 3,64 ton/ha. Esto es particularmente importante, porque estos resultados podrían llevar a la determinación de construir modelos predictivos de erosión, por cada provincia administrativa, derivado que no en toda la Región de Coquimbo se presenta el fenómeno erosivo con similares magnitudes ni relaciones.

Con respecto al proceso de sedimentación, se observa que en términos anuales, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional (2,77 ton/ha); asimismo, se ha observado una disminución entre los años considerados, observándose que durante el año 2008, se observó un valor promedio regional de sedimentación de 2,19 ton/ha.

Considerando el período 2007-2008, se observa que la provincia que tuvo un mayor promedio de sedimentación fue Limarí (2,58 ton/ha), seguida por Choapa (2,51 ton/ha) y finalmente Elqui con un total de 2,37 ton/ha. En el mismo sentido, se puede agregar que se ha observado en las provincias de Elqui y Choapa una disminución de la sedimentación en los años 2007 a 2008.

Al referirse a la erosión neta, debemos recordar que este proceso es el resultado de la diferencia (resta) entre la erosión y la sedimentación; así se puede señalar que la erosión neta tuvo un resultado negativo en la provincia de Choapa durante el año 2007, en donde el proceso de erosión fue superado por la sedimentación, resultando una erosión neta de -0,59 ton/ha. Sin embargo, durante el año 2008 la erosión neta muestra sólo valores positivos para las tres provincias, lo cual indica que la erosión fue mayor que la sedimentación, derivado de las razones expresadas anteriormente.

En términos regionales y a contar de la información otorgada por el cuadro 6, se verifica que los valores promedio de erosión neta, han aumentado en el año 2008 con respecto al año 2007, con valores para la Región que subieron desde 1,73 ton/ha hasta 2,06 ton/ha.

En términos provinciales se observa que Elqui presentó el mayor promedio de erosión neta durante el período 2007-2008, con un valor de 2,37 ton/ha, lo cual es muy lógico, porque es una zona en donde la vegetación ha sido diezmada por la ganadería caprina, que aún existe, y por tanto cualquier monto de lluvia, inclusive menor, afecta de manera más determinante a Elqui que a las demás provincias. En segundo lugar, se ubicó la provincia de Limarí con 2,18 ton/ha y finalmente Choapa con 1,14 ton/ha. Además, es importante mencionar que en las provin-

cias de Elqui y Limarí se ha observado un aumento de la erosión neta durante los años 2007 y 2008; sin embargo, en la provincia de Choapa, se ha observado una disminución entre los años considerados.

Con respecto a la cantidad de suelo movilizado en la región de Coquimbo, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional, correspondiente a 7,28 ton/ha. El año 2008 por su parte, presentó un promedio regional de 6,44 ton/ha.

La provincia con mayor cantidad de suelo movilizado durante el año 2007 fue Elqui (8,28 ton/ha), seguida por las provincias de Choapa y Limarí, las cuales fueron cercanas en sus valores promedio de suelo movilizado (7,06 y 6,51 ton/ha respectivamente). Sin embargo, durante el año 2008, la provincia con mayor cantidad de suelo movilizado fue Limarí, con un valor promedio de 7,59 ton/ha. Seguida por Elqui y Choapa con valores similares de 5,94 y 5,79 ton/ha respectivamente. Esta situación deja de manifiesto la variabilidad de los procesos erosivos en las zonas áridas y semiáridas del país.

Al considerar el período 2007-2008, se observa que Limarí tiene el mayor promedio de suelo movilizado, cuyo valor alcanza las 7,33 ton/ha. En segundo lugar se encontró la provincia de Elqui con un valor promedio de 7,11 ton/ha y finalmente Choapa con un valor de 6,15 ton/ha. Al respecto debe señalarse que la explicación a las altas tasas de erosión en general de Elqui y Limarí, y esto con respecto a Choapa, estaría relacionado con la presencia de una vegetación casi inexistente, con una escasa presencia de raíces de todo tipo en el suelo, y en donde montos de lluvia bajos generan procesos erosivos de mayor magnitud que en las otras provincias.

En la figura 5, se presenta el gráfico con los resultados obtenidos para la región de Coquimbo y cada provincia en estudio, durante el período 2007-2008.

Una vez obtenidos los resultados, se estudió la relación entre las variables pluviométricas (MTpp, IT y I<sub>max</sub>1h) y las variables del proceso erosivo (E, S, EN y SM), la cual fue analizada mediante la elaboración de gráficas de dispersión (período 2007-2008). Con esto se logró conocer la relación entre las variables consideradas. Dicho estudio podría dar luces que permitan llevar a cabo el desarrollo de modelos matemáticos para la estimación de los procesos erosivos. Es importante señalar que el resultado esperable al relacionar las variables pluviométricas con las variables del proceso erosivo, es que dicha relación sea positiva, lo cual quiere decir que a mayor valor de la variable pluviométrica, se espera un mayor valor del proceso erosivo, aunque también es esperable alcanzar relaciones inversas con respecto a la erosión neta, dado que es producto de una diferencia numérica, que en ocasiones puede ser negativa.

Del cuadro 7 se desprende que la provincia de Choapa presentó la mayor cantidad de relaciones positivas entre las variables consideradas, con 9 rela-

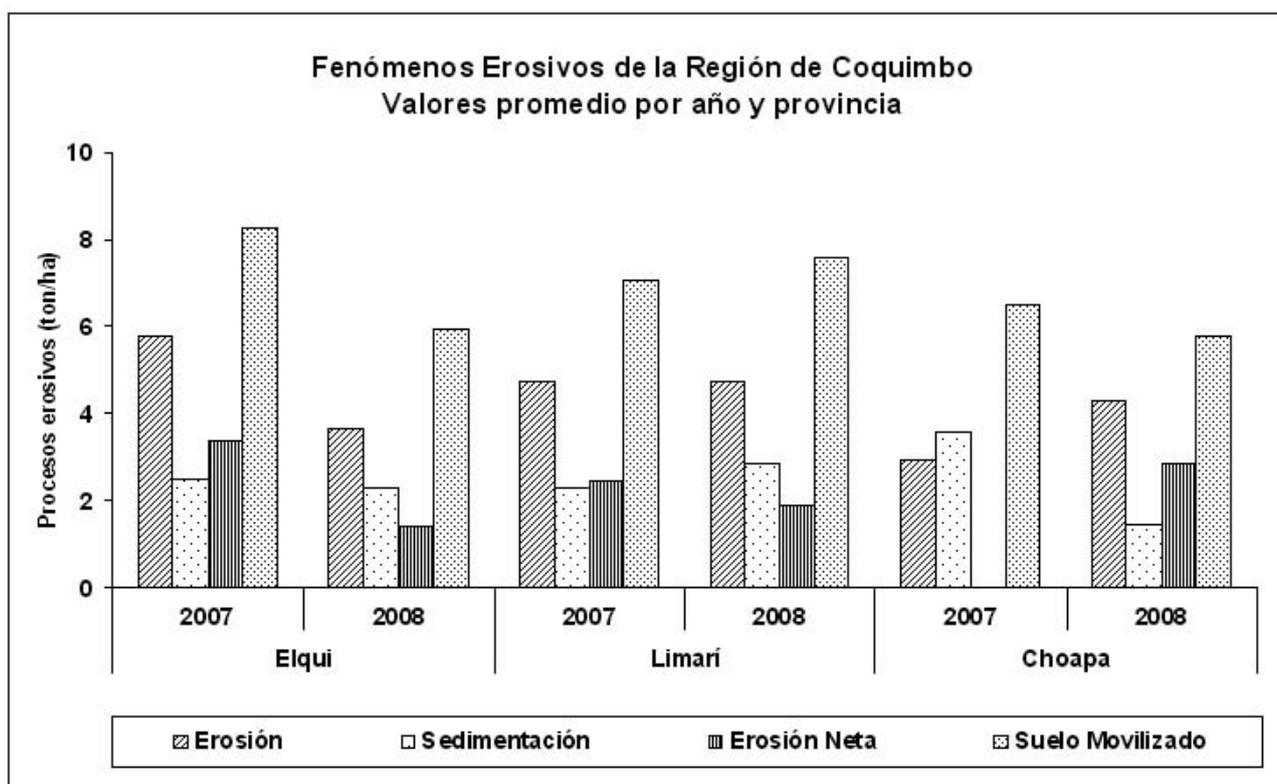


Figura 5. Fenómenos erosivos v/s variables pluviométricas por provincia y año.

ciones positivas de un total de 12 analizadas (75%); en segundo lugar se ubicó la provincia de Limarí con 7 relaciones positivas de un total de 12 (alrededor de un 58,3%). Elqui fue la provincia que presentó una menor cantidad de relaciones positivas (6 de 12), y éstas se encontraron principalmente entre las variables del proceso erosivo y las variables IT e Imax1h.

Este cuadro pretende relacionar las tres variables en análisis en términos de dar a conocer el comportamiento de la erosión, la sedimentación, la erosión neta y el suelo movilizado, como función de la cantidad total de lluvia, de la intensidad media de cada tormenta y de la intensidad máxima en una hora. Así, lo esperable es que estas relaciones sean to-

das positivas, a excepción hecha de la erosión neta, que por tratarse de una diferencia, pudiese presentar un comportamiento algo disímil. Del cuadro se desprende cuáles son las variables que presentan tendencias lineales positivas y esperadas respecto a los procesos estudiados y, permite descartar en primera instancia, la construcción de propuestas matemáticas en función de las variables que no se relacionaron en términos físicos con los procesos erosivos acá estudiados. Esto es particularmente importante en la Provincia de Elqui, especialmente con respecto a la sedimentación y el suelo movilizado. De ahí, se desprende la necesidad de contar con una mayor cantidad de datos que permitan esbozar de mejor forma el comportamiento de las variables y sus relaciones

**Cuadro 7. Relación Gráfica entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo.**

Provincia	Relación	MTpp	IT	Imax1h
Elqui	E	+	+	+
	S	-	-	-
	En	+	+	+
	Sm	-	-	-
Limarí	E	-	-	+
	S	+	+	-
	En	-	-	+
	Sm	+	+	+
Choapa	E	+	+	+
	S	-	-	-
	En	+	+	+
	Sm	+	+	+

Donde E: Erosión, S: Sedimentación, En: Erosión neta y Sm: Suelo movilizado

entre sí. Ello, en primer lugar, porque las relaciones físicas que no son lógicas, pueden derivarse de una toma errada de datos, especialmente las realizadas en el primer periodo, las cuales demandan pasar por procesos de aprendizaje que incluyen mediciones largas y tediosas. En segundo lugar, porque al contar con una mayor información, existe una mayor posibilidad de que los comportamientos físicos de las variables hidrológicas consideradas sean conforme a lo esperado.

## CONCLUSIONES

Se evidenció que los suelos de la Región de Coquimbo, son principalmente francos, con altos porcentajes de arcilla y arena, que varían en función de los sectores analizados. Por su parte, se determinó que los valores promedio de densidad aparente entre sectores y provincias son bastante similares.

- Respecto a la información pluviométrica entregada, en general se advirtió una amplia variabilidad para los valores de monto total de precipitación, intensidad por tormenta e intensidad máxima aproximada para 1 hora, donde resulta frecuente la presencia de valores extremos, algo característico de la zona estudiada.
- Los resultados para los procesos erosivos determinaron que para erosión, los mayores resultados promedio se encontraron en la Provincia de Limarí, seguido por la Provincia de Elqui y finalmente se ubicó la Provincia de Choapa, en donde se observó el menor valor de este proceso.
- Respecto a los resultados de sedimentación, se puede señalar en términos promedio, que este proceso también se manifestó con mayor agresividad en la Provincia de Limarí, seguido por los resultados de la Provincia de Choapa y por último, Elqui.
- Para erosión neta, se presentó un comportamiento decreciente de Norte a Sur. Así, los mayores resultados se encontraron en Elqui, seguido por Limarí y, por último, la Provincia de Choapa.
- En tanto, considerando el total de suelo que se movilizó en terreno, los resultados arrojaron que la mayor cantidad ocurrió en la Provincia de Limarí, en segundo lugar se ubicó Elqui y luego la Provincia de Choapa.
- Por otra parte, al analizar gráficamente los procesos erosivos en función de las variables pluviométricas, se encontraron tendencias lineales positivas y esperadas en la mayoría de las relaciones efectuadas. En otras, sin embargo, se evidenció la presencia de resultados que físicamente resultan poco lógicos, específicamente en la Provincia de Elqui.
- Finalmente, es posible señalar que el método de clavos de erosión resulta adecuado en la cuantificación y análisis de la erosión hídrica superficial, ya que introduce conceptos que permiten establecer un balance entre pérdidas y entradas de material, resultando así en estimaciones más reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benedetti, S.; Pizarro, R. 2006. Restauración hidrológico forestal y oasisificación: herramientas claves para el aumento de productividad de los suelos degradados de la Región de Coquimbo. (en línea). Santiago, Chile. INFOR. Consultado 5 oct. 2007. Disponible en [http://www.infor.cl/areas\\_investigacion/restauracion\\_ecosistemas/restauracion\\_hidrolog\\_forest\\_oasisificacion\\_2006.htm](http://www.infor.cl/areas_investigacion/restauracion_ecosistemas/restauracion_hidrolog_forest_oasisificacion_2006.htm)

CORMA (Corporación Chilena de la Madera, Chile). 2005. Contribución significativa a la sustentabilidad del Proyecto Forestal País para contrarrestar la peor calamidad ambiental de Chile, la erosión de suelo. (en línea). Concepción. Consultado 12 abr. 2008. Disponible en <http://www.chilepaisforestal.cl/Profesores/pdf/Contribuci%F3n.doc>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia) 1994. Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia. Consultado 3 abr. 2008. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.htm>

De Regoyos, M. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid. (en línea). Tesis Doctoral. España. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 466 p. Consultado 5 abr. 2008. Disponible en <http://oa.upm.es/450/01/02200329.pdf>

Pidwirny, M. 2006. Erosion and deposition. In Fundamentals of physical geography. (en línea). Kelowna, Canadá. Consultado 20 oct. 2007. Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>

Pizarro, R.; Cuitiño, H. 2002. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. In Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (2002, Madrid, España). Actas de la I Reunión del Grupo de trabajo de Hidrología Forestal. Madrid, España. p. 165-170.

Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Bravo, C.; Farías, C. 2003a. Manual de conservación de aguas y suelos. Instructivo N° 1 Zanjias de Infiltración. (en línea). Talca, Chile. Consultado 1 abr. 2008. Disponible en [http://eias.atalca.cl/2publicaciones/3manuales/f\\_instructivo\\_zanja.pdf](http://eias.atalca.cl/2publicaciones/3manuales/f_instructivo_zanja.pdf)

**PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE ALMACENAJE EN EMBALSES CUBANOS.  
UN EFECTO DE LA SEDIMENTACIÓN**  
**STORAGE CAPACITY LOST IN CUBAN RESERVOIRS. AN EFFECT OF SEDIMENTATION**

Orlando Laiz Averhoff<sup>1</sup> y Ernesto Flores Valdés

### Resumen

Cuba es la mayor de las islas del mar Caribe, está conformada como parte de un archipiélago con 1600 cayos y pequeñas islas. Durante el último siglo (XX), entre las décadas 60s y 90s, se construyeron 239 presas, administradas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). En la actualidad todos los embalses construidos tienen un promedio de edad equivalente a 30 años, en general ellos se dividen de la forma siguiente: el 33% tienen <20 años, 26% entre 20-30 años y el 41 con 30-100 años. Las aguas de estos embalses se utilizan para diferentes propósitos, de ellos 160 son para riego, 78 se dedican al suministro a la población e industrias y 1 produce energía eléctrica.

Desde el año 2006 la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana (EIPHH) ha preparado una metodología para realizar una serie de estudios de pérdida de capacidad de almacenamiento debido a los procesos de sedimentación, incluyendo el conocimiento del método batimétrico. Se estudiaron varios casos en diferentes provincias cuyo uso fundamental es el suministro a población.

En este estudio se analizaron 5 embalses en tres provincias, Bacuranao y la Zarza (prov. Ciudad de La Habana), Laguna El Pesquero (Munic. Sandino, prov. Pinar del Río), Paso Bonito (prov. Cienfuegos), La Yaya (prov. Guantánamo).

Unido al estudio de pérdida de capacidad de almacenamiento han sido estimados algunos otros datos referidos al proceso de sedimentación tales como: la edad promedio de estos embalses fue de 35 años, la pérdida de capacidad fue 28,6% para Bacuranao con una pérdida anual promedio de 0,817%, la Zarza 18,5 y una pérdida anual promedio de 0,499%. El Pesquero 28,1 con una pérdida anual promedio de 0,721%, Paso Bonito 37,8 y su pérdida anual promedio fue de 1,145% y la Yaya 21,6 y una pérdida anual promedio de 0,654%. La tasa de sedimentación para las cuencas en estos embalses se ha estimado entre 91.660 a 1.030.559 m<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Embalses, sedimentación, capacidad de almacenaje.

### Abstract

Cuba is the largest island in the Caribbean Sea; it is conformed as an archipelago with 1600 keys and small islands. During last century (XX) between sixty (60s) and ninety (90s) decades, government represented by National Institute of Hydraulic Resources has constructed 239 dams. Actually all these reservoirs have a mean life of 28 years old in the country, they are divided as: 33% have been constructed with <20 years old, 26% with 20-30 years old and 41% with >30-100 years old. These reservoirs (239) are using to different purposes, 160 have been used to irrigation (Agriculture), 78 are dedicated to water supply and 1 is used to produce energy.

Since 2006, Hydraulic Design and Research Havana Enterprise belongs to National Institute of Hydraulic Resources have prepared a methodology to estimate the lost of storage capacity in Cuban reservoirs due to sedimentation process, including the knowledge bathymetric method. The study cases were in different provinces with different types of reservoirs, all of these have been used to water supplies to populations.

The study of Cuban reservoirs was conducted in five of them located in three provinces from Cuba. Bacuranao and La Zarza were constructed in Ciudad de La Habana; El Pesquero was constructed in Pinar del Rio; Paso Bonito in Cienfuegos and La Yaya in Guantanamo. All of these reservoirs are used to water supply to the population in different cities.

Together with lost of storage capacity have been estimated too some others data referred to sedimentation process as: the mean age of these reservoirs was 35 years old, the storage capacity lost was Bacuranao 28,6% with an annual lost of 0,817%, La Zarza 18,5% with an annual lost of 0,499%, El Pesquero 28,1% with an annual lost of 0,721%, Paso Bonito 37,8% with an annual lost of 1,145%, La Yaya 21,6% with an annual lost of 0,654%. The sedimentation rates for these watersheds were estimated between 91.660 to 1.030.559 m<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>.

**Key Words:** Reservoir, Sedimentation, Storage Capacity.

### INTRODUCCIÓN

Los embalses desempeñan un papel importante para la sociedad, como control de avenidas, suministro de agua, generación de energía hidroeléctrica,

riego, navegación, recreo, acuicultura, etc. Con el paso del tiempo, en muchos embalses, en especial aquellos construidos en ríos que arrastran grandes volúmenes de sedimentos, se ha observado una cierta reducción de su capacidad de almacenamien-

<sup>1</sup> Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana (EIPHH). Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)  
Teléfono: (537) 8660922; (537) 8642208 Telefax: (537) 8644002 laiz@hidraulicos.cu

to debido a la sedimentación. La UNESCO promovió desde inicios de este siglo la Iniciativa Internacional para la Erosión y la Sedimentación (*ISI*) y en la nuestra región fue constituida la *ISI-LAC*, la cual participa con sus conocimientos en la protección de la cuencas y los embalses.

La sedimentación en embalses es un problema científico (además de ambiental y económico) de gran importancia, pues los embalses pueden definirse como grandes trampas de sedimento que retienen la mayor parte de los materiales transportados por el río. La existencia de batimetrías permite estimar el volumen total de sedimentos depositados en el vaso del embalse e incluso su evolución (CSIC 2003).

La colmatación por sedimentos de un embalse y por ende la pérdida de capacidad de almacenaje de agua, es un proceso complejo que depende de multitud de factores, entre los que se reúnen el tamaño y textura de las partículas de sedimento, las variaciones estacionales que existen en el cauce del río que fluye al embalse, la superficie de la cuenca que vierte al embalse, el tamaño, la forma y el manejo que se haga del mismo y por último como aspecto de gran importancia, la disposición de residuales crudos o con tratamientos incompletos (DGMN 2002), también interviene la cobertura vegetal presente en los suelos de la cuenca hidrográfica tributaria.

En la actualidad los cambios climáticos que se están produciendo en el planeta, con periodos de intensas lluvias y de extremas sequías, que provocan una degradación de los suelos, tanto por la desecación de los suelos como por la erosión, que facilitan tanto la pérdida del espesor de los horizontes del mismo como la transportación de los sedimentos a través de la red de drenaje local hasta los ríos que fluyen hacia los embalses, pueden incrementar los niveles de azolves en estos ecosistemas acuáticos, disminuyendo la capacidad de almacenaje y por tanto su vida útil. Lo cual se traduce en que las precipitaciones son siempre el elemento fundamental que facilita el traslado del sedimento (suelos y otras partículas) hacia los ecosistemas acuáticos lénticos.

La UNESCO (1985) editó una contribución al Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Comisión Internacional sobre la Erosión Continental (J. McManus) y del Centro Internacional de Entrenamiento para el Manejo de los Recursos Hídricos (CEFIGRE: J. Evrard), el mismo puede considerarse como un primer paso a nivel internacional para el conocimiento de la influencia de la sedimentación, su importancia y estudio de este proceso en lagos y embalses.

La acción antrópica continúa influyendo en el nivel de contaminación de las aguas, esta situación cobra mayor importancia tanto en países desarrollados como subdesarrollados. La calidad de las aguas está vinculada además, a las sustancias que se disuelven en ella, al transporte de sedimentos y otros ma-

teriales tóxicos. De esta forma el hombre continúa incrementando y afectando el nivel de eutrofización de las aguas llamadas dulces, aunque en los últimos tiempos estas afectaciones ya se observan en los ambientes costeros.

Las preocupaciones ecológicas y ambientales inciden cada día más en el desarrollo sostenible de las sociedades humanas en todo el mundo, las cuales examinan los efectos para la ecología y el medio ambiente, producto de la erosión de los suelos y la sedimentación en ríos y embalses, así como los posibles beneficios de los sedimentos aprovechados como recurso (Xiaoqing 2003).

Churchill (1948), Brune (1953), Borland & Miller (1958) entre otros, estudiaron los procesos de deposición de sedimentos, para el Buró de Reclamación de Estados Unidos (Bureau of Reclamation 1989), así como, examinaron los métodos, tanto empíricos como numéricos, de estimación de esta deposición a largo plazo en los embalses. Abordaron la gestión de los embalses, haciendo hincapié en la posibilidad de preservar su capacidad para su uso en el futuro y realizaron estudios de casos reales mostrando los problemas relacionados con la sedimentación en los embalses.

En el proceso de acumulación de sedimento se presentan una serie de factores causales para su ocurrencia, destacándose, los siguientes:

- Composición litológica de las formaciones geológicas en el área que ocupa la cuenca hidrográfica;
- Características morfológicas de la cuenca superficial tributaria al embalse, tales como, pendiente, densidad de red fluvial, etc.;
- Uso de la tierra;
- Tipo y extensión de la vegetación natural (cobertura vegetal), que la preserva de la erosión.
- Régimen de precipitaciones que inciden en la región;
- Intervención antrópica en la cuenca hidrográfica;
- Nivel trófico del ecosistema acuático;
- Manejo de las aguas embalsadas.

La exactitud de los datos, lograda a partir de mediciones en tiempo real, es esencial para todos los aspectos de la gestión del conocimiento de la sedimentación y su influencia en el resultado final, referido a la pérdida de capacidad en embalses, empleando la modelación matemática y otros medios informáticos que en la actualidad posibilitan una mayor exactitud en los resultados finales.

La estimación de la pérdida de capacidad de almacenaje en embalses cubanos, es el principal objetivo del estudio que ha continuación presentamos.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El embalse Bacuranao (Fig. 1,a), se localiza en el este de la provincia Ciudad de La Habana, posee una cuenca hidrográfica de 32 km<sup>2</sup>, se describe como de llanura con colinas bajas (con alturas que varían entre 120 a 30 msnm) su construcción finalizó en 1971 y existe una ligera acción antrópica, sus aguas se utilizan para abasto a zonas poblada de la región este de esta provincia. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 17,5 a 39,5 msnm. El río Bacuranao principal afluente posee una extensión equivalente a 62,15 km<sup>2</sup>, con una altura máxima (HMAX) de 150 m, una altura media (HMED) de 49,1 m y su pendiente media es 72%, el río tiene una longitud total de 21,7 km.

La geología de la cuenca está constituida prioritariamente por la Formación Vía Blanca ( $K_2^{cp-m} vb$ ) la cual está compuesta por argilitas, aleurolitas y areniscas de composición grauvacas, de color rojizo verdoso y carmelitoso, con intercalaciones finas de margas (IGP 1994). Edad: Cretácico Superior (Campaniano Superior-Maestrichtiano Inferior). Los suelos son arcillosos de color pardo, en general, del tipo genético húmicos carbonáticos, alcanzando fácilmente una erosión laminar en pendientes suaves. Los poblados principales Peñalver, Arango y el Gandul, el resto esta compuesto por pobladores aislados. Lo principal en esta cuenca es una Procesadora de Rocas (Cantera), con sus molinos de piedra, que se encuentra en uno de los afluentes y por donde se detecta el mayor aporte de sedimentos.

El embalse **La Zarza** (Fig. 1,b), su cierre se efectuó en 1971, se localiza en el municipio Habana del Este, sus aguas se utilizan para el abasto a las poblaciones de Alamar y otros poblados cercanos. Se encuentra enclavado entre las elevaciones 26 a 55 msnm. Este embalse se encuentra en la cuenca del río Guanabo, que a partir de su curso medio superior toma el nombre de arroyo Matadero, el cual se convierte en el afluente principal. El área de la cuenca hidrográfica abarca 31,1 km<sup>2</sup> encontrándose pobremente antropizada. Se clasifica como de llanura con colinas bajas (alturas máximas de 100 msnm).

Su geología está compuesta por varias formaciones (Chirino [ $K_1^a-K_2^{cm} ch$ ]; La Trampa [ $K_2^{cm-t} It$ ]; Peñalver [ $K_2^m pñ$ ]; Vía Blanca [ $K_2^{cp-m} vb$ ]) y el complejo Ultramáfico [ $J_3-K_1 \sigma$ ], (IGP 1994). Las formaciones provienen fundamentalmente del Cretácico y están compuestas por tobas medias y básicas, conglomerados, gravelitas y argilitas, limolitas, calcarenitas con un complejo no diferenciado con predominio de tectonitas: harzburguitas serpentinizadas y menos frecuente ortopiroxenitas e iherzolitas. Suelos arcillosos pardos del tipo húmicos carbonáticos, con una cobertura vegetal en las elevaciones relativamente densa, los cultivos en la zona son escasos al igual que la población la cual es muy dispersa.

La laguna **El Pesquero** (Fig. 1c), localizada en el municipio Sandino, forma parte del complejo del río Cuyaguaje, prov. Pinar del Río, siendo la misma la mayor de un conjunto de lagunas que se encuentran en esta zona hidrográfica, las cuales están conectadas mediante canales a niveles. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 0 a 7,5 msnm. Esta laguna fue cerrada mediante una presa o muro en 1968 y posee una cuenca hidrográfica equivalente a 55,7 km<sup>2</sup>, puede considerarse como un lago aunque ha sufrido alteración producto del cierre. La acción antrópica también es ligera en la cuenca.

La geología está compuesta principalmente por la formación Guane ( $N_2-Q, gne$ ) se caracteriza por una litología del tipo de arenas síliceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos una estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas. Está cubierta discordantemente por sedimentos del Cuaternario ( $Q_{3-4} am$ ) representados por depósitos aluviales-marinos constituidos por arenas finas arcillosas y arcillas arenosas con gravas de cuarzo y pedernales, es en estos últimos donde se enclava la laguna El Pesquero. Sus suelos son cultivados con plantaciones cítrcolas, la población fundamental en la zona son instalaciones educacionales utilizadas para la formación médica de la Escuela Latinoamericana de Medicina (ELAM) y sus aguas se utilizan para abasto a estas escuelas.

En este ecosistema acuático como característica se observó un desarrollo de la vegetación acuática representada por plantas emergentes tales como la *Typha dominguensis*, localizada hacia la zona ribereña de la laguna. En esta zona y hasta los 2 m también se localiza *Limnocharis flava*. A partir de este nivel y en este caso distribuida hasta la mayor profundidad alcanzada (4,8 m), se detectó *Potamogeton sp.*, la cual se enraíza fuertemente en el fondo de la laguna. También se detectó otra planta sumergida que no se enraíza el *Ceratophyllum sp.* de poca abundancia.

El embalse Paso Bonito (Fig. 1,d), localizado en la parte alta del municipio Cumanayagua, provincia Cienfuegos, sus aguas se utilizan para el abasto a las ciudades Cienfuegos y Villa Clara. Este embalse se encuentra en latitudes bajas y fue terminada su construcción en 1974. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 65 a 86,3 msnm. Está conectado al macizo montañoso de Guamuhaya y es considerado un embalse pre-montañoso, la influencia antrópica es ligera pero la geología de su cuenca hidrográfica (65,9 km<sup>2</sup>) es agresiva por el gran aporte de sedimentos en periodos lluviosos.

El principal afluente es el río Hanabanilla con una subcuenca tributaria, el arroyo Navarro. Su geología muy característica compuesta por las rocas más antiguas del archipiélago, del tipo ígneo de composición

mineralógica variadas con edades desde el Jurásico Superior ( $J_3$ ) al Cretácico Inferior ( $K_1$ ), tales como el complejo Mabujina, compuesto por anfibolitas de grano grueso derivado de gabros ( $J_3-K_1$  *agr*;  $J_3-K_1$  *ac*;  $J_3-K_1$  *ae*;  $J_3-K_1$  *hb*). Además, se localizan las formaciones Boquerones ( $J_3$  *bq*) compuesta por mármoles esquistosos y esquistos calcíticos, ricos en grafito y mica blanca; Los Cedros ( $K_1$  *lcd*) compuesta por mármoles foliados; La Herradura ( $J_1-J_3^{ox}$  *hr*) compuesta por esquistos metaterrígenos cuarcíferos y cuarzo; La Sabina ( $K$  *lsb*) compuesta por cuarcitas metasilícicas con intercalaciones de esquistos metapelíticos lustrosos y el grupo San Juan ( $J_3$  *sj*) compuesto por mármoles esquistosos de color negro o gris azulado oscuro, generalmente con grafito disperso o concentrado. Los aportes fundamentales de esta geología se resumen en valores elevados de Fe y Mn muy cercanos a los valores permisibles para el consumo humano.

Los suelos predominantes son loam arcilloso, con una fase poco profunda, sustentado sobre rocas ígneas ultra-básicas de la serie Güaimaro y arcillosos de la serie Najasa con una fase poco profunda y rocosa y por último suelos del tipo escabroso sustentado sobre capas de meteorización granodioríticas

En el embalse **La Yaya** (Fig. 1,e), su cierre se localiza en la provincia Guantánamo. La presa fue concluida en 1975 en el tercio medio superior de la cuenca del río Guantánamo entre la Sierra La Canasta, al noreste, y las estribaciones de la Gran Piedra, al sureste. Este ecosistema acuático se encuentra enclavado entre las elevaciones 38,5 a 85,7 msnm. Describiendo el relieve, llanuras fluviales y terrazas erosivas altas, colinosas, características de una morfología de pre-montañas bajas. El área de la cuenca hidrográfica abarca 555,0 km<sup>2</sup> y se encuentra medianamente antropizada, aunque su geología influye grandemente en los niveles de sedimentos que se aportan.

La geología de la cuenca está compuesta por varias formaciones: Camarones [ $P_2^3$  *cm*], constituida por conglomerados polimícticos de cantos subredondeados y redondeados y areniscas polimícticas de grano grueso; San Luis [ $P_2^2-P_2^3$  *sl*] con areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, calizas bio-detríticas, calizas arenosas y conglomerados polimícticos; Puerto Boniato [ $P_2^2$  *pb*] posee alternancia de calizas órgano-detríticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones de sílice negro-parduzco; y Charco Redondo [ $P_2^2$  *chr*] con presencia de calizas compactas órgano-detríticas, fosilíferas, de color variable, (IGP 1994). La edad de estas rocas se encuentra entre el Eoceno medio y el superior.

Los suelos predominantes son pardos con y sin carbonatos, fuertemente laterizados de edad Cuaternario ( $Q_1-Q_2$ ). La cobertura boscosa corresponde con una vegetación secundaria con árboles entre 8-10 m de altura. Sus aguas se utilizan para riego (cultivos

varios, cítricos y frutales, pastos y forrajes, caña de azúcar y abasto a poblaciones).

## METODOLOGÍA EMPLEADA

Para calcular el volumen de agua así como la pérdida de capacidad y la estimación de los volúmenes de sedimentos, se realizó el análisis geomorfológico en las zonas de inundación de cada embalse, permitiendo de esta forma generar las curvas de elevación originales de cada uno de ellos. Se llevaron a cabo las mediciones de profundidad (batimetría) utilizando una ecosonda de navegación tipo Seafarer International, modelo 5, analógica. En un mapa cartográfico digitalizado en Autocad se diseñaron las mallas y transectos a recorrer en cada embalse, comprobando posteriormente estos en el terreno de trabajo. Se utilizó un GPS para obtener la posición de cada transecto y las mediciones efectuadas en cada uno de ellos, medidos en cada acuatorio. Los datos obtenidos tanto en la determinación geomorfológico como en las mediciones batimétricas fueron analizados utilizando los sistemas informáticos Autocad-2007, Surfer 8,02 y el método de interpolación Kriging con malla uniforme de 1 m, este método también fue empleado por Hansen et al. (2007) en México. Se obtuvieron los modelos digitales y matemáticos, para lo cual fueron utilizados diferentes medios informáticos (Autocad-2007; Surfer-8,02; la familia Microsoft Office-2003; Curva-Expert), que permitieron la descripción de las relaciones fundamentales de volúmenes y áreas de cada nivel del embalse.

## RESULTADOS OBTENIDOS

El INRH controla en la actualidad 239 embalses, de estas presas la mayoría fueron construidas casi en su totalidad durante el siglo **XX**, la mas antigua es la presa Chalons, terminada en 1906, contando con más de 100 años de explotación. Antes del 1959 se construyeron algo más de 10 embalses en todo el territorio nacional, del total de embalses 26 tienen mas de 30 años, 4 con mas de 40 años, 6 con mas de 50 años, 2 con mas de 70 años y 1 con mas de 80 años, las restantes (199) cuentan con menos de 30 pero mas de 25 años de explotación. (Tabla 2; INRH 2005).

En este estudio sobre pérdida de capacidad fueron analizados un grupo de embalses construidos durante las décadas final de los 60s y principio de los 70s los que tienen un promedio de 35 años de construidos, en la tabla a continuación se muestran los años de uso desde su construcción hasta el pasado 2007.

Bacuranao	El Pesquero	Paso Bonito	La Zarza	La Yaya	Pro-medio
36	39	33	36	32	35

Los estudios geomorfológicos fueron necesarios para establecer las áreas de drenaje del vaso de los embalses y de las cuencas hidrográficas de los mismos así como la reconstrucción de la red de drenaje interior de cada acuatorio. En la medida que se obtuvieron los modelos digitales (MD) de los embalses se comprobaron el nivel de precisión de la información geomorfológica elaborada y las curvas de elevación, alcanzando el mismo entre el 95-96%.

Las lecturas de elevación obtenidas durante las mediciones batimétricas se correspondieron con la elevación de aguas normales (NAN) en casi to-

dos excepto en La Zarza, para la que fue necesario hacer además estudios geológicos y geofísicos para completar la información analizada por métodos batimétricos.

Las mediciones batimétricas para la determinación de las profundidades se hicieron por perfil transversal al embalse según Ramírez y de León (1981) fueron utilizadas en los modelos digitales para estimar los cálculos de volúmenes existentes debido al nivel de sedimentación en cada uno de los embalses, de la forma siguiente:

Embalses	Perfiles o Transectos	Lecturas de Profundidad (*)	Km Recorridos en cada Embalse
Bacuranao	52	15-50	15,2
La Zarza	30	50-60	7,620
El Pesquero	15	35-60	15,276
Paso Bonito	42	40-55	7,198
La Yaya	40	55-100	31,867

(\*) = El rango mostrado depende de la distancia recorrida en cada perfil o transecto.

Terminada esta etapa se obtuvieron las ecuaciones que permiten estimar el cálculo del volumen mediante integrales definidas, corroborando los modelos 3D generados a partir de las técnicas geomorfológicas.

Los modelos matemáticos resultantes fueron modelos matemáticos polinomiales de diferentes grados con coeficientes de determinación equivalente entre  $R^2 \Rightarrow 1,0$  y  $0,9$ . Estos modelos se muestran a continuación:

<b>Embalse Bacuranao (Ciudad de La Habana)</b>		
<b>PROYECTO</b>		
$A = -0,1327(h) + 0,4795(h)^2 + 2,2573(h)^3 - 2,9677(h)^4 + 1,5802(h)^5 - 0,2995(h)^6$		
<b>BATIMETRÍA</b>		
$A = -0,0932(h) + 1,4199(h)^2 - 1,321(h)^3 + 0,084(h)^4 + 1,3305(h)^5 - 0,5676(h)^6$		
<b>Coefficiente Determinación</b>	<b>Proyecto <math>\Rightarrow R^2 = 0,9999</math></b>	<b>Batimetría <math>\Rightarrow R^2 = 0,9996</math></b>

<b>Embalse La Zarza (Ciudad de La Habana)</b>		
<b>PROYECTO</b>		
$A = 0,2796(h) - 2,9663(h)^2 + 16,1423(h)^3 - 25,8537(h)^4 + 18,9662(h)^5 - 5,1113(h)^6$		
<b>BATIMETRÍA</b>		
$A = 1,0302(h) - 14,074(h)^2 + 83,028(h)^3 - 176,16(h)^4 + 165,86(h)^5 - 57,025(h)^6$		
<b>Coefficiente Determinación</b>	<b>Proyecto <math>\Rightarrow R^2 = 0,9999</math></b>	<b>Batimetría <math>\Rightarrow R^2 = 1,0</math></b>

<b>Laguna El Pesquero (Pinar del Río)</b>		
<b>PROYECTO</b>		
$A = 2,9807(h) - 3,427(h)^2 + 2,4477(h)^3 - 0,7043(h)^4 + 0,0895(h)^5 - 0,0042(h)^6$		
<b>BATIMETRÍA</b>		
$A = 3,7354(h) - 2,0675(h)^2 + 1,2895(h)^3 - 0,2038(h)^4$		
<b>Coefficiente Determinación</b>	<b>Proyecto <math>\Rightarrow R^2 = 0,9999</math></b>	<b>Batimetría <math>\Rightarrow R^2 = 0,9909</math></b>

<b>Embalse Paso Bonito (Cienfuegos)</b>		
<b>PROYECTO</b>		
$A = -0,2527(h) + 0,7889(h)^2 - 5,0086(h)^3 + 16,7850(h)^4 - 17,9158(h)^5 + 6,3850(h)^6$		
<b>BATIMETRÍA</b>		
$A = 1,019(h) - 4,9111(h)^2 + 9,998(h)^3 + 1,1604(h)^4 - 5,4645(h)^5$		
<b>Coefficiente Determinación</b>	<b>Proyecto <math>\Rightarrow R^2 = 0,99989</math></b>	<b>Batimetría <math>\Rightarrow R^2 = 1,0</math></b>

<b>Embalse La Yaya (Guantánamo)</b>		
<b>PROYECTO</b>		
$A = 2,792(h) - 7,6249(h)^2 + 16,23(h)^3 - 14,201(h)^4 + 8,6787(h)^5 - 2,1791(h)^6$		
<b>BATIMETRÍA</b>		
$A = -0,4707(h) + 0,7697(h)^2 + 3,806(h)^3 - 3,3401(h)^4 + 1,0907(h)^5 - 0,1228(h)^6$		
<b>Coefficiente Determinación</b>	<b>Proyecto <math>\Rightarrow R^2 = 0,9999</math></b>	<b>Batimetría <math>\Rightarrow R^2 = 0,9991</math></b>

En la tabla 3 se muestran las áreas y volúmenes determinadas para el proyecto de cada embalse, y utilizando los modelos matemáticos descritos anteriormente, se calcularon los volúmenes ajustados y los volúmenes de agua actuales, mostrando las diferencias entre los volúmenes estimados por proyecto y los calculados por cada modelo.

Los modelos digitales obtenidos en el proceso geomorfológico fueron posteriormente comparados con los modelos digitales obtenidos del procesamiento de los datos batimétricos hallando de esta forma los volúmenes actuales estimados mediante la integración definida de los modelos de área vs altura. Definiendo además, la elevación del fondo en cada embalse.

Se obtuvieron las nuevas curvas de elevación para cada acuatorio (Fig. 2) y a partir de ellas fueron calculados los modelos matemáticos batimétricos, determinando que en cada caso estudiado había una reducción del área en cada elevación producto de la sedimentación.

Existen muchos métodos para el estudio del proceso de sedimentación en ríos, lagos y embalses, estos se han basado en muchos trabajos realizados principalmente durante el pasado siglo **XX** (U.S.ACE 1989), de estos nombraremos los seis mas relevantes en nuestro modesto parecer **a)- Método del Índice de Avenida, b)- Método del Perfil del Delta, c)- Método del Incremento del Área, d)- Método Empírico de Reducción del Área, e)- Método de Duración de la Elevación del Reservorio y f)- Método de la Eficiencia de la Trampa de Sedimento**. La teoría en la pérdida de capacidad de los embalses producto de los procesos de sedimentación se basa en la consideración de la morfometría del embalse o lago y en la determinación de la tasa de sedimentación anual, consideración que alcanza una mayor exactitud según Borland & Miller (1958) debido a los cambios

de elevación del lecho de los embalses o lagos. En diferentes artículos publicados por el Buró de Reclamación de los Estados Unidos, pioneros entre otros de estos estudios, se describe el desarrollo del Método de Reducción del Área y su modificación (Lara 1962), asumiendo que la curva del elevación-área recientemente generada después de la sedimentación, es paralela a la curva original, la cual es válida para la mayoría de los embalses que se construyen en el mundo, por lo que el método de reducción del área es considerado satisfactorio para determinar la pérdida de capacidad de almacenamiento (Borland & Miller 1958,1960; Lara 1962).

Al respecto, existen muchos cuestionamientos producto de la época en que fue realizado el estudio y muchos investigadores, han comparado sus métodos con los aplicados por esta organización y sus investigadores como fue el caso de Annandale (1984), el cual utilizó el método de Incremento de las áreas y el método descrito por Brune (1953) y, en sus conclusiones describe que el primero puede ser efectivo para algunas regiones del mundo pero en su caso, Sur África, el método que resultó fue el que se basa en los estudios de Brune (1953).

En el caso de la metodología aplicada en Cuba de acuerdo con las condiciones económicas imperantes, decidimos aplicar el método de Reducción del Área, contrastándolo en todo momento con el método Empírico de Reducción del Área realizado por Borland y Miller (1958,1960) y corregido por Lara (1962).

Con base en el método original y las adaptaciones que fueron necesarias realizar, ya que como bien se expresa en USACE (1989), *...los métodos desarrollados no son igualmente buenos para todos los proyectos...*, por lo tanto con esta divisa fue que decidimos desarrollar esta combinación de métodos con el objetivo de lograr los resultados requeridos.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de los embalses Cubanos.

Descripción	Unidad	Bacuranao	El Pesquero	Paso Bonito	La Zarza	La Yaya
Coordenadas N	-	365,20	183,40	256,27	362,50	164,40
Coordenadas E	-	374,10	260,00	587,38	382,10	654,30
Volumen NAM ( * )	hm3	27	43,81	8,63	22,80	210,00
Área NAM	km2	3,8	11,84	1,28	2,82	15,4
Elevación NAM	msnm	38,65	7,00	85,00	52,50	82,70
Volumen NAN (♣)	hm3	15,71	27,61	8,0	17,2	160,00
Área NAN	km2	2,79	9,76	1,23	2,39	13,3
Elevación NAN	msnm	35,37	5,5	84,5	50,4	79,10
Volumen NM (♦)	hm3	0,49	-	1,63	0,69	14,00
Área NM	km2	0,3	-	0,403	0,247	2,11
Elevación NM	msnm	24	-	76,5	35	58,50
Volumen Útil	hm3	15,22	27,61	6,4	16,51	146,00
Elevación Cauce	msnm	17,5	0	65	26	38,50
Elevación Presa	msnm	39,5	7,5	86,3	55,0	85,70
Profundidad Máxima	m	17,87	7	19,5	24,4	40,60
Profundidad Media	m	5,6	2,8	6,5	7,20	12,03
Profundidad Relativa	%	0,93	0,16	1,55	1,40	0,99
Área de la Cuenca	km2	32	55,7	65,9	31,1	555
Longitud de la Costa	km	22,36	70,6	9,56	17,67	-
Año Captación	Año	1971	1968	1974	1971	1975
Río Afluente	-	Bacuranao	Cuyaguajeje	Hanabanilla Navarro	Río Guana-bo	Río Guan-tánamo

(\*) **NAM** → [Elevación de Aguas Máximas]; (♣) **NAN** → [Elevación de Aguas Normales]; (♦) **NM** → [Elevación de Aguas Muertas].

Tabla 2. Resumen nacional de embalses con sus años de explotación (INRH 2005)

Provincias	Embalses	Promedio Años	Cantidad de Embalses					
			>30	>40	>50	>70	>80	>100
Pinar del Río	30	24	9					
La Habana	17	28	5	1				
Ciudad de la Habana	15	28	5					
Matanzas	8	22	2					
Villa Clara	12	35	5	1 Hanabanilla	1		1 Gramal	
Cienfuegos	6	23	1					
Sancti Spiritus	9	27	4					
Ciego de Ávila	6	17	-					

Provincias	Embalses	Promedio Años	Cantidad de Embalses					
			>30	>40	>50	>70	>80	>100
Camagüey	53	30	22	1	4	1 Ponzeu- elo		
Las Tunas	23	24	8					
Holguín	18	23	4		1 Caco- yugüín			
Granma	11	23	3					
Santiago de Cuba	11	32	2			1 Charco Mono		1 Chalons
Guantánamo	6	23	2					
Isla de la Juventud	14	34	11	1				
	239	26	83	4	6	2	1	1

NAM = Nivel de aguas máximas; NAN = Nivel de aguas normales (uso); NM = Nivel muerto; Cauce = Nivel del cauce

**Tabla 3. Elevaciones, volúmenes y áreas proyectadas y batimétricas en embalses Cubanos.**

Embalses	Niveles	Elevación msnm	Proyecto		Batimetria	
			Volumen hm <sup>3</sup>	Área km <sup>2</sup>	Volumen hm <sup>3</sup>	Área km <sup>2</sup>
Bacuranao	NAM	38,65	27	3,8	22,08	3,8
	NAN	35,37	15,71	2,791	11,22	2,791
	NM	24	0,49	0,297	0,14	0,1208
	Cauce	18	0	0	0	0
La Zarza	NAM	52,5	22,8	2,82	19,524	2,817
	NAN	50,4	17,2	2,39	14,022	2,39
	NM	35	0,688	0,247	0,099	0,053
	Cauce	26	0,003	0,008	0	0
El Pesquero	NAM	7	43,8	11,84	35,7	11,84
	NAN	5,5	27,7	9,76	19,91	9,76
	NM	-	-	-	-	-
	Cauce	0	0	0	0	0
Paso Bonito	NAM	85	8,625	1,284	5,596	1,284
	NAN	84,5	8	1,227	4,975	1,227
	NM	76,5	1,63	0,403	0,505	0,149
	Cauce	65	0	0	0	0
La Yaya	NAM	82,7	210	15,4	175,99	15,4
	NAN	79,1	160	13,3	125,49	13,3
	NM	58,5	14	2,11	2,51	1,149
	Cauce	38,5	0	0	0	0

**Tabla 4 Cuenca hidrográfica (km<sup>2</sup>) y Pérdida de capacidad (hm<sup>3</sup>; %) para los volúmenes totales**

Parámetros	Bacuranao	La Zarza	El Pesquero	Paso Bonito	La Yaya
Cuenca hidrográfica (km <sup>2</sup> )	32,0	31,1	55,7	65,9	555,0
Pérdida total de capacidad (hm <sup>3</sup> )	4,49	3,18	7,79	3,02	34,01
Pérdida total de capacidad (%)	28,6	18,5	28,1	37,8	21,6
Pérdida anual de capacidad (%)	0,817	0,499	0,721	1,145	0,654

**Tabla 5. Esguerrimiento medio anual hm<sup>3</sup>, gasto estimado (m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup>), módulos de esguerrimiento líquido (L seg<sup>-1</sup>km<sup>-2</sup>) y sólido (T km<sup>-2</sup>año<sup>-1</sup>), tasa anual de sedimentación (m<sup>3</sup>año<sup>-1</sup>), sólidos en suspensión (g m<sup>-3</sup>) y la vida útil esperada (años).**

Parámetros	Unidades	Bacuranao	La Zarza	El Pesquero	Paso Bonito	La Yaya
Esguerrimiento medio anual	hm <sup>3</sup>	6,85	7,44	12,2	37,6	126,63
Gasto	m <sup>3</sup> seg <sup>-1</sup>	0,208	0,236	0,387	1,192	5,803
Módulo de esguerrimiento líquido	L seg <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>	6,79	7,59	6,95	18,09	7,23
Modelo de esguerrimiento sólido	T km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	18,50	27,60	20,29	147,38	98,47
Tasa anual de sedimentación	m <sup>3</sup> año <sup>-1</sup>	128.293	85.894	199.838	91.660	1.030.559
Sólido en suspensión	g m <sup>-3</sup>	86,4	115,4	258,3	92,7	432,1
Vida útil esperada	años	86-87	99-100	53-54	162-163	120-122

La pérdida de capacidad obtenida en los embalses objeto de estudio se muestran a continuación en la Tabla 4:

Para finalizar el análisis de estos resultados en la Tabla 5 mostramos cálculos de diferentes parámetros a partir de modelos matemáticos empíricos que fueron definidos en periodos de tiempo anteriores por investigadores cubanos (Terterov 1970; Batista 1976; Ramírez y de León 1981; Projorienko et al. 1985).

Los niveles de sedimentos observados por año dependen fundamentalmente de las precipitaciones, la geología y del comportamiento antrópico en la cuenca hidrográfica de los embalses estudiados y estos últimos influyen cuando el uso de los suelos y su cobertura vegetal en la cuenca se encuentra con poco control, situación que al menos en estos acuatorios no presenta afectación crítica. Sin embargo, la geología puede tener una mayor influencia como es el caso del embalse Paso Bonito, el cual además de presentar la mayor pérdida de capacidad total (hm<sup>3</sup>, %) y anual (%) relativo a su capacidad de almacenaje y a la extensión de su cuenca hidrográfica, lo cual requiere de un análisis profundo para una solución de futuro, por situarse estos embalses entre aquellos que permiten el consumo de agua por una población equivalente a 100.000 habitantes.

La tasa anual de sedimentación promedio obtenida en los embalses estudiados (Tabla 4) no es superior a la obtenida para los embalses en Puerto Rico y esta, expresada en % anual es Loco (1,306), Loiza

(0,951); Dos Bocas (0,857); Guayabal (0,545); Toa Vaca (0,233); Matrullas (0,254); El Guineo (0,250); sin embargo, para los embalses Cubanos (0,767). Como se observa éstos poseen una tasa de sedimentación en el rango promedio de estos 7 embalses en Puerto Rico de 0,628% (Soler-López 2007, 2005, 2004, 2003a, 2003b, 2003c, 2001b).

## CONCLUSIONES

1. Los embalses cubanos están perdiendo y han perdido capacidad de almacenaje debido a los procesos de erosión, transporte de sedimentos y sedimentación, algunos de los factores que provocan la misma incluye fundamentalmente: el cambio climático con una magnitud y frecuencia inusual de las precipitaciones, sobre todo aquellas generadas por las tormentas tropicales y los huracanes, el uso de la tierra, la cobertura vegetal y la protección de las cuencas hidrográficas.
2. La pérdida de capacidad medida en los embalses estudiados, permite estimar un promedio anual del 0,767% (promedio=35-años), lo cual puede compararse con otros países del área caribeña, como es el caso de Puerto Rico 0,742% (promedio=53-años) y República Dominicana 1,416% (promedio=16-años). Aunque Cuba ha sido afectada por al menos 23 fenómenos tropicales entre 1980-2008.

3. Este estudio puede convertirse en un llamado de atención para las autoridades competentes cubanas, ya que es necesario continuar aplicando medidas para la protección de las cuencas así como establecer un manejo más eficiente de los embalses con el objetivo de disminuir las tasas de sedimentación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Annandale, G.W. 1984. Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoirs. Challenges in African Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Harare Symposium, July 1984). IAHS Publ. No. 144.
- Batista, J.L. 1976. Escurrimiento Sólido. *Voluntad Hidráulica* Año XIII 37/1976: 62-66
- Borland, W.M. and Miller, C.R. 1958. Distribution of sediment in large reservoirs, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 84(2).
- Borland, W.M. and C.R. Miller, 1960: Distribution of sediment in large reservoirs. *Transactions, ASCE*, Volume 125.
- Brune, G.M., 1953: Trap efficiency of reservoirs. *Transactions, American Geophysical Union*, Volume 34, Number 3:408-415.
- Bureau of Reclamation, 1989: Design of Small Dams. Third edition, Bureau of Reclamation, United States.
- Churchill, M. A. 1948. Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data," by L. C. Gottschalk, pp 139-140, *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Denver, Colo.
- CSIC 2003. Los efectos del Cambio Global sobre la dinámica de procesos hidrológicos, y geomorfológicos. *Sedimentación en embalses*. <http://www.ipe.csic.es/>
- DGMN 2002. Plan Andaluz de Control de la Desertificación. 19 pp.
- Hansen, A.M., M. van Afferden y F. Torres-Bejarano. 2007. Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII (4): 87-102.
- Lara, J. M. 1962. Revision of the Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs. US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Projorienko, S.I., Veliz Cañolo, J. y Pérez Monteagudo, O. 1985. Estudio del escurrimiento de sólidos en suspensión y métodos de cálculo para los ríos de Cuba. *Voluntad Hidráulica* Año XXII 67/1985:10-23.
- Ramirez, J. y de León, G. 1981. Estudios Batimétricos en los embalses. Recomendaciones. *Inst. Hidro-economía, MICONS*. 24 pp.
- Soler-López, L. 2001b. Sedimentation Survey of Lago Loco, Puerto Rico, March-2000  
*Water Resources Investigations Report 2001-4187. USGS, EUA*. 26 pp.
- Soler-López, L. 2003a. Sedimentation Survey of Lago El Guineo, Puerto Rico, October-2001 *Water Resources Investigations Report 2003-4093. USGS, EUA*. 28 pp.
- Soler-López, L. 2003b. Sedimentation Survey of Lago de Matrullas, Puerto Rico, December-2001 *Water Resources Investigations Report 2003-4102. USGS, EUA*. 31 pp.
- Soler-López, L. 2003c. Sedimentation History of Lago Guayabal, Puerto Rico, 1913-2001 *Water Resources Investigations Report 2003-4198. USGS, EUA*. 35 pp.
- Soler-López, L. 2004. Sedimentation Survey of Lago Toa Vaca, Puerto Rico, June-July 2002. *Scientific Investigations Report 2004-5035. USGS, EUA*. 39 pp.
- Soler-López, L. 2005. Sedimentation Survey of Lago Loiza, Puerto Rico, January 2004 *Water Resources Investigations Report 2005-5239. USGS, EUA*. 34 pp.
- Soler-López, L. 2007. Sedimentation History of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, 1942-2005 *Scientific Investigations Report 2007-5053. USGS, EUA*. 44 pp.
- Terterov, A. 1970. Sedimentos en suspensión de los ríos de Cuba. (mecanografiado) Grupo Hidráulico Nacional.
- UNESCO 1985. Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs. A contribution to the International Hydrological Programme, IHP-II Project A. 2.6.1 Panel Stevan Bruk, Rapporteur. Yugoslav National Committee for the Hydrological Programme. Department of the Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources. 224 pp.
- (U.S.ACE) U.S. Army Corps of Engineers. 1989. Engineering and Design. sedimentation investigations of rivers and reservoirs. *Engineer Manual 1110-2-4000*. 177 pp.
- Xiaoqing, Yang. 2003. Manual on Sediment Management and Measurement. World Meteorological Organization (WMO-948) Operational Hydrology Report No. 47. Secretariat of the World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland.

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO EN RÍOS EN GEOMETRÍA COMPLEJA CON TRANSPORTE DE SEDIMENTO Y CONTAMINANTES BASADO EN LAS ECUACIONES DE AGUAS SOMERAS. NUMERICAL SIMULATION OF RIVER FLOWS IN COMPLEX GEOMETRY BASED IN THE SHALLOW WATER EQUATIONS WITH SEDIMENT AND POLLUTANTS TRANSPORT

Martín Salinas-Vázquez<sup>1</sup>, William Vicente, Hugo Mendoza, Jesús Gracia, Eliseo Carrizosa, Rafael Val, Javier Osnaya, Arturo Palacio y Alejandro Rodríguez

### Resumen

En este trabajo se presenta un modelo numérico basado en la resolución de las ecuaciones de aguas someras que permite el estudio de flujos en geometrías complejas. Se utiliza un esquema de discretización de la familia MacCormack, el cual ha mostrado su eficiencia en la resolución de las ecuaciones de Euler para flujos compresibles. Esta familia de esquemas tiene la ventaja de permitir el estudio de discontinuidades en la superficie libre de flujo guardando la conservación de las variables. Debido a que pertenece a un grupo amplio de esquemas, es posible el incremento del orden del mismo con un mínimo de cambios en el código base. Las ecuaciones de Aguas Someras se resuelven en coordenadas curvilíneas generalizadas, con la posibilidad de integrar un estudio integral del transporte de sedimento y contaminantes. A partir del método de fronteras inmersas, es posible estudiar flujos con cuerpos sólidos internos e inundaciones de zonas secas. En el presente trabajo se presentan resultados obtenidos en diferentes ríos del estado mexicano de Tabasco.

**Palabras clave:** Aguas someras, simulación numérica, ríos, MacCormack, flujo.

### Abstract

A numerical model based on shallow water equations which allows the analysis of complex geometries flows is here presented. To promote the efficient solution of Euler Equations for compressible flows, a MacCormack discretization scheme is applied, the main reason being the advantage that these kind of schemes offer to study the free surface flow discontinuities keeping the variable conservation. Also, the increase in the order of the scheme with a minimum of changes in the base code is another advantage which becomes possible due to the belonging of this particular scheme to a wider family of schemes. The shallow water equations are solved using generalized curvilinear coordinates, with the possibility to achieve an integral study which considers both the transport of sediment and pollutants. The analysis of flows taking into account internal solid objects and floods of dry zones is feasible due to the Immerse Interface Method. Results about river flows in the Mexican State of Tabasco are here presented and analyzed.

**Key words:** Shallow water, CFD, rivers, MacCormack, flow.

### INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de aguas someras se obtienen a partir de una serie de simplificaciones en las ecuaciones de Navier-Stokes (Wu, 2007). Estas ecuaciones describen el comportamiento de un fluido en zonas poco profundas, ya sea en costas o en cuerpos de agua (e.g. ríos y lagos). A pesar de las hipótesis empleadas, los resultados obtenidos de la solución de estas ecuaciones, han mostrado una buena aproximación con los datos experimental. Así también, estas ecuaciones siguen sin tener solución analítica, por lo que la solución numérica es la única alternativa viable.

Debido a la similitud matemática de las ecuaciones de aguas someras (EAS) y las ecuaciones de Euler, el uso de esquemas numéricos para resolver flujos compresibles se ha generalizado en la resolución de las EAS. Por otro lado, el uso más frecuente de los elementos y volúmenes finitos ha permitido el estu-

dio de flujos en geometrías más complejas (Hervout, 2007)

A pesar del fácil uso de geometrías complejas, el consumo de tiempo máquina, así como de memoria puede resultar grandes, e incluyendo problemas de convergencia. Además, no todos los esquemas numéricos que resuelven las EAS son capaces de mantener la conservación de las variables resultas. Esto se hace más crítico cuando se pretenden estudiar choques (shocks) en superficies libres. Estos choques son discontinuidades en las variables del flujo, producidas por la misma dinámica del flujo (números de Froude mayores a 1) o problemas muy específicos como la inundación de zonas secas, así como el rompimiento de una presa.

En flujos compresibles se ha comprobado que existen dos tipos de esquemas, que guardando la conservación de las variables, permiten el estudio de los choques (en este caso choques sónicos). Los prime-

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México Ciudad Universitaria 04510, México D.F., México  
msalinasv@ii.unam.mx,

ros resuelven el problema de Riemann en la interface del choque y los segundos son una combinación de métodos de diferente orden que permiten un cierto alisamiento de la discontinuidad (Laney, 1998)

La familia de esquemas del tipo MacCormack está en la segunda clasificación. En general son esquemas con dos sub-espacios de tiempo, corrector-predictor, que le permiten un segundo orden en el tiempo. El esquema base, creado por MacCormack (Fletcher, 1988) es de orden dos en tiempo y espacio. A pesar de que se ha observado que es capaz de manejar choques sónicos (números de Mach cerca de la unidad), comúnmente se le agrega un paso TVD (Total variation diminishing) que le permite el estudio de flujos con choques más intensos (Toro, 2001)

Otras ventajas de esta familia de esquemas, son las siguientes: sencillos de codificar; permiten el uso de geometrías curvilíneas, son relativamente poco consumidores tanto de tiempo como de memoria y es una familia muy amplia de esquemas. Esta última cualidad es de gran importancia, pues permite el incremento en el orden del esquema con pocas modificaciones en el código base. Así se puede pasar a órdenes de hasta 4 o 6 en tiempo, más de 8 en espacio y sobre todo permite la utilización de esquemas compactos que son mucho más eficientes que las tradicionales diferencias finitas. Por lo anterior el presente trabajo está basado en el esquema base de MacCormack (orden dos en espacio y tiempo) con las modificaciones propuestas por Liang et al. (Liang et al., 2007).

Para representar la geometría compleja, las ecuaciones de aguas someras son resueltas en coordenadas curvilíneas junto con un método de fronteras inmersas. Igualmente, se plantea la posibilidad de integrar un modelo de transporte de sedimentos y contaminantes.

### ECUACIONES DE GOBIERNO

Según Liang et al. (Liang et al., 2007), las ecuaciones de aguas someras se pueden escribir de la siguiente

$$\partial\eta\partial t + \partial q_x\partial x + \partial q_y\partial y = 0 \quad (1)$$

$$\partial q_x\partial t + \partial\beta q_x^2 H + g\eta^2 + g\eta \partial x + \partial\beta q_x q_y H \partial y = -g\eta\partial h\partial x - gq_x q_x^2 + q_y^2 H^2 C^2 + T.T\_X \quad (2)$$

$$\partial q_y\partial t + \partial\beta q_x q_y H \partial x + \partial\beta q_y^2 H + g\eta^2 + g\eta \partial y = -g\eta\partial h\partial y - gq_y q_x^2 + q_y^2 H^2 C^2 + T.T\_Y \quad (3)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $\eta$  es la elevación de la superficie libre sobre un valor de referencia,  $q_x$  y  $q_y$  son los gastos por unidad de ancho en cada dirección,  $\beta$  es el factor de corrección para flujos no uniformes en la vertical ( $\beta=1.016$ ),  $H$  es la altura de la superficie libre total ( $H=h+\eta$ , ver Figura 1),  $g$  la aceleración de la gravedad, y  $C$  es el coeficiente de Chezy.

El último término de la derecha en ambas ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento (ecuaciones (2) y (3)) son los términos turbulentos viscosos, los cuales son dados por (Wu, 2007):

$$T.T\_Y = \partial\partial x^2 v_t H \partial u \partial x + \partial\partial y v_t H \partial u \partial y + \partial v \partial x \quad (4)$$

$$T.T\_X = \partial\partial y^2 v_t H \partial v \partial y + \partial\partial x v_t H \partial u \partial y + \partial v \partial x \quad (5)$$

donde  $v_t$  es la viscosidad turbulenta, obtenida a partir del modelo  $k-\epsilon$  para flujos en aguas someras,  $u$  y  $v$  son las velocidades en las direcciones  $x$  y  $y$ , obtenidas como:  $q_x/H$  y  $q_y/H$  respectivamente.

El sedimento suspendido se modela a partir de la ecuación de conservación para un escalar pasivo (Wu, 2007). Por el momento el peso del sedimento no afecta el comportamiento del flujo (Cao & Pender, 2004):

$$\partial H c \partial t + \partial q_x c \partial x + \partial q_y c \partial y = \partial\partial x D_t H \partial c \partial x + \partial\partial y D_t H \partial c \partial y + S_c \quad (6)$$

donde  $c$  es la concentración de sedimento suspendido en el agua y  $D_t$  es el coeficiente de difusión turbulenta, relacionado a partir de un número de Schmith con la viscosidad turbulenta. El término  $S_c$ , comprende los términos fuente en la interface entre la zona del

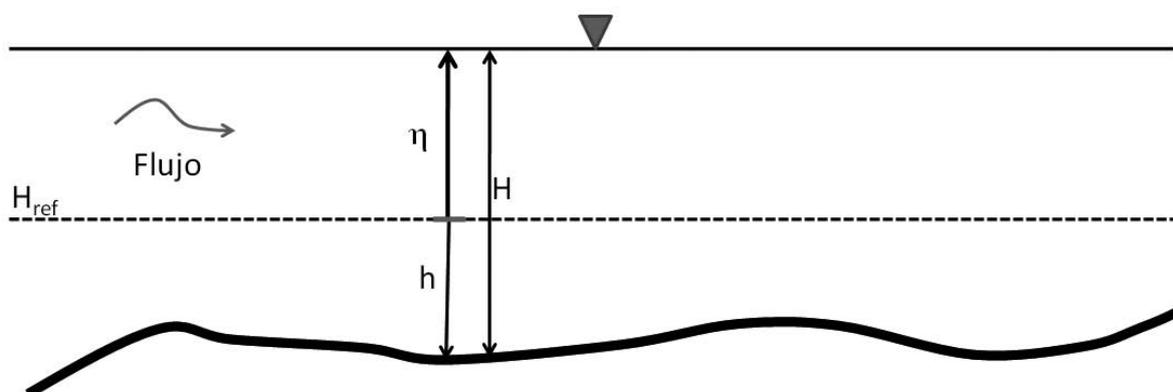


Figura 1. Configuración del flujo en aguas someras.

lecho del río y la del flujo de agua en movimiento (sedimentación/erosión). Ambos términos serán obtenidos a partir de ecuaciones empíricas (Chanson, 2004; Van Rijn, 1993). A partir de esta consideración, la altura del piso cambiará de acuerdo a:

$$1-p\partial h\partial t=-Sc \quad (7)$$

donde  $p$  es la porosidad del sedimento. De igual forma, el transporte de sedimento por arrastre de fondo ( $q_b$ ), puede ser obtenido a partir de alguna fórmula empírica para cada punto de la malla computacional (Chanson, 2004; Van Rijn, 1993). En este trabajo se ha utilizado la ecuación de Meyer-Peter & Muller, dada por:

$$q_b = G-1gd^3 = \text{sgn}(u) \tau^* \cdot 0.047^{3/2} \quad (8)$$

donde  $G$  es la relación entre las densidades del sedimento y del agua,  $d$  es el tamaño medio de los granos del sedimento y  $\tau^*$  el esfuerzo cortante en el piso. La función  $\text{sgn}(u)$  proporciona la dirección y la magnitud relativa de cada componente de un vector. A partir de conocer los flujos de sedimento por arrastre de piso por unidad de ancho en cada celda y en cada dirección, se tiene que (Cao, 2004):

$$1-p\partial h\partial t + \partial q_b x \partial x + \partial q_b y \partial y = 0 \quad (9)$$

donde  $q_{bx}$  se obtiene con  $\text{sgn}(u)$  y  $q_{by}$  con  $\text{sgn}(v)$ . Las ecuaciones (7) y (9) se pueden combinar para generar una sola.

El transporte de contaminantes, igualmente se puede realizar a partir de una ecuación de transporte de un escalar pasivo, con sus adecuados coeficientes de difusión y términos fuente (Wu, 2007).

## MÉTODO DE SOLUCIÓN

### Esquema numérico

Se basa en el esquema explícito MacCormack de orden 2 en tiempo y espacio. Este método consiste en dos sub-pasos de tiempo (esquema Runge-Kutta de segundo orden), predictor-corrector, donde la dirección de las derivadas de primer orden se cambia en cada uno de los sub-pasos. Esto genera un esquema global de segundo orden en el espacio (Liang et al., 2007).

En forma matricial las ecuaciones (1) a (3), se pueden representar de la siguiente forma:

$$\partial U \partial t + \partial F \partial x + \partial G \partial y = S \quad (10)$$

donde  $U$  es el vector:

$$U = (\eta, q_x, q_y)^T \quad (11)$$

De la ecuación (10)  $F$  y  $G$  son los flujos en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente:

$$F = q_x \beta q_x 2H + g \eta 22 + g h \eta \beta q_x q_y H; \\ G = q_y \beta q_y 2H + g \eta 22 + g h \eta \quad (12)$$

donde  $S$  es el término fuente que engloba todos los términos restantes de las ecuaciones (1) a (3). El esquema en una dimensión queda como:

$$U_{i+1/2} = U_i - \Delta t \Delta x F_{i+1} - F_i - 1n + \Delta t S_i \\ U_{i+1} = 12(U_i + U_{i+1/2}) - \Delta t 2 \Delta x F_{i+1} + 1n + 1/2 - \\ F_{i+1/2} + \Delta t 2 S_{i+1/2} + TVD_i \quad (13)$$

Este esquema es rápidamente escalable, con un mínimo de cambios en el código base, a esquemas de la familia MacCormack de orden mayor, como el esquema de orden 2 en tiempo y 4 en espacio (Gottlieb & Turkel, 1976) o los esquemas semi-compactos (Kennedy & Carpenter, 1997).

Para flujos con pendiente suave o números de Froude pequeños, este esquema es más que suficiente para modelar el flujo. Sin embargo, si el flujo presenta cambios de sección transversal abruptos, zonas secas, cambios importantes de la altura de la superficie libre o número de Froude mayores a uno, es necesario el uso del término TVD, ecuación (13). El término TVD usado, utiliza 5 puntos centrados y sólo es usado en el segundo sub-paso, corrector (Liang et al., 2007). Este término tiene la siguiente forma:

$$TVD_i = Gri + Gri + 1 - \Delta U_i + 1/2n - Gri - 1 + Gri - \Delta U_i - 1/2n \quad (14)$$

$$\Delta U_i + 1/2n = U_{i+1} - U_i; \\ \Delta U_i - 1/2n = U_i - U_{i-1} \quad (15)$$

$$r_i = \Delta \eta_i - 12n \cdot \Delta \eta_i + 12n + \Delta q_x i - 12n \cdot \Delta q_x i + 12n + \Delta q_y i - 12n \cdot \Delta q_y i + 12n \Delta \eta_i + 12n \cdot \Delta \eta_i + 12n + \Delta q_x i + 12n \cdot \Delta q_x i + 12n + \Delta q_y i + 12n \cdot \Delta q_y i + 12n \quad (16)$$

$$r_i = \Delta \eta_i - 12n \cdot \Delta \eta_i + 12n + \Delta q_x i - 12n \cdot \Delta q_x i + 12n + \Delta q_y i - 12n \cdot \Delta q_y i + 12n \Delta \eta_i - 12n \cdot \Delta \eta_i - 12n + \Delta q_x i - 12n \cdot \Delta q_x i - 12n + \Delta q_y i - 12n \cdot \Delta q_y i - 12n \quad (17)$$

La función  $G()$  de la ecuación (14) está dada por:

$$G_x = 0.5 C \partial x \quad (18)$$

$$\partial x = \max(0, \min(2x, 1)) \quad (19)$$

$$C = Cr - 1, \quad Cr \leq 0.5; \quad C = 0.25, \quad Cr > 0.5 \quad (20)$$

En la ecuación (20)  $Cr$  es el número de Courant local:

$$Cr = u + gH \Delta t \Delta x \quad (21)$$

### Coordenada curvilíneas generalizadas

Con el fin de permitir el uso de geometrías complejas, se utilizan coordenadas curvilíneas generalizadas. Esto significa que las regiones con celdas deformadas en el espacio físico son mapeadas a un espacio cúbico con celdas regulares en donde las EAS son resueltas numéricamente (Figura 2). Los resultados son devueltos al espacio físico a través de un mapeo inverso. La función de mapeo es una matriz Jacobiana de transformación. Los términos de esta matriz se obtienen con los mismos esquemas usados para las derivadas del esquema MacCormack (Fletcher, 1988).

### Zona seca y modelación de obstáculos.

Si bien el presente modelo permite la utilización de coordenadas curvilíneas generalizadas, y por lo tanto geometrías complejas. En algunas ocasiones

se pueden presentar zonas donde la distorsión de la malla produce la formación de inestabilidades. Igualmente se pueden presentar obstrucciones dentro del flujo (i.e. islas y pilotes) o se quiera estudiar la inundación de zonas secas. Para tal motivo se ha hecho una extrapolación de un método llamado "fronteras inmersas" (de la Lama, 2009), utilizado en

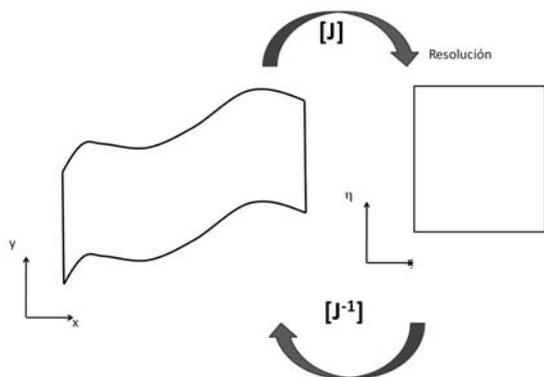


Figura 2. Coordenadas curvilíneas generalizadas.

la dinámica de gases. Este método, permite diferenciar una zona "húmeda", donde el agua fluye, de una zona "seca", donde no hay agua. La diferenciación se obtiene a partir de una bandera que vale 1 para zonas húmedas y 0 para zonas secas. Cuando una celda tiene valor de bandera 0, las ecuaciones no se resuelven en ésta y se impide el flujo de agua de una zona húmeda a una zona seca.

En el caso de obstrucciones como pilotes o islas, que permanecen en todo el transcurso de la simulación, ningún cambio en la distribución de las banderas se tiene que realizar. Sin embargo, en el caso de inundaciones de zonas secas o del secado de zonas húmedas, la distribución de las banderas debe de ser dinámica y modificarse continuamente.

En estos casos, la zona seca se diferencia de una húmeda si la elevación de la superficie libre es menor (o mayor) a un altura de referencia:

$$H_i \geq H_{crit}; \text{ Zona Húmeda} \quad H_i < H_{crit}; \text{ Zona Seca} \quad (22)$$

Cuando la elevación de la superficie libre del agua en una celda,  $H_i$ , es inferior a  $H_{crit}$ , automáticamente la bandera toma el valor de cero. Cuando una celda adyacente a otra con bandera cero tenga dos veces el valor de  $H_{crit}$ , ambas celdas toman el valor de  $H_{crit}$  y la bandera igual a uno. El procedimiento anterior asegura la conservación de masa.

Una forma de evitar el comportamiento escalonado del flujo debido a la obstrucción de ciertas celdas, ver Figura 3, es a partir de la utilización de interpolaciones de diferentes órdenes que evitan este comportamiento (de la Lama, 2009).

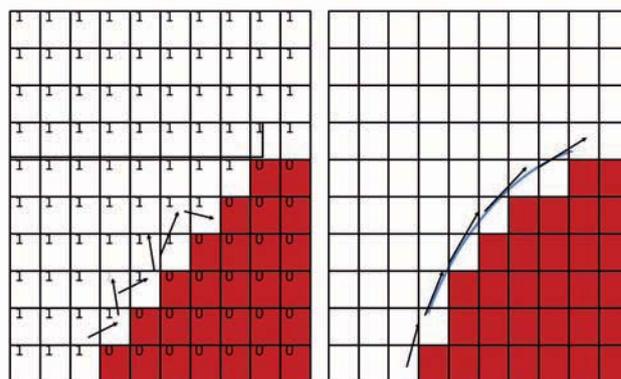


Figura 3. Fronteras inmersas y la formación de un comportamiento escalonado (izquierda). Utilización de interpolaciones (derecha).

### Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se basan en convertir un problema de Riemann bi-dimensional en un problema de Riemann uni-dimensional equivalente en la frontera. Esto se obtiene a partir de la teoría de bi-características en las fronteras al desarrollar un promediado lineal a lo largo de la interface. A partir de aquí se permite construir condiciones de frontera subcríticas y supercríticas. Para el presente trabajo se consideró una entrada subcrítica, en la cual se fijan los gastos en ambas direcciones, teniendo que calcular la altura de la superficie libre. Igualmente se consideró una salida subcrítica, donde se fija la altura de la superficie libre o el gasto longitudinal, calculando a partir de las relaciones de condiciones de frontera el resto de las variables (Guinot, 2003).

### Planteamiento de problema

Como parte del estudio hídrico del estado de Tabasco, se han desarrollado diversos estudios tanto experimentales como numéricos. Una parte fundamental en el estudio, debido a su complejidad, es el desarrollo de herramientas numéricas que permitan un estudio detallado del flujo del río. Diferentes herramientas se han desarrollado, entre las cuales la presente.

Cerca de la capital del estado de Tabasco, Villahermosa, el río Mezcalapa se bifurca en dos ramas, río Samaria y Carrizal. Cuando el gasto en el río Carrizal supera el crítico, produce inundaciones catastróficas en la ciudad. Con el fin de controlar el gasto de las dos ramas, se han desarrollado diferentes proyectos basados en la creación de obras de control. Sin embargo, es de suma importancia el estudio del flujo, no sólo cerca de estas obras, sino tanto aguas arriba como aguas abajo (Jiménez et al., 2007). En la Figura 4 se observa una fotografía satelital de la zona a estudiar, junto a la batimetría del río.

## DETALLES NUMÉRICOS

El dominio computacional tiene un tamaño de  $L_y=6.1\text{km}$  de ancho (dirección  $y$ ) por  $L_x=6.8\text{km}$  (dirección  $x$ ) de largo y comprende la zona de la bifurcación. El dominio está constituido por 500 nodos

en la dirección  $x$  y 750 nodos en la dirección  $y$ . El tamaño de las celdas en todo el dominio computacional es homogéneo.

A partir de la topografía y batimetría del lugar, la forma del río se fue aproximando a polinomios de orden

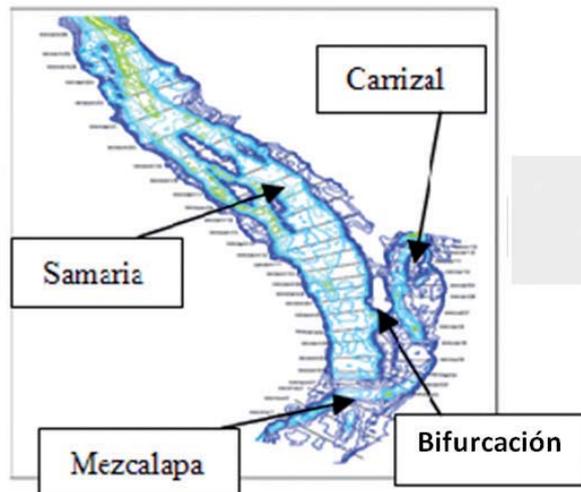


Figura 4. Zona de estudio.

superior, con el fin de ir dibujándola sobre la malla. Con este procedimiento se pudieron aproximar muy bien la geometría real y computacional del río. La figura 5 muestra el procedimiento seguido.

El cálculo es inicializado con una velocidad longitudinal promedio, obtenida en función del gasto,  $u_0=0.9496\text{ m/s}$  y  $v_0=0.0\text{ m/s}$ , y la altura de la superficie libre promedios. El flujo entra por la parte izquierda del dominio con un gasto conocido de  $3300\text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que sale por la parte izquierda con alturas de la superficie libre conocida de  $H=6.0\text{ m}$ .

El consumo de memoria RAM para el presente caso es de  $\approx 400\text{MB}$  y el tiempo de cálculo es de  $\approx 9.6$  horas para cada hora de simulación real del río.

## RESULTADOS NUMÉRICOS.

Diferentes pruebas de flujos sencillos en canales con topes, contracciones y obstrucciones, así como el del rompimiento de presas, transporte y reflexión de ondas e inundaciones se han realizado para validar el buen funcionamiento del código. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos para la geometría antes descrita de la bifurcación del río Mezcalapa.

En la Figura 6 se muestran los contornos de las banderas para diferenciar la zona mojada de la zona seca. De esta figura se observa que el método descrito anteriormente trabaja correctamente, pues los valores de bandera rojos ( $=1$ ) se encuentran todos en la zona alta de la superficie, lo que indica que solo en estos nodos el agua fluye. Fuera de esta zona (bandera=0, zona azul), la resolución de las ecuaciones se congela no permitiendo su evolución. La altura de la superficie en la dirección  $z$  es proporci-

onal con la altura de la superficie libre del agua (este valor fue multiplicado por un factor de  $1000.0$ ). A partir de este escalamiento, se pueden observar las ondas en la superficie libre, creadas por la topografía del lugar. Cabe destacar la reflexión de estas ondas en la bifurcación, así como en ambas márgenes del río Samaria. La Figura 6b, muestra los vectores de velocidad en la entrada del dominio computacional, hasta la bifurcación. De esta figura, cabe destacar, que no existe flujo de agua de la zona mojada a la seca.

En la figura 7 se muestra el contorno de la magnitud de la velocidad ( $u=u^2+v^2$ ), donde se observa las zonas de mayor velocidad, principalmente en las zonas de estrangulamiento y en la salida del río Carrizal, donde su ancho se reduce drásticamente. Dos zonas interesantes estas remarcadas en esta figura, la primera donde el ancho del río Mezcala se reduce, aumentando la velocidad del flujo, este aumento produce una zona de recirculación en el margen derecha del río, en un ensanchamiento abrupto. Estas zonas de alta/baja velocidad son de suma importancia, pues son zonas propensas a tener una evolución importante del lecho, ya sea por erosión o deposición.

En la zona de la bifurcación se ha comprobado que el gasto que se va por la rama del río carrizal es de  $39.8\%$ , valor alto, pues experimentalmente se ha visto que este valor es de  $33\%$ . Esto debido a que en esta simulación no se tomaron en cuenta las islas dentro del río, que permite el libre tránsito hacia los ríos, cosa que no sucede por la parcial obstrucción de la entrada del río Carrizal (ver Figura 4). En un estudio tridimensional del flujo (Sanchez et al., 2009), se observó que la cantidad de agua que fluía por el río

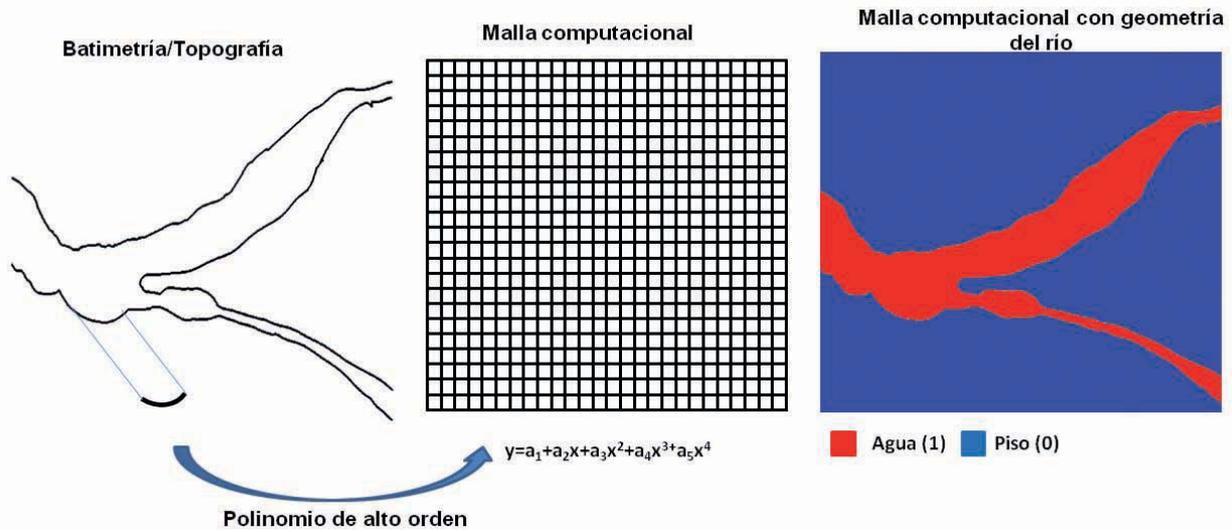


Figura 5. Generación de la malla computacional y grabado de la forma del río a partir de transformar la batimetría en polinomios de alto orden.

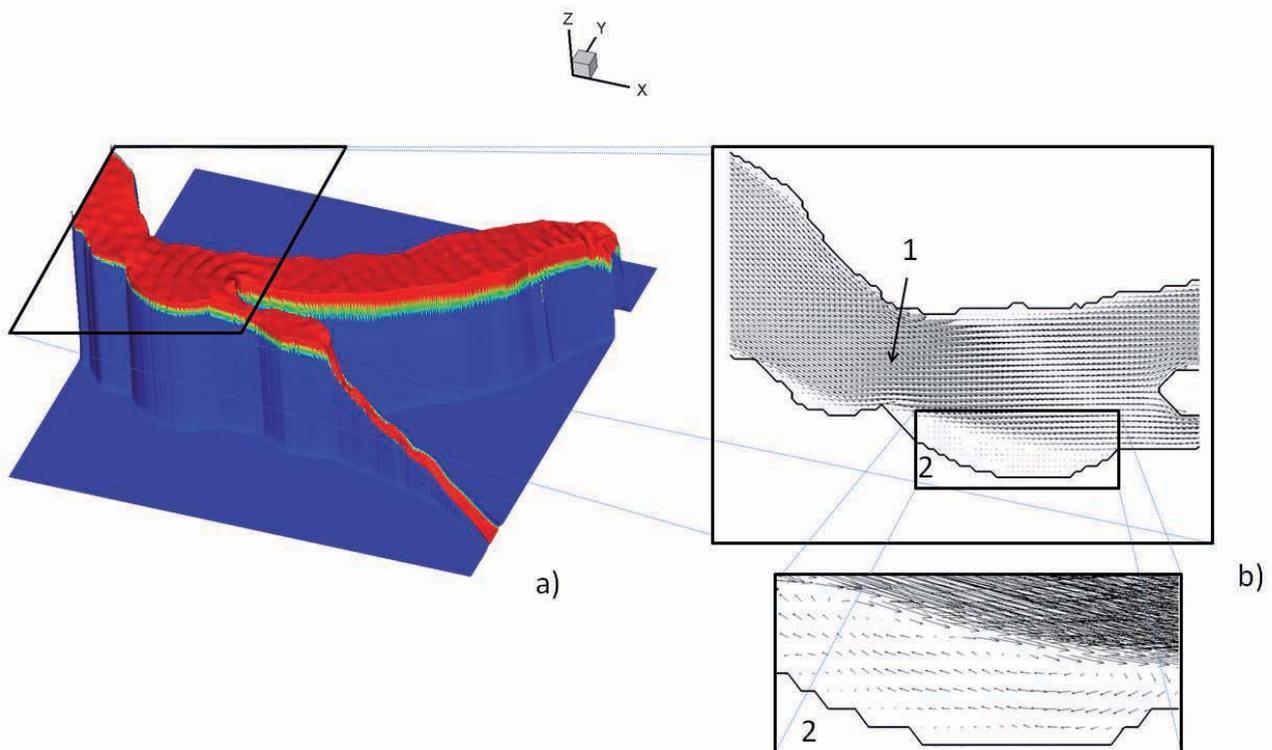


Figura 6. a) Contorno del valor de la bandera que indica las zonas secas y mojadas.  
b) Campos de velocidad en una sección del río.

Carrizal era de 27%. En simulaciones recientes, con este modelo bidimensional, se está considerando las islas, que han sido creadas igualmente a partir de la aproximación de su forma por polinomios de alto orden.

Comparando los resultados obtenidos en el modelo tridimensional (Sánchez et al., 2009) y el presente modelo bidimensional, se puede ver que la magnitud de las velocidades son similares y en general el patrón del flujo es similar (Figura 8). Cabe destacar que

las principales diferencias se obtienen en las zonas influenciadas por las islas, marcadas con número en esta figura. En el punto 1 la simulación tridimensional muestra valores más altos de velocidad debido a una isla en la margen derecha del río que obstruye aun más el cauce de éste. En la zona 2 sucede lo contrario, debido a la gran isla que se forma aguas debajo de la bifurcación, el gasto que entra al río carrizal es menor que en la simulación bidimensional. Al ser menor el gasto, por consecuencia, igualmente las velocidades máximas en este río son menores.

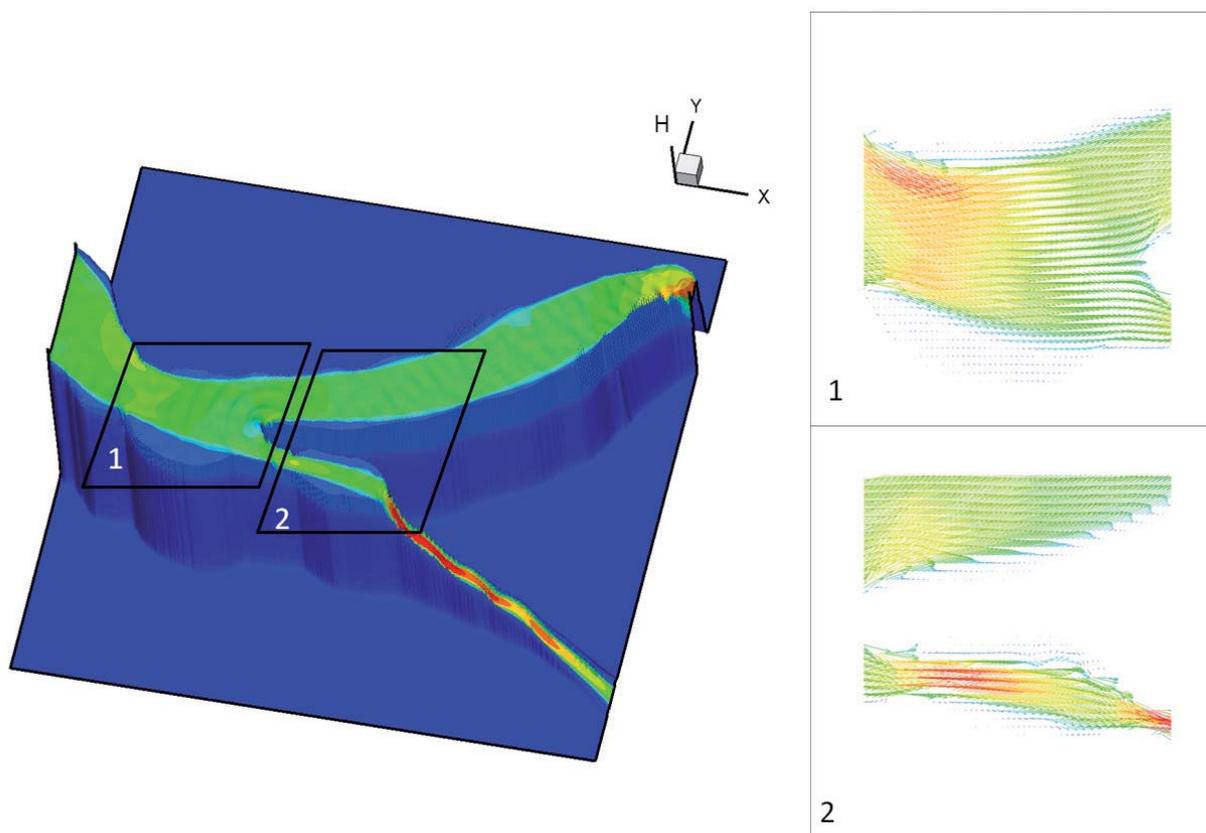


Figura 7. Contorno de la magnitud de la velocidad y vectores de velocidad en dos secciones del río.

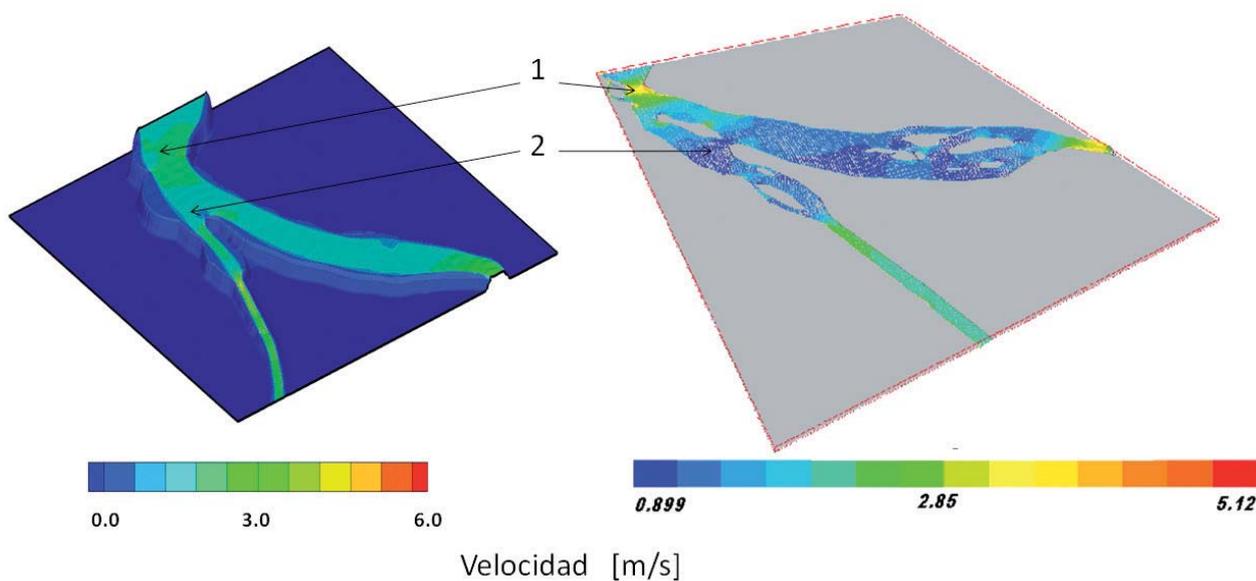


Figura 8. Comparación de velocidades entre el modelo presente (izquierdo) y un modelo tridimensional (Sánchez, 2009) (derecho).

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta un modelo de aguas someras en el cual las ecuaciones son resueltas mediante un método de diferencias finitas. En la discretización es utilizado un método de la familia MacCormack, aproximando la batimetría del río y la topografía del lugar mediante el uso de polinomios de alto orden. El efecto de escalonamiento por el uso

de fronteras inmersas se evita por el uso de una interpolación de segundo orden.

Este modelo fue aplicado en la simulación de la bifurcación del río Mezcalapa. Los resultados numéricos muestran una buena aproximación a los experimentales y las diferencias se deben a la no inclusión de las islas, las cuales muestran que tienen un efecto importante en la distribución de gastos en ambas ramas de la bifurcación.

Dada la simplicidad del modelo, el mismo muestra ser una herramienta útil en el estudio de flujos complejos en ríos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Las simulaciones fueron realizadas en el cluster Tonatiuh del Instituto de Ingeniería, UNAM. Los autores agradecen a su administrador Ing. Fernando Maldonado al igual que a su equipo ASUL.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Cao Z. & Pender G. 2004. Numerical modeling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding, *Advances in water resources* 27:533-546

Chanson H. 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*, Editor Butterworth-Heinemann, 585p.

De la Lama M. 2010. Estudio numérico de cuerpos complejos inmersos en un flujo compresible, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 79p.

Fletcher C. A. J. 1988. *Computational techniques for fluid dynamics 2*. Springer, 484 p.

Gottlieb D. & Turkel E. 1976. Dissipative to four methods for time dependent problems. *Mathematics of Computation*. 30:703-723

Guinot V. 2003. Riemann solvers and boundary conditions for two-dimension shallow water simulations, *Int. J. Numer. Fluids* 41: 1191-1219

Hervout J.M. 2007. *Hydrodynamics of free surface flows*, John Wiley & Sons, LTD, West Sussex UK, 341p.

Jimenez A.A, Gracia J. Berezowsky M. & Martinez J. 2007. Estudio de la bifurcación de un río con modelación numérica, *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, CI-29.

Kennedy, C.A. and Carpenter, M.H. 1997. Comparison of several numerical methods for simulation of compressible shear layers. *NASA Technical Paper*, 3484.

Laney C., 1998. *Computational Gasdynamics*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 613p.

Liang D., Lin B. & Falconer A. 2007, Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-MacCormack scheme, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 53: 811-826

Sánchez J.A, Vicente W., Salinas-Vázquez M., Os-naya J. y Gracia J. 2009. Numerical simulation of flow in the bifurcation of the Mezcalapa river, *International Workshop on Environmental Hydraulics*, Valencia, España.

Toro E.F. 2001. *Shock-Capturing methods for free surface shallow flows*, John Wiley & Sons, LTD, West Sussex UK, 309p.

Van Rijn L.C. 1993, *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua publications, Amsterdam, The Netherlands. 690p.

Wu W. 2007. *Computational river dynamics*, Taylor & Francis, London UK. 494p.

**MINERALOGICAL AND GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF DREDGED SEDIMENTS  
FROM THE CANAL BOIS-DE-CHÊNE (PORT-AU-PRINCE, HAITI)  
CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOTÉCNICA DE LOS SEDIMENTOS DE DRAGADO  
RESULTANTES DEL CANAL BOIS-DE-CHÊNE (PORT-AU-PRINCE, HAÏTÍ)**

Wolfield Tingué<sup>1</sup>, Molière Emmanuel<sup>2</sup>, Marie Gisèle P.A. Pierre<sup>1,3</sup>.

**Abstract**

The management of sediments raises more and more important technological, economic and environmental challenges. These sediments are especially constituted by fragment of calcareous and detrital rocks accumulated in the canal. They also contain waste resulting from industries, from the draining of engines etc., susceptible to have fatal consequences on the environment and the health of the local residents. The realized mineralogical, geotechnical tests and chemical analyses report their essentially carbonated nature and they are poor in physical and mechanical quality. However, this work can make a considerable contribution to the reduction of the environmental impacts due to the existence of sediments polluted in the urban community of Port-au-Prince, strengthens the idea to envisage the use of sediments of the canal Bois-de-Chêne as building materials for common usages.

**Keywords:** sediments, mineralogy and chemistry, geotechnical, construction, environment.

**Resumen**

La gestión de los sedimentos levanta retos tecnológicos, económicos y medioambientales cada vez más importantes. Aquellos sedimentos están constituidos sobre todo por ruinas de rocas calcáreas y detríticas acumuladas en el canal. Contienen también residuos procedente de las industrias, del drenaje de los motores etc., susceptibles de tener consecuencias dañinas sobre el medio ambiente y la salud de los residentes. Los análisis mineralógicos, las pruebas geotécnicas y los análisis químicos dan cuenta de su carácter esencialmente carbonatado y ellos son pobres en la calidad física y mecánica. Sin embargo, este trabajo puede aportar una contribución considerable a la reducción de los impactos medioambientales debidos a la existencia de sedimentos contaminados en la comunidad urbana de Port-au-Prince, refuerza la idea de prever la utilización de los sedimentos del canal Bois-de-Chêne como materiales de construcción para usos corrientes.

**Palabras clave:** Sedimentos, mineralogía y química, geotécnica, construcción, medio ambiente.

**INTRODUCTION**

The sediments in gullies, for several decades, became a concern for many countries which made studies in order to characterize them and be able to effectively manage them (Environment Canada, 2002). Number of these works is dedicated to the mineralogical, geotechnical, physical and chemical and ecotoxicological characterization of the sediments (Bonnet, 2000; Perrodin and *al.*, 2004) which can be made of natural contaminant receivers (Wen and *al.*, 1998). The existence of these pollutants in sediments can entail ecological and human damages (US EPA, 1997), such as the decrease of the variety of communities, invertebrates in particular, with indirect consequences on the population of fishes or shells. The presence of pollutants also causes the loss of edibility of certain species; they can affect or make impossible entertaining activities and even create supplementary costs linked to the management of contaminated materials during

dredging or cleaning out operations. When the volume of these sediments increases, the risk of flood is raised (Imbert and *al.*, 1998).

The management of sediments raises more and more important technological, economic and environmental challenges. Their phase of characterization allows to choose the adequate technology and to estimate the cost to be possibly used (Projet européen LIFE, 1992). The studies of characterization of sediments aim besides at supplying answers to the concerns of the speakers in protection of the integrity and the health of the ecosystems (Environment Canada, 2002).

The sediments found in Haiti are materials especially from the drop pipes. They arise from the erosion accelerated by hillsides. They constitute a source of exploitation which could decrease the misuse and anarchy of the sandpits and aggregates, real challenges to the environment. The exploitations of these

<sup>1</sup> Laboratoire d'Analyse des Matériaux (LAM), Université Quisqueya, BP 796, Port-au-Prince, Haïti. Corresponding author : wolffy\_22@yahoo.fr, tingue.wolfield@gmail.com

<sup>2</sup> Ecole Nationale de Géologie Appliquée (ENGA), Port-au-Prince, Haïti.

<sup>3</sup> Association Haïtienne Femmes Science et Technologie (AHFST), Université Quisqueya, BP 796, Port-au-Prince, Haïti.

quarries have a fatal effect on the environment which is characterized by: a disastrous visual impact, an erosion accelerated by hillsides, a subterranean decrease of water reserves, insecurity of the workers, road danger, evacuation of materials, nuisances to the local residents and the absence of rehabilitation (ADISH, 1996).

These problems settle at the world level and lead to the same risks. That is why, in Haiti, following the example of the developed countries, it takes there place to envisage the valuation of materials. It turns out necessary, in the case of this study, to value sediments of dredging of the canal Bois-de-Chêne (Port-au-Prince) to integrate them into the industry of the construction, as rolled and crushed materials.

## MATERIALS AND METHODS

### Experimental Site

The canal Bois-de-Chêne, one of the biggest collectors of sediments of dredging of the urban community of Port-au-Prince, turns from East to West to the bay of Port-au-Prince and winds the administrative space of the metropolitan region of Port-au-Prince, that is mainly the Communes of Pétiion-Ville and Port-au-Prince (Léger, 2002). This canal 10 km in length approximately, originates in the Morne l'Hôpital in more than 400 m of altitude from the heights of Pétiion-Ville. During the 80s, a section 2 km was fitted out in concrete, going of the corridor Bois-de-Chêne (of coordinates 18°30'10" of latitude North and 72°20'35" of longitude East) in the intersection of streets Harry Truman and Oswald Durand (of 18°30'10" of latitude North and 72°21'35" of longitude East). The canal Bois-de-Chêne is fed by a certain number of ponds hillsides constituted by calcareous and basalt materials. By erosion, transport and deposit, the detrital materials or alluvial deposits settled in the canal.

About twenty gullies train the network of drainage of the Morne l'Hôpital. Nine more important cross this one in the part East and constitute the tributaries of the canal Bois-de-Chêne. They are: the gully of Juvénat, the gully in the Chat, the gully Bois Patate or Canapé Vert, the gully of Mont Joli, the gully of Turgeau, the gully Debussy, the gully Saint Rome (constituted by gullies Bois Caïman and Fond Diable), the gully Malthèque, the gully Bourgot (constituted by gullies Bois Cochon and Fond Diable).

The geologic formations met in the zone of study begin with massive limestones of Eocene. These formations level widely not far from the police station of Pétiion-Ville, on the road of Laboule, just as in Morne Calvaire, locality located at the South of the sector of study.

The Miocene puts back on these formations and is represented by limestones more or less chalky, particularly visible on the road of Canapé-Vert.

Lower Pliocene is the last term of the series. It consists of an alternation of silts and of calcareous stone-ware, observable during the canal Bois-de-Chêne.

On two (2) upstream banks of this canal, towards Bourdon, levels conglomerates polygenic containing pebbles of basalt of tholeiite natural are also observed. They are accompanied with diverse pebbles and with some pebbles of flint, stemming from the dismantling of the relief of the Massif de la Selle.

### Study data

Two campaigns of sample have been realized on the Ravine Bois-de-Chêne site. The sampling has been made according to the standard AFNOR, 1990. A first series of three samples by selected point was taken manually, during period from 17 till 18 March 2005, and another series of three samples, from 12 till 14 March 2006 in dry weather. Three points all in all were selected to take samples to be analyzed, they are noted P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> (figure 1). The first sample mentioned P<sub>1</sub> was taken at the top of the bridge Saint Géraud in the avenue Christophe and two others, P<sub>2</sub> and P<sub>3</sub>, were collected in the locality of Djobel (street Charlevoix), towards Bourdon. Samples taken in March, 2005 were used without physical transformation (non-crushed materials) for the tests of laboratory. Those of March, 2006 were crushed before the tests of laboratory.

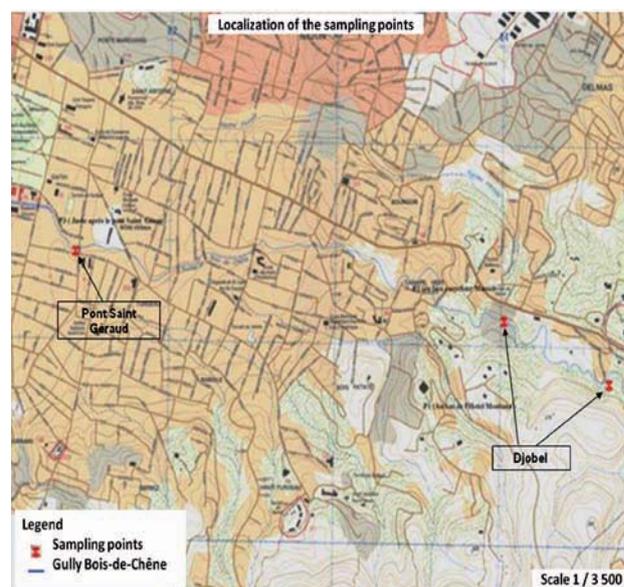


Figure 1. Sampling points

## Analysis and characterization methods

### Mineralogical and chemical analysis

First of all, a sieve of 50 µm and a washbasin profoundly black covered were used for the wash of sediments. For the determination of the physical,

chemical and mineralogical properties, a binocular magnifying glass was used.

The method of volumetric dosage in the EDTA (Ethylene Diamine Tetra Acetic) was used for the determination of the percentage of lime. For the determination of the percentage of silica, the gravimetric method weighed was used.

Grain size analysis and fineness modulus

The grain size analysis is realized according to the standard P 18-560, 1990. The more or less fine character of sand can be quantified by the calculation of the fineness modulus (MF). This parameter is used in particular in the calculations of composition of concretes.

**Physical and mechanical tests**

The tests are realized according to the European Standards and AFNOR (FRENCH NATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). The standard P 18-553, 1990, has been used for the preparation of the samples for the tests.

*Sand equivalent tests*

This test describes by the standard P 18-598,1991, used in a common way to estimate the cleanliness of sands entering the composition of concretes, is it also for grounds but, in that case, its importance is lesser.

*Mass density*

This test realized by the standard NF P 94-054, 1991, aims at allowing to know the mass of a granular fraction when for example we elaborate a concrete composition. This parameter allows, in particular, determining the mass of the various granular classes to mix for the obtaining of a concrete the characteristics of which are imposed.

*Los Angeles test*

It is the resistance in the fragmentation by shocks. This test is described by the standard P 18-573, 1990.

*Micro-Deval test*

This test allows to measure the flat broke wear resistance of rocks or in the presence of water by mutual frictions in a cylinder in rotation. The standard P 18-572 allows to realize this test.

*Proctor-CBR tests (Standards: NF P 94-093, 1999, and NF P 94-078, 1997)*

The tests Proctor normal and modified Proctor allows to define the relation between the moisture content of a mixture granular and its density dries for a given energy of compaction. The indication CBR is generally included between 0 and 100. The material is mediocre below 12, bad below 6 (Coquand, 1970).

*Compression tests*

This test allows to control the quality of the hardened concrete. It is about the most current tests. It is carried out according to standard NF EN 1354, 2006.

**RESULTS AND DISCUSSION**

The mineralogical and chemical analysis reveal that sediments of the canal Bois-de-Chêne are of limestone nature with percentages of carbonate of calcium ( CaCO<sub>3</sub>) varying between 90 and 95 %. Furthermore, they have on average a percentage of 51.24 % lime and 3.24 % silica (Table 1).

These sediments are of whitish or yellowish color. Samples are altogether heterogeneous. They contain grains especially round. More than 90 % of them are clear minerals, sedimentary origin whereas 7 in 8 % represent dark and clear minerals of volcanic nature. Clear minerals have a gleaming aspect whereas those of dark tint are masts. Tracks of fossils (micro foraminiferous: milioles and globigerina) are observed.

The presence of pebbles of volcanic rocks in three studied samples is attributable to the dismantling of the heart of the Massif de la Selle, as give evidence of it basalts tholeiites appearing upstream to the sector of study and the contents in major elements revealed by the chemical analysis.

The dark grains crushed do not make excitement for the hydrochloric acid (HCl) diluted in 12 %. On the other hand, those of clear tint of carbonated nature, beforehand washed, react to the HCl by presenting a characteristic bubbling. Are present also in the dark elements of minerals silicates as the olivine (dark grains) and the calcic plagioclase (clear grains). The chemical analysis reveals the presence of major elements: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O.

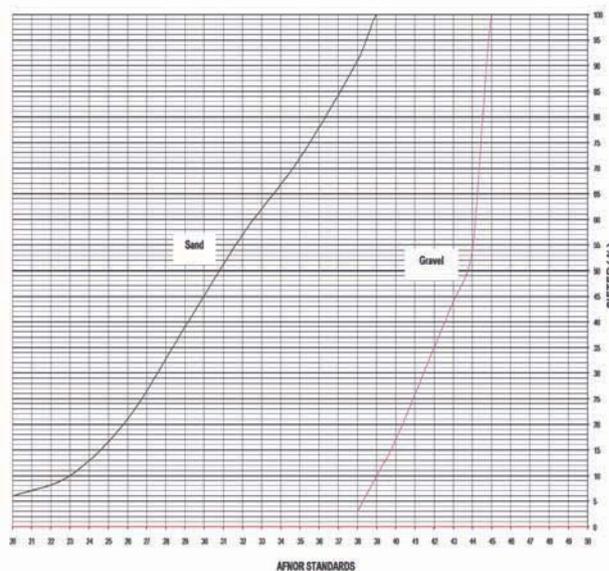


Figure 2. Grading curve corresponding to sands and gravels at bridge Saint Géraud (March 2005, non-crushed materials)

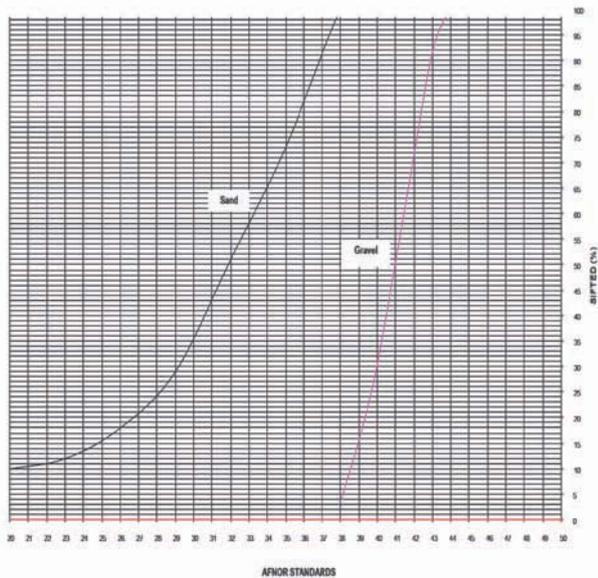


Figure 3. Grading curve corresponding to sands and gravels at bridge Saint Géraud (March 2006, crushed materials)

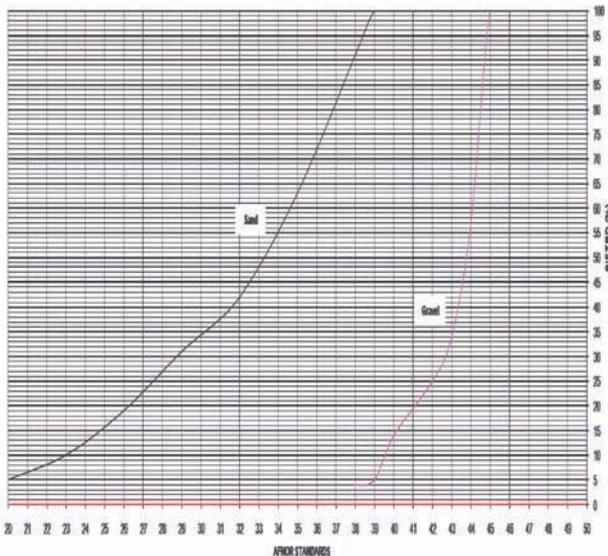


Figure 4. Grading curve corresponding to sands and gravels at Djobèl (March 2005, non-crushed materials)

According to the standard XP 18-540 the samples of materials (March 2005, non-crushed materials) figures 2 and 4 contain too much fine to be used as bits of gravel in hydraulic concretes, it is necessary to sieve them from 0,63d in  $(d + D)/2$ .

The fraction 0/4 mm (sand) represented in figures 2 and 4 cannot be used in hydraulic concretes because the content in fine is too low. Furthermore, the obtained grading curves and the fineness modulus show clearly that these materials are poor in fine elements.

The results of the grain size analysis of crushed materials (figures 3 and 5) taken in March, 2006, can be so interpreted:

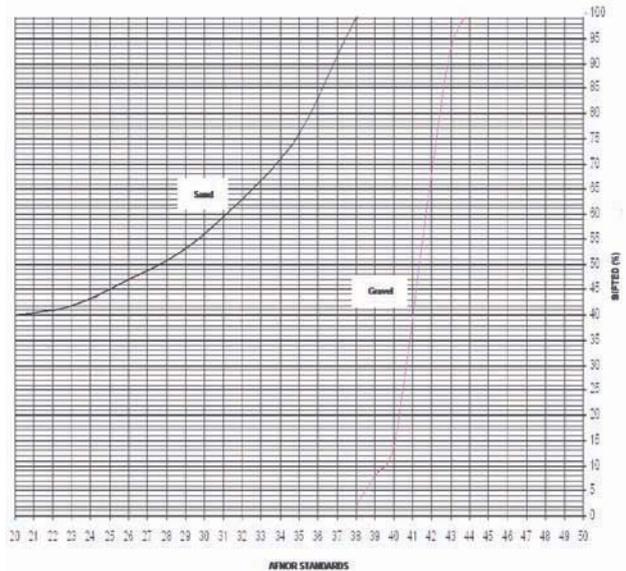


Figure 5. Grading curve corresponding to sands and gravels at Djobèl (March 2006, crushed materials)

- The samples of materials do not contain fine in 0,63d and little in d, what lets believe that they can be used in hydraulic concrete;
- The fraction 0/4 mm (sand) of these samples contains a percentage (%) of respective fine of 10 % and 40 %. They can be consequently used in hydraulic concrete.

Sample P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> of the table 2 (March 2005, non-crushed materials) has the following respective values of Los Angeles: 23; 20; 19, of equivalent of sand: 58, 69, 81 and of cleanliness: 2.68; 2.33; 1.22. Compared with the thresholds values of the standard XP 18-540, they are convenient for the sub-base and base course. On the other hand, according to the standard XP 18-540, the test Micro-Deval gives values too much raised for the use of these bits of gravel in the first two categories of aggregates retained by the standard.

The values of the sand equivalent tests found for three samples P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> and P<sub>3</sub> (crushed materials, in



Figure 6. Proctor curve at bridge Saint Géraud (March 2005, non-crushed materials)

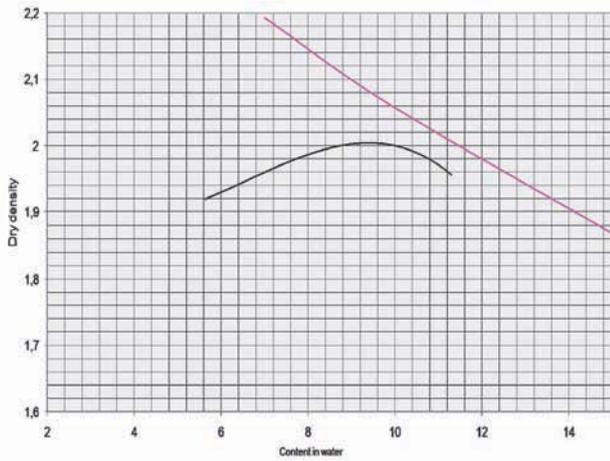


Figure 7. Proctor curve at bridge Saint Géraud (March 2006, crushed materials)

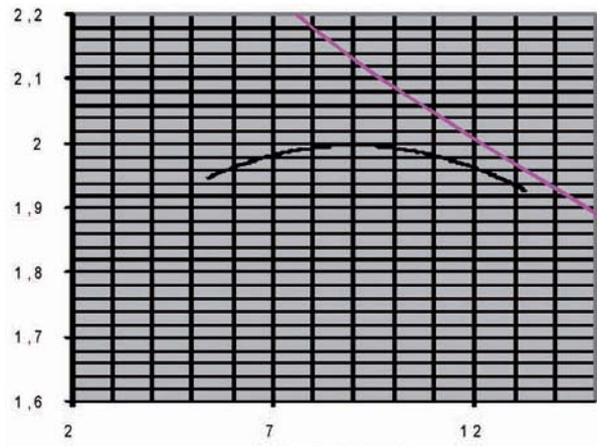


Figure 9. Proctor curve at Djobèl (March 2006, crushed materials)

March, 2006), following the table 3, allows to assert that  $P_1$  offers a better sand equivalent compared with two other samples ( $P_2$  and  $P_3$ ). It suits perfectly to the standard (NF P 18-598).

The percentages of wear obtained from the tests Los Angeles and Micro-Deval compared with the values fixed by the standards (NF P 18-573) prove that three

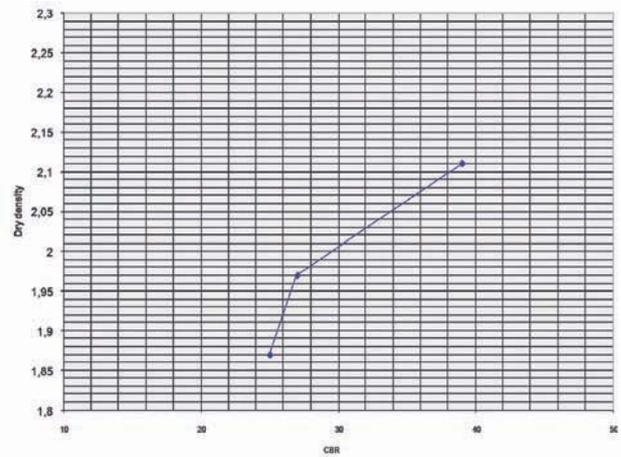


Figure 10. CBR curve at bridge Saint Géraud (March 2005, non-crushed materials)

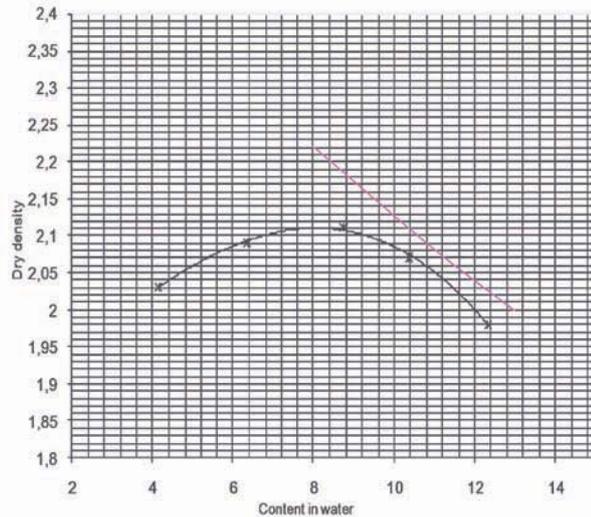


Figure 8. Proctor curve at Djobèl (March 2005, non-crushed materials)

sample  $P_1$ ,  $P_2$  and  $P_3$  can be used sub-base, because of their weak impact resistance and in the friction.

Figures 6, 8, 10 and 12 summarize the results of curves Proctor and CBR on samples studied in March, 2005 (non-crushed materials):

The value of lift required by the National Laboratory of the Building and the Public Works in Haïti (LNBTP, 1982) for the use of a material in the sub-base is: CBR in 95 % of the OPM > 30.

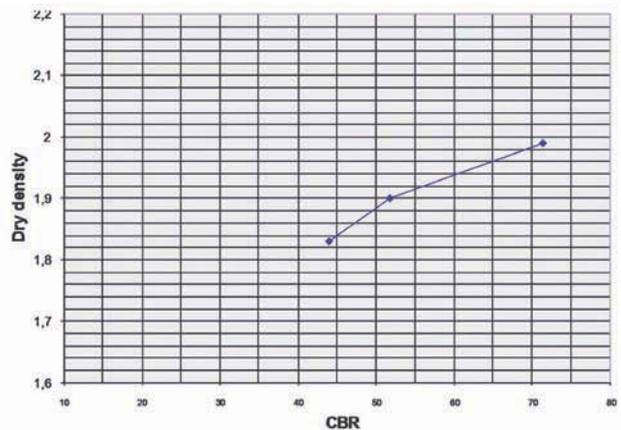


Figure 11. CBR curve at bridge Saint Géraud (March 2006, crushed materials)

The value of C.B.R. obtained for the sample  $P_1$  (non-crushed materials) requires an improvement of the material that is the increase of its compactness before being used in the sub-base. By increasing the percentage of the modified optimum Proctor, the ma-

material becomes much more compact, thus this last one will present a CBR much bigger. On the other hand, sample P<sub>2</sub> and P<sub>3</sub> agrees very well for the sub-base.

Furthermore, the curve of the figure 6 accuses an modified optimum Proctor by 8.4 % for a maximal density of 2.11, what characterizes an excellent material (Coquand, 1970) and present an indication CBR from 30 at 95 % of the modified optimum Proctor (figure 10).

The curve of the figure 9 which presents an optimum Proctor of 8.2 % for a maximal density of 2.11, characterizes an excellent material. They present besides a CBR from 66 at 95 % of the modified optimum Proctor (figure 12).

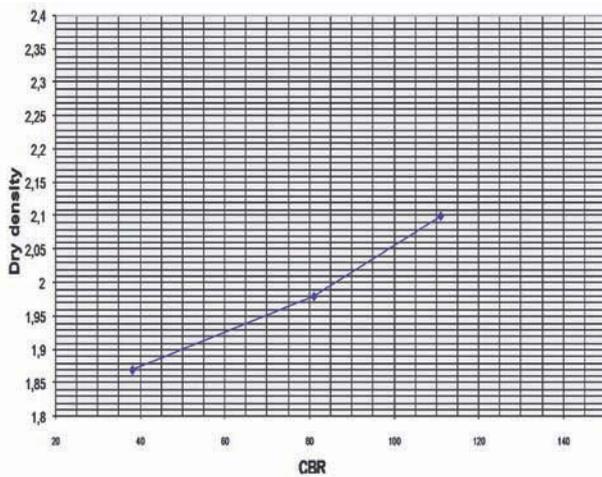


Figure 12. CBR curve at Djobèl (March 2005, non-crushed materials)

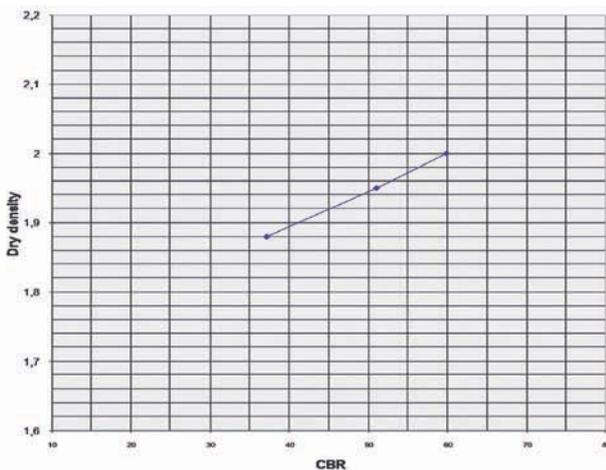


Figure 13. CBR curve at Djobèl (March 2006, crushed materials)

The obtained indication CBR by realizing the tests of Proctor-CBR on crushed materials (March 2006) accuses values respectively of 53, 53 and 42 for three

samples P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> and P<sub>3</sub> (Table 3). These results show that they can serve as sub-base. The capacity of lift is of as much better than the indication CBR is more raised. On the other hand, we can use materials (P<sub>2</sub> and P<sub>3</sub>) non-crushed in base course according to the result of the previous study.

The resistance in traction (Table 4), obtained for the sample P<sub>1</sub> (crushed materials), is equal to 2.46 MPa. It corresponds to the class of resistance 4, intended for the wearing course for traffic T3 i.e. from 50 to 150 heavy goods vehicles a day (NF EN 12390-6, 2001). The resistance in compression is equal to 27.86 MPa for the same sample P<sub>1</sub>. Its utility depends on the choice of the foreman (NF EN 1354, 2006).

## CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Sediments of the canal Bois-de-Chêne analyzed by whitish, yellowish and beige color are sedimentary detrital rocks resulting from volcanic rocks of the Massif de la Selle. Tracks of micro foraminiferous were met in sifted as well as some grains of zeolite.

The analysis of the grading curves reflects a dimensional continuous distribution and a grain size analysis spread. It is also advisable to make the sieving from the finest elements on bits of gravel before they can be used for the hydraulics concrete and as sub-base and base course.

The tests of dynamic fragmentation or Los Angeles give acceptable values for aggregates to concrete and sub-base and base course. On the other hand, the values found for the test Micro-Deval show that analyzed sediments cannot be used for the traffics of heavy goods vehicles. The values obtained for the density show that studied sediments are common materials. Furthermore, their degree of cleanliness gives values too much raised to be directly used. It is necessary to wash them beforehand.

This work on sediments of the canal Bois-de-Chêne shows the possibility of valuing these sediments and constitutes a first stage. The step must be pursued by the other analysis, the tests and the treatments to use them to reduce the exploitation of the quarries of the Morne l'Hôpital. Besides, considering the variety of the rejection in the canal, it would be good to proceed to the physical and chemical characterization of these sediments to understand the phenomena of sedimentation and transport of sediments, as well as the adsorption of contaminants and also their fate on aquatic ecosystems.

This work contributes on the one hand to explain the origin of the sediments and on the other hand, the determination of their physical and mechanical quality. It approaches also the problems of the management of the sediments under a scientific angle in order to contribute to solve the environmental problems of this country.

## BIBLIOGRAPHICS REFERENCES

- ADISH (1996). Premier congrès national du génie sanitaire et des sciences de l'environnement. In Prepetit C. Rationalisation de l'exploitation des carrières de sable et l'environnement humain. Rapport de synthèse : Port-au-Prince (Haïti), pp. 94 - 104.
- AFNOR (1990). Recueil de normes françaises aux méthodes d'essais, 4ème édition, 736 p.
- Bonnet C. (2000). Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse en Toxicologie de l'Environnement. Université de Metz, Cemagref, Lyon, France, 326p.
- Coquand R. (1970). Construction et entretien des routes. 5ème éd., éditions Eyrolles, Paris, 338p.
- Dupain R., Lanchon R, Saint-Arroman J.-C. (2000). Granulats, sols, ciments et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 2emeed, A. Casteilla, Paris, p 236.
- Environnement Canada (2002). Guide d'échantillonnage des sédiments du Saint-Laurent pour les projets de dragage et de génie maritime. Volume 2 : Manuel de praticien de terrain. Environnement Canada, direction de la protection de l'environnement, région du Québec, section innovation technologique et secteurs industriels. Rapport, 107p.
- Imbert T., Py C. et Duchene M. (1998). Enlèvement des sédiments. Guide méthodologique. Agence de l'eau Artois Picardie, Douia, FRA. 161 p.
- Léger R. J. (2002). Gestion partagée des infrastructures de drainage et d'assainissement : cas de municipalités en situation amont/aval (Pétion-Ville/Port-au-Prince). Colloque international, Gestion intégrée de l'eau en Haïti, Université Quisqueya, Haïti.
- LNBT (1982). Projet de catalogue de structures. Ref/G/002/JL/cmc/82/551, 23p.
- NF EN 1354 (2006). Détermination de la résistance à la compression du béton de granulats légers à structure ouverte.
- NF EN 12390-6 (2001). Essai pour béton durci - Partie 6 : résistance en traction par fendage d'éprouvettes.
- NF P 94-054 (1991). Sols : reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à eau.
- NF P 94-078 (1997). Sols : reconnaissance et essais – Indice C.B.R. après immersion – Indice C.B.R. immédiat – Indice portant immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule C.B.R.
- NF P 94-093 (1999). Sols : reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.
- P 18-553 (1990). Granulats. Préparation d'un échantillon pour essai.
- P 18-560 (1990). Granulats. Analyse granulométrique par tamisage.
- P 18-572 (1990). Granulats. Essai micro-Deval.
- P 18-573 (1990). Granulats. Essai Los Angeles.
- P 18-591 (1990). Granulats. Détermination de la propreté superficielle.
- P 18-598 (1991). Granulats. Equivalent de sable.
- Perrodin Y., Bedell J.P., Delolme C., Briant A.L. (2004). Approche méthodologique de l'évaluation des risques écotoxicologiques liés à la mise en dépôt sur sol de sédiments de dragage, Déchets Sciences et Techniques, # 3, p. 4, 14.
- Projet européen LIFE (1992). Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués. Inventaire détaillé des méthodes de curage de traitement de transport et d'usages des sédiments, 126p.
- U.S. EPA, (1997). The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States. Vol 2.
- Wen X., Du Q. et Tang H. (1998). Surface complexation model for the heavy metal adsorption on natural sediment. Environmental Science and Technology, 32; 870-875.
- XP P 18-540 (1997). Granulats. Définitions, conformité, spécifications.

## TABLES

**Table 1. Results of the chemical analysis (March 2005)**

Samples	CaO %	SiO <sub>2</sub> %
P <sub>1</sub>	50.94	3.23
P <sub>2</sub>	50.98	2.76
P <sub>3</sub>	51.79	3.72
Average (P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> )	51.24	3.24

Samples	CaO %	SiO <sub>2</sub> %
P <sub>1</sub>	50.94	3.23
P <sub>2</sub>	50.98	2.76
P <sub>3</sub>	51.79	3.72
Average (P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub> )	51.24	3.24

**Table 2. Results of the physical and mechanical tests of materials non-crushed (March 2005)**

Parameters	Samples		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Grain size distribution (mm)	0 – 50	0 - 63	0 - 63
Silt content < 0,08 mm (%)	5	6	10
Fineness modulus (Fraction 0 – 5 mm)	3,43	3,43	3,19
Sand equivalent tests (%)	57	65	79
Cleanliness	2,68	2,33	1,22
Buk density on gravel	2,47	2,52	2,49
Bulk density on sand	2,50	2,64	2,69
Los Angeles	23	20	19
Micro-Deval	25	27	22
CBR	30	86	66

Parameters	Samples		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Grain size distribution (mm)	0 – 50	0 – 63	0 – 63
Silt content < 0,08 mm (%)	5	6	10
Fineness modulus (Fraction 0 - 5 mm)	3,43	3,43	3,19
Sand equivalent tests (%)	57	65	79
Cleanliness	2,68	2,33	1,22
Bulk density on gravel	2,47	2,52	2,49
Bulk density on sand	2,50	2,64	2,69
Los Angeles	23	20	19
Micro-Deval	25	27	22
CBR	30	86	66

**Table 3. Results of the physical and mechanical tests of materials crushed (March 2006)**

Parameters	Samples		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Grain size distribution (mm)	0 – 20	0 – 20	0 – 20
Silt content < 0,08 mm (%)	6,17	9,77	12
Fraction modulus (Fraction 0 - 5 mm)	3,18	2,52	2,19
Sand equivalent tests (%)	64,05	41,58	32,20
Cleanliness	0,75	2,54	1,77
Bulk density on gravel	2,57	2,56	2,58
Bulk density on sand	2,59	2,61	2,64
Los Angeles	25	25	25
Micro-Deval	18,25	19,33	19,33
CBR	53	53	42

**Table 4. Tensile strength and compression of samples (March 2006, crushed materials)**

Sample	Cement mass (kg/m <sup>3</sup> )	Water masse (kg/m <sup>3</sup> )	Concrete age (day)	Slump (cm)	Fracture stress in tensile (MPa)	Fracture stress in Compression (MPa)
P <sub>1</sub>	350	248	7	7	2.34	10.62
P <sub>1</sub>	350	248	28	7	2.46	27.86

## ANÁLISIS ENTRE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO APATLACO, MOR.

### ANALYSIS OF RUNOFF AND HISTORICAL SEDIMENTS IN THE APATLACO RIVER BASIN, MOR.

Preciado, J. M.<sup>1</sup>, Arganis, J. M. L.<sup>2,3</sup>, Val, S. R.<sup>3</sup> y G. A. Ocón

#### RESUMEN

El contenido de material en suspensión en los cauces está estrechamente relacionado con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los periodos de tormentas. En este trabajo y como una línea de investigación, se utilizaron datos anuales y mensuales de las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Apatlaco, ubicado en el estado de Morelos en México para investigar la viabilidad de aplicar técnicas de cómputo evolutivo para obtener modelos de ajuste entre escurrimientos y sedimentos a partir de un análisis de las correlaciones existentes entre ellos. Una vez identificadas las correlaciones se propusieron dos modelos para aproximar los volúmenes de acarreo con los volúmenes de escurrimiento. Se aplicó un algoritmo genético simple para obtener los parámetros de los modelos propuestos de los cuales aquél que tiene una variación de tipo exponencial dio los mejores resultados, tal como se presenta en este artículo.

**Palabras clave:** Acarreo, Caudales, sedimentos, Río Apatlaco, algoritmos genéticos, correlaciones

#### ABSTRACT

Suspension material loads in rivers are closely related with flows and the sediments dragged by the open flows of the hillside in basins which are generated during the storm periods. In this paper, and as a research line, annual and monthly data of measuring stations in the Basin of Apatlaco River were used in order to research the viability of applying evolutive computing techniques to get models of adjustment between flows and sediment volumes by means of an analysis between the existing correlations between them. Once identified the correlations two models were purposed to approximate the sediments volumes knowing the flows volumes. A simple genetic algorithm was applied to get the parameters of the purposed models; the one with an exponential variation gave the best results as it is shown in this article.

**Keywords:** Load Flow, Flows, sediments, Apatlaco River, genetic algorithm, correlations

#### INTRODUCCIÓN

El contenido de material en suspensión en los cauces están estrechamente relacionado con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los periodos de tormentas (Bogardi 1978, Simons y Sentürk 1977, Newton de Oliveira, 1994, Obregón y Fragalá, 2002). Sin embargo, los sedimentos transportados por los cauces no sólo provienen de las erosiones en las laderas sino que también de los procesos erosivos en la red de drenaje de las cuencas. Estos materiales, aportados por las erosiones en los propios cauces o desde las laderas adyacentes a los mismos, son transportados principalmente en forma de acarreo, proceso también conocido como transporte de fondo.

La estimación del volumen de acarreo de sedimento ha sido motivo de investigaciones recientes tales como la de Campos-Aranda, 2009 que utiliza técnicas regionales para la estimación de sedimentos en cuencas no aforadas en una región hidrológica de México; Guimaraes et al, 2003 utilizaron algoritmos genéticos modificados con un modelo evolutivo competitivo complejo (CCE) para obtener los parámetros de un modelo físico hidrosedimentológico. Cabrera y Fernández, 2008, los cuales utilizaron la ecuación de Chacón (1982) que es de tipo lineal y propone al volumen de acarreo como una función de características fisiográficas de la Cuenca, de la precipitación, uso de suelo, cobertura vegetal entre otras para la Cuenca de delta de un río en Venezuela. Artigas et al, 2006 propusieron una metodología para estimar el transporte total de sedimentos a partir de ecuaciones obtenidas de la caracterización hidrológica,

<sup>1</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor.,

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM,

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, preciado@tlaloc.imta.mx, MArganisJ@iingen.unam.mx, rvals@iingen.unam.mx ; acoon@tlaloc.imta.mx

*Artículo enviado el 26 de abril de 2010  
Artículo aceptado el 15 de agosto de 2010*

hidráulica y física de la cuenca, del análisis de tormentas, de datos de sedimentos y de un análisis de correlaciones. También se han efectuado mediciones en campo en cuencas experimentales y se han contrastado los resultados con aspectos teóricos, un ejemplo es el estudio de Iroumé et al, 1996 en una cuenca de Chile.

Este trabajo tiene por objetivo presentar los resultados preliminares que pretenden seguir esta línea de investigación sobre sedimentos, en la que se analiza la viabilidad de aplicar técnicas de cómputo evolutivo para obtener modelos de ajuste entre escurrimientos y sedimentos con propósitos de pronóstico. Para ello se utilizaron los datos de las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Apatlaco, Morelos.

### SITIO DE ESTUDIO

La cuenca del río Apatlaco se ubica en la porción noroeste del estado de Morelos, limita al norte con el Distrito Federal, al norte y noroeste con el Estado de México, al oeste con la cuenca del río Tembembe, y al este y al sur con la cuenca del río Yautepec. El Río Apatlaco nace en el arroyo o barranca denominada Chalchihuapan, al noroeste de Cuernavaca y suroeste del Municipio de Huitzilac, y desemboca en el río Yautepec, afluente del río Amacuzac que finalmente descarga al río Balsas. Dentro de la cuenca se ubican tres grandes ciudades: Cuernavaca, Jiutepec y Temixco, y se localizan los municipios con el mayor ritmo de crecimiento en el Estado, los cuales se pueden agrupar en dos núcleos: Cuernavaca, Jiutepec, Temixco y Xochitepec, por un lado, y Jojutla, Zacatepec y Tlaltizapán, por el otro. El área de la cuenca es de 750.66 km<sup>2</sup>, la cuenca cuenta con 3 estaciones hidrométricas con datos de sedimentos estas son: Temixco (18271), Tetlama (18323) y Zacatepec (18264). En las Figuras 1 y 2 se indican los cambios en el uso de suelo que ha tenido esta cuenca, al comparar los años 1973 y 2000. En la Figura 3 se presenta el modelo digital de elevaciones, los distintos tipos de suelo así como la pendiente del cauce principal.

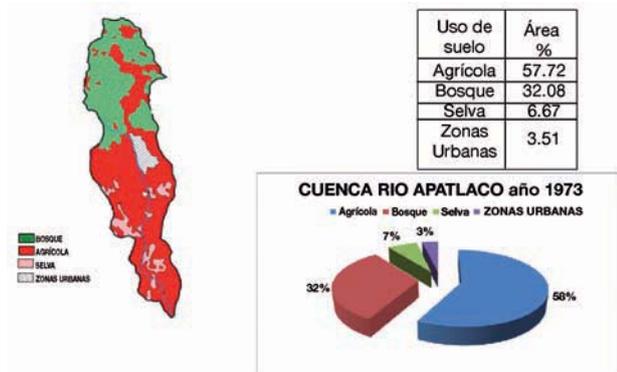


Figura 1. Uso de suelo año 1973. Cuenca río Apatlaco, Mor.

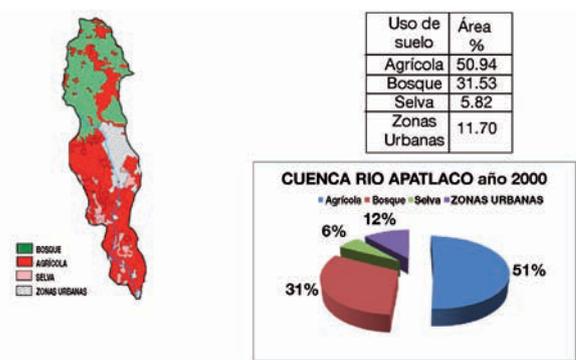


Figura 2. Uso de suelo año 2000. Cuenca río Apatlaco, Mor

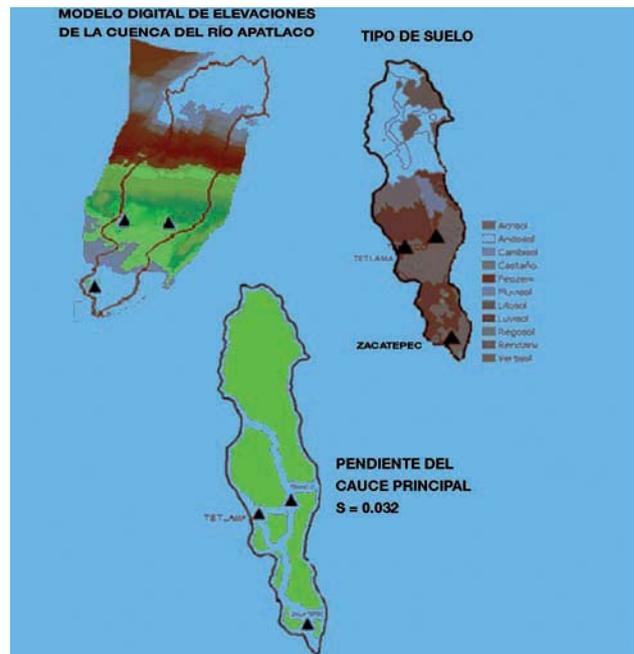


Figura 3. Modelo digital de elevaciones, tipo de suelo y pendiente del cauce principal, Cuenca río Apatlaco, Mor.

### METODOLOGÍA

#### Algoritmos genéticos

Dentro del cómputo evolutivo destacan los algoritmos genéticos (Goldberg, 1989) que son de búsqueda de propósito general que se basan en el modo en que la naturaleza consigue hacer que sus especies estén cada vez más adaptadas a su entorno, es decir, en la evolución. El año 1975 se toma como punto de referencia del origen de los estudios sobre algoritmos genéticos y, desde entonces hasta hoy en día, han ido mejorando y han sido utilizados en los últimos años para resolver problemas dentro de la hidrología y de la hidráulica. En la Figura 4 se indica la secuencia de un algoritmo genético simple.

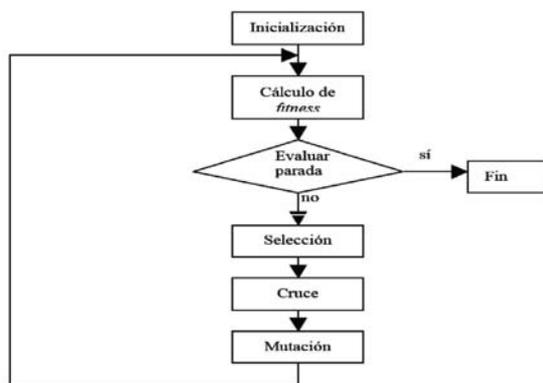


Figura 4. Algoritmo genético simple

### Coefficiente de autocorrelación

El coeficiente de autocorrelación permite identificar la relación existente entre series de tiempo; en el presente estudio se utilizó para evidenciar la posible dependencia existente entre el acarreo de sedimentos y los volúmenes de escurrimiento; el coeficiente se estima de acuerdo con la ecuación 1.

$$r_{V,A} = \frac{Cov(V,A)}{\sigma_V \sigma_A} \quad (1)$$

Donde:

V, volumen escurrido anual o mensual, hm<sup>3</sup>

A, acarreo de sedimentos anual o mensual, miles de m<sup>3</sup>

### Procedimiento de análisis

Los pasos que se proponen para realizar el estudio son:

Recopilación y análisis de los datos disponibles de los transportes de sedimentos y del volumen de escurrimiento líquido registrado en las estaciones hidrométricas de la cuenca analizada, tanto a nivel anual como a nivel mensual.

Estimación del coeficiente de correlación entre el volumen de acarreo sólido y del volumen de agua trasportado por la corriente, de observarse altas correlaciones (superiores a un umbral de 0.7) se continuará con el estudio, en caso contrario, se planteará, en una segunda etapa incluir las características fisiográficas de la Cuenca así como términos hidráulicos como la pendiente de plantilla, el área hidráulica y el coeficiente de rugosidad que permitan incluir de manera indirecta a la velocidad del cauce para incluirla en la posible ecuación de ajuste.

Una vez identificadas las correlaciones se proponen distintos modelos de ajuste (lineal, exponencial, potencial) en los que se pone como variable independiente al volumen de acarreo líquido y como la dependiente al volumen de acarreo sólido y con ayuda de un algoritmo genético se estiman los parámetros

del modelo obtenido. La función objetivo utilizada en el algoritmo genético es la que minimiza el error medio cuadrático entre los datos medidos y los calculados con el modelo propuesto.

Los distintos modelos se dibujan y se comparan, considerando como mejor modelo aquél que proporcione el menor error medio cuadrático.

### Datos disponibles

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) cuenta con una red de estaciones hidrométricas instaladas de 2339, actualmente operan 865 estaciones. El número de estaciones hidrométricas en su base de datos sedimentos es de 415. La estación 26424 cuenta con un registro de 71620 días. La estación 19016 cuenta con un registro histórico de su base de datos del 01/01/1975 al 01/04/2008 (Tabla 1).

### APLICACIÓN Y RESULTADOS

A partir de los registros del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) se determinaron los volúmenes y acarreos anuales; se determinó el coeficiente de autocorrelación para las estaciones Temixco, Tetlama y Zacatepec que mide las aportaciones de ambas; en las Figuras 5 a 10 se presentan los resultados obtenidos.



Figura 5. Registro histórico de Volumen y Acarreo. Estación Temixco

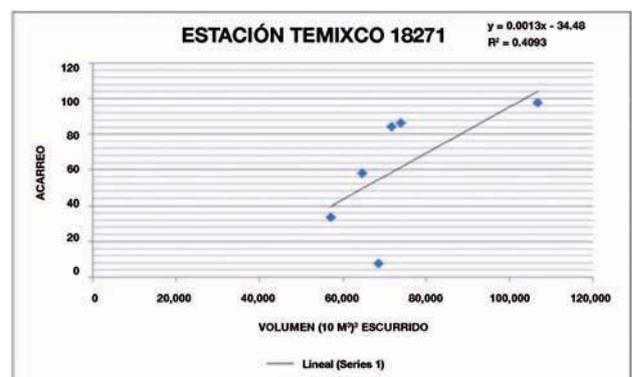


Figura 6. Volumen Escurrido vs Acarreo. Estación Temixco

**Tabla 1. Evolución de las estaciones hidrométricas operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)**

AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN	AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN	AÑO	ESTACIONES EN OPERACIÓN
1926	41	1955	622	1984	1239
1927	63	1956	669	1985	1240
1928	87	1957	708	1986	1152
1929	82	1958	716	1987	1150
1930	100	1959	769	1988	1148
1931	113	1960	788	1989	1145
1932	135	1961	07	1990	1142
1933	141	1962	832	1991	1067
1934	141	1963	866	1992	1068
1935	169	1964	915	1993	1067
1936	199	1965	1024	1994	1077
1937	175	1966	1068	1995	1055
1938	183	1967	1085	1996	960
1939	194	1968	1096	1997	844
1940	205	1969	1113	1998	774
1941	219	1970	1129	1999	779
1942	230	1971	1141	2000	780
1943	235	1972	1149	2001	780
1944	244	1973	1157	2002	811
1945	275	1974	1164	2003	865
1946	316	1975	1164	2004	862
1947	389	1976	1180	2005	864
1948	410	1977	1207	2006	863
1949	454	1978	1224	2007	865
1950	475	1979	1241	2008	865
1951	500	1980	1257		
1952	507	1981	1147		
1953	541	1982	1176		
1954	612	1983	1214		

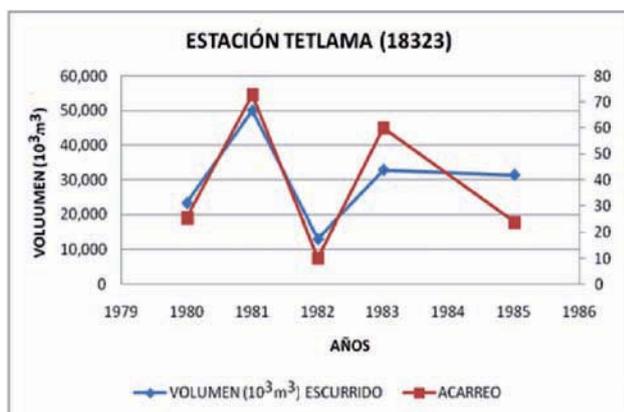


Figura 7. Registro histórico de Volumen y Acarreos. Estación Tetlama

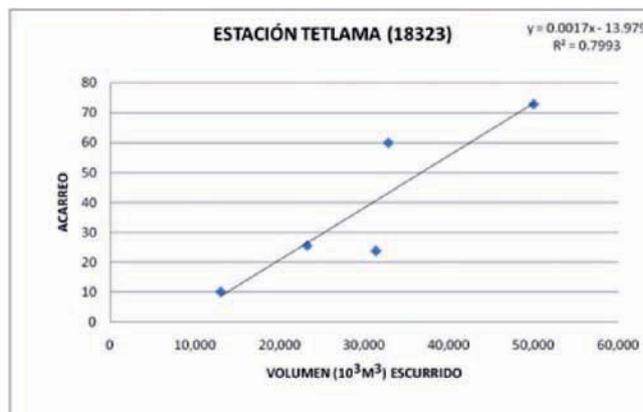


Figura 8. Volumen Escurrido vs Acarreo. Estación Tetlama



Figura 9. Registro histórico de Volumen y Acarreos. Estación Zacatepec

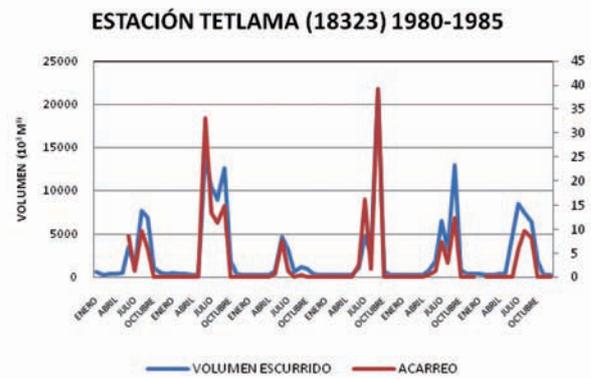


Figura 11. Volumen Escurrido y Acarreos. Datos mensuales Estación Tetlama

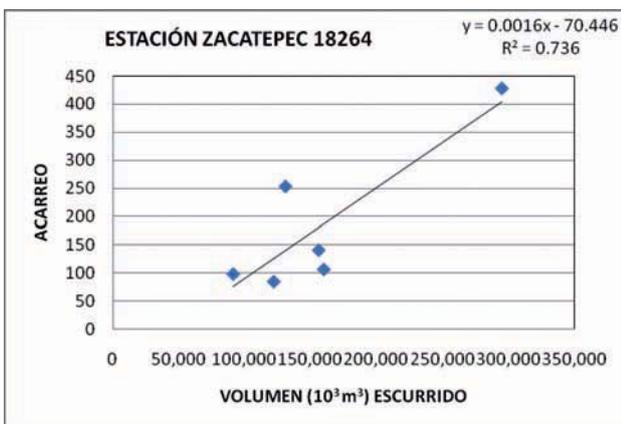


Figura 10. Volumen Escurrido vs Acarreos. Estación Zacatepec

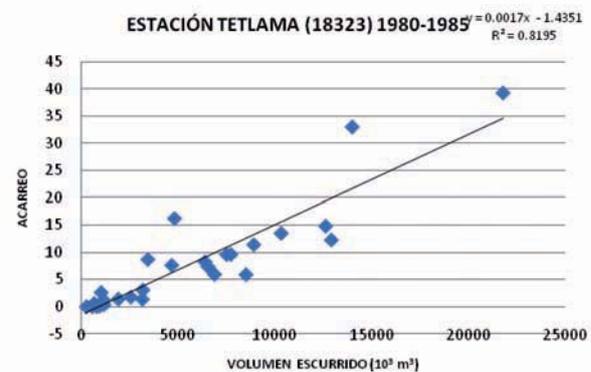


Figura 12. Volumen Escurrido vs Acarreos. Datos mensuales Estación Tetlama

Al observar la Figura 6 no se ve una clara autocorrelación entre el escurrimiento y el acarreo para la estación Temixco; posiblemente atribuible a una variación importante en la pendiente del cauce al estar el afluente en cañada o por la variación en el tipo de terreno, etc; en este caso la autocorrelación es de 0.639. Para la estación Tetlama (Figura 8) sucede lo contrario, este valor fue de 0.89. Algo similar sucede con la estación Zacatepec (Figura 10), con una autocorrelación de 0.86.

Debido a la variabilidad importante en el escurrimiento en las distintas épocas del año, se decidió investigar el comportamiento del escurrimiento y del acarreo a nivel mensual, para el caso de la estación Tetlama en la que encontró la más alta autocorrelación a nivel anual, en las Figuras 11 y 12 se presentan las gráficas del comportamiento del escurrimiento y del acarreo en el tiempo y respecto a la función identidad, para identificar sus correlaciones.

Al disminuir el periodo de tiempo a nivel mensual, se observan fuertes correlaciones entre el acarreo y el volumen de escurrimiento, la auto correlación da en este caso de 0.91.

Para el caso de la estación Tetlama, que tenía más información a nivel mensual, se aplicó propusieron dos modelos uno con variación no lineal con operadores algebraicos y otro con una variación exponencial del acarreo con respecto al volumen y se determinaron los parámetros de dichos modelos usando un algoritmo genético simple; los modelos corresponden a las ecuaciones 1 y 2.

Se determinaron los parámetros de dichos modelos usando un algoritmo genético simple; los modelos corresponden a las ecuaciones 2 y 3.

$$A = -6863.918V^{-1600.5269} - 1537.2173V^{0.9156} + 8.2340$$

$$A = 183.4162e^{(V/7738.5784)} - 233.4666e^{(V/10000)} + 50.3555$$

(3)

En la Figura 13 se comparan estos resultados.

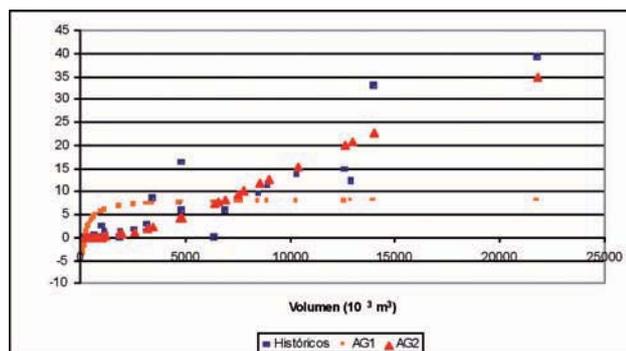


Figura 13. Comparación de datos medidos y calculados. Estación Tetlama

De acuerdo con la Figura 13 el modelo dado por la ecuación 2 da el mejor ajuste; el error medio cuadrático da de 27.3, mientras que con el primer modelo el error resulta de 33.24.

## CONCLUSIONES

Debido a las fuertes correlaciones que se encontraron entre los datos históricos medidos es factible pensar en modelos que asocien al escurrimiento con los sedimentos; una alternativa son las técnicas de cómputo evolutivo como son los algoritmos genéticos para estimar los parámetros de un modelo propuesto o la programación genética que permite la obtención del modelo matemático, para datos a nivel anual o en periodos de tiempo más corto como datos mensuales o agrupando meses según la época del año (estiaje, avenidas o por estaciones del año).

Las gráficas del volumen escurrido en el tiempo y de los sedimentos en el tiempo en una misma para las tres estaciones y para la suma y permiten ver que el comportamiento de cada una con el tiempo es aleatorio, dada la escasa autocorrelación por lo que es posible también un análisis con modelos para series de tiempo anuales.

La aplicación de algoritmos genéticos a los datos mensuales de la estación Tetlama permitió obtener una curva de tipo exponencial que logra estimar el valor del acarreo en función de los volúmenes escurridos. Es conveniente aplicar dicha curva a otro grupo de datos medidos para verificar su aplicabilidad para el caso de meses sin información del acarreo.

Adicionalmente se contempla en una segunda etapa de análisis incluir las características fisiográficas de la cuenca en el modelo, en particular de aquellas rel-

acionadas con la velocidad del cauce y su rugosidad, pretendiendo con ello obtener una mejor estimación del volumen de acarreo sólido.

## REFERENCIAS

- ARTIGAS, J., LOPEZ, J. Y CORDOVA, J. R. (2006). Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, vol.29, no.3, p.221-234.
- BOGARDI, J. (1978). *Sediment transport in alluvial streams*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 825p
- CABRERA, O., FERNÁNDEZ, L. (2008). Transporte y sedimentación en el delta de San Ignacio, Laguna de Tacarigua, Estado Miranda, Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, Enero-Junio, año/vol. XXIV, número 035pp 141-166.
- CAMPOS-ARANDA, D. (2009). Estimación probabilística de volúmenes de acarreo en suspensión en cuencas sin aforos en la Región Hidrológica No. 10. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Vol X No. 3. Pp 227-236
- CONAGUA (2000), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas). CD Software.
- GOLBERG, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, USA.
- GUIMARAES S., C. A., SUZULI K., WATANABE M. (2003) Modificacao no Algoritmo Genético SCE-UA e sua aplicacao a um modelo Hidrossedimentológico, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Vol. 8. Ene-Mar 2003. P. 137-146
- IROUMÉ, A., HUBER, A., ARRIAGADA A. (1996). Monitoreo y cuantificación de los procesos hídricos en una Cuenca andina en la IX Región de Chile. VI Jornadas del CONAPHI, Chile. Pp 14
- NEWTON DE OLIVEIRA, C. (1994). *Hidrossedimentologia*. Rio de Janeiro Brasil, cprm, 372 p
- OBREGÓN N. y FRAGALÁ F (2002). Predicción de caudales medio mensuales en la Estación La Pradera mediante RNA, 11 Congreso Colombiano y I Encuentro Andino de Inv. de Operaciones, Bogotá, septiembre 12-14.
- SIMONS, D. B. Y SENTÜRK F. (1977). *Sediment transport technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA. 807 p.

## EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN EN EL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, ESTADO DE MÉXICO. EROSION AND SEDIMENTATION IN THE UPPER COURSE OF THE LERMA RIVER, STATE OF MEXICO

Juan Antonio García Aragón<sup>1</sup>, Carlos Díaz-Delgado<sup>1</sup>,  
Marivel Hernández Téllez<sup>1</sup> y Emannelle Quentin<sup>1</sup>

### RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados conjuntos de diferentes estudios relacionados con la dinámica de sedimentos en la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL). La CARL tiene una extensión de 2117,9 km<sup>2</sup>, presenta en su parte alta, el Nevado de Toluca, elevaciones de 4560 msnm y en su parte baja la presa José Antonio Alzate una elevación de 2569 msnm. La abrupta topografía, las altas precipitaciones y la intervención humana (tala de bosques y prácticas agrícolas inadecuadas) generan anualmente una importante pérdida de suelo. Por medio del Sistema de información Geográfico IDRISI y utilizando la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE por sus siglas en inglés) se evaluó este fenómeno en la CARL. Se hizo una comparación entre los valores obtenidos para 1973 y el año 2000. Lo anterior permitió evaluar la influencia del factor humano en la generación de sedimentos en la cuenca. Igualmente se efectuó un estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate lo cual permitió definir el factor de entrega de sedimentos de la cuenca.

**Palabras clave:** erosión, IDRISI, Lerma, RUSLE, precipitación, SIG.

### ABSTRACT

Results of several studies of sediment dynamics in the Upper Course of the Lerma river (CARL), are presented in this article. The CARL has a surface of 2117,9 km<sup>2</sup>, upper levels correspond to Toluca Volcano 4560 mosl and lower levels to Jose Antonio Alzate reservoir 2569 mosl. The rugged topography, high rains and human intervention (logging and inappropriate crop practices) are the causes of a high soil loss. Using the IDRISI geographic information system and the revised universal soil loss equation (RUSLE) the soil loss of the CARL basin was evaluated. A comparison between production in 1973 and 2000 was performed. The influence of human factor was unveiled in the production of sediments. Also a bathymetric campaign was developed in the Jose Antonio Alzate at the basin exit which allowed the definition of the sediment delivery ratio of the CARL basin.

**Key words:** erosion, IDRISI, Lerma, RUSLE, precipitation, GIS.

### INTRODUCCIÓN

La cuenca del Curso Alto del río Lerma (CARL, ver figura 1) tiene una importancia particular en el contexto de la república mexicana pues allí nace el río Lerma en cuya cuenca se genera cerca del 20% del PIB (INEGI, 1998) y es por lo tanto una de las más importantes del país. La intervención humana ha acelerado el proceso de pérdida de suelo de la cuenca. Este proceso se presenta de forma natural dadas las características de la zona donde se encuentran fuertes pendientes y altas intensidades de precipitación (Antón y Díaz-Delgado, 2000, Díaz-Delgado *et al.*, 2001). Por lo que el objetivo de la presente investigación fue realizar una evaluación de la pérdida de suelo durante el periodo de operación del embalse José Antonio Alzate el cual acumula la mayor parte de la producción de sedimentos de la CARL. Para el efecto se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, RUSLE (Renard *et al.*, 1997) en conjunto con el paquete de Sistemas de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 2006). De esa manera

se pudo describir de manera espacial como varía el uso y tipo del suelo así como la distribución de los factores climatológicos que afectan la erosión en el CARL. La cuenca ha sufrido un acelerado proceso de desarrollo, urbanización y deforestación lo cual ha afectado la producción de sedimentos. Como consecuencia del temblor del año 1985 hubo un desplazamiento poblacional hacia la CARL. Con el fin de dilucidar el efecto de esta intervención humana se utilizaron imágenes de satélite LANDSAT MSS y ETM de 1973 y del año 2000. Lo anterior permitió definir el cambio en el uso de suelo de la CARL y con ello calcular la producción anual de sedimentos con condiciones para los años 1973 y 2000.

Igualmente durante el verano del año 2004 se efectuó un estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate que se encuentra en el exutorio de la CARL y es por lo tanto un punto de control de la entrega de sedimentos de la cuenca. La relación entre la pérdida de suelo durante la vida útil del embalse (41 años hasta el año 2004) y la acumulación de sedimentos

<sup>1</sup> Centro Interamericano de Recursos del Agua, FI-UAEM, Cerro de Coatepec, CU, Toluca, Edo. de México, 50130, México, e-mail:jagarciaa@uaemex.mx

en el embalse en ese mismo periodo permitió definir la relación de entrega de sedimentos (sediment delivery ratio SDR) en ese periodo.

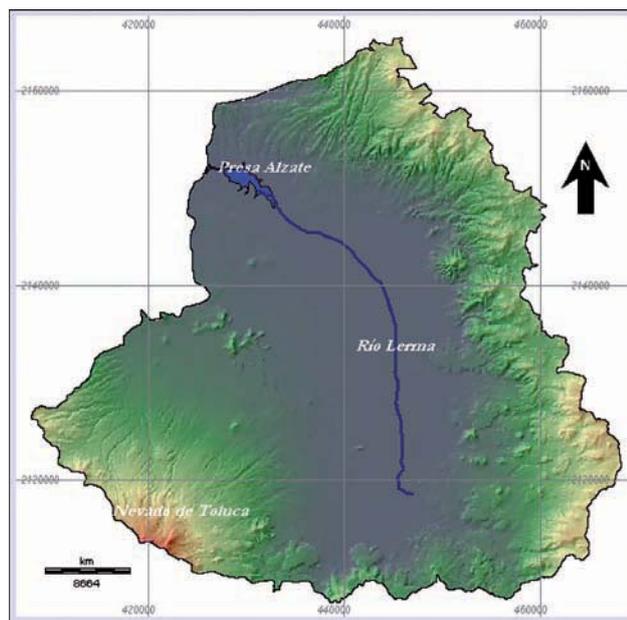


Figura 1. Cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL)

## MATERIALES Y MÉTODO

### A- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

RUSLE contiene la estructura de su predecesor, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE (Wischmeier y Smith, 1978). La ecuación se desarrolló como un método para estimar la pérdida promedio anual de suelo.

La ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) se representa mediante las siguientes variables:

$$A = (R)(K)(L)(S)(C)(P) \quad (1)$$

En donde:

**A**, son las pérdidas de suelo por unidad de área (ton / ha/año).

**R**, es el factor de erosividad por precipitación pluvial. Es la cantidad de lluvia que cae durante un tiempo determinado y de escurrimiento cuando éste es significativo en el periodo bajo estudio [(MJ\*mm) / (ha\*h)]\*año.

**K**, es el factor de erodabilidad del suelo. Se define en función del tipo de suelo, como porcentaje de materia orgánica, estructura, permeabilidad del suelo, porcentaje de limos, arenas y arenas muy finas [(Ton\*h) / (MJ\*mm)].

**L**, es el factor de longitud de pendiente. Es la relación entre la longitud de la pendiente y 22,13 m (longitud de unidad parcela standard).

**S**, es el factor de gradiente de pendiente. Es la relación entre una pendiente de parcela standard 9 % y la pendiente del terreno real en porcentaje.

**C**, es el factor de manejo de cultivos. Corresponde al factor de labranza en relación de un determinado manejo de cultivos, teniendo en cuenta el tipo de cultivo. Valores entre 0 y 1 (adimensional).

**P**, es el factor del método de control de erosión. Representa el factor de prácticas mecánicas de conservación del suelo. Valores entre 0 y 1 (adimensional).

De los datos anteriormente mencionados, unos son atenuantes de la erosión, mientras otros son los que causan y facilitan el proceso erosivo. Dentro de los primeros se encuentran *C* y *P*, los cuales son manejables por el hombre para mitigar la pérdida de suelo y los segundos son *R*, *K*, *L* y *S*.

El factor de erosividad por precipitación pluvial en RUSLE es el índice de erosión de la precipitación pluvial. El factor *R* es una definición de la erosividad como resultado de la precipitación pluvial, y se define como el producto de dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos (Hershfield, 1962). Las cuales se calculan de la siguiente manera: El promedio anual de erosividad se calcula como la suma de la erosividad ( $EI_{30}$ ), que es el producto del total de la energía y la intensidad máxima de 30 minutos de las tormentas individuales. La energía de la tormenta total se relaciona estrechamente con la cantidad de lluvia, y la intensidad máxima de 30 minutos es una medida de intensidad de lluvia máxima. La energía total para una tormenta se calcula empleando la siguiente expresión (USDA – Agricultural Research Service, 2003):

Cálculo de la unidad de energía

$$e = 0,29 \left( 1 - 0,72 \exp(-0,082i) \right) \quad (2)$$

En donde:

*E*, es la unidad de energía (MJ / ha\*mm).

*I*, es la intensidad de lluvia para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm/h)

Índice  $EI_{30}$  (Energía en intervalos) se calcula de la siguiente manera:

$$(EI_{30})_K = (P)_K (e)_K \quad (3)$$

En donde:

$EI_{30}$ , es la erosividad de tormentas individuales [(MJ\*mm) / (ha\*h)].

$P$ , es la precipitación máxima para una duración de treinta minutos con un periodo de retorno de dos años (mm)

$E$ , es la unidad de energía (MJ / ha\*mm)

$K$ , es la estación en estudio.

La erosividad total se calcula con apoyo de la siguiente ecuación:

$$R_j = \frac{\sum_{j=1}^J (EI_{30})_j}{J} \quad (4)$$

En donde:

$R_j$ , es la erosividad durante el año [(MJ\*mm / ha\*h)\*año].

$EI_{30}$ , es la erosividad de tormentas individuales (MJ\*mm / ha\*h).

$j$ , es el índice para cada tormenta.

$J$ , es el número de tormentas por el año.

Para determinar la precipitación de una hora con base en los datos diarios se utilizó el método de Hershfield (1962) el cual arrojó un factor de 0.6. Para obtener la lluvia de duración de treinta minutos y periodo de retorno 2 años, se utilizó la precipitación en una hora y periodo de retorno de 2 años, ( $P_2^{60}$ ) de acuerdo con el método propuesto por Bell (1969).

$$P_T^t = (0,35 \ln T + 0,76) (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_2^{60} \quad (5)$$

En donde:

$P_T^t$ , es la precipitación de duración  $t$  minutos y periodo de retorno  $T$  en años.

$P_2^{60}$ , es la precipitación de duración 60 minutos (una hora) y periodo de retorno 2 años.

Para el factor de erodabilidad del suelo  $K$ , Wischmeier y Smith (1978), establecen que este factor en la ecuación es una descripción cuantitativa experimentalmente determinado por las particularidades del suelo. Depende tanto de su composición como las medidas de la unidad experimental, mencionando que la unidad, parcela, es aproximadamente de 22,13 m<sup>2</sup> con una pendiente del 9 % a lo largo y ancho.

Los suelos de textura áspera, como los suelos arenosos, tienen el valor de  $K$  bajo, debido al poco escurrimiento posible. Para suelos con textura mediana, el valor de  $K$  es moderado, porque son ligeramente susceptibles a la separación y producen un flujo moderado. Los suelos que tienen un alto porcentaje de sedimento fino son en la mayoría erosionables (Wanielista, 1993). Estos se encuentran fácilmente aislados; se localizan en la corteza y producen proporciones altas de flujo. Los valores de  $K$  para estos suelos tienden a ser mayores que 0,30.

**Tabla 1. Indicaciones de la magnitud general del factor  $K$  de erodabilidad de un suelo.**

Clase de Textura	Contenido de materia orgánica		
	0,5 %	2 %	4 %
	K	K	K
Arena	0,05	0,03	0,02
Arena fina	0,16	0,14	0,10
Arena muy fina	0,42	0,36	0,28
Arena migajosa	0,12	0,10	0,08
Arena fina migajosa	0,24	0,20	0,16
Arena muy fina migajosa	0,44	0,38	0,30
Migajón arenoso	0,27	0,24	0,19
Migajón arenoso fino	0,35	0,30	0,24
Migajón arenoso muy fino	0,47	0,41	0,33
Migajón	0,38	0,34	0,29
Migajón limoso	0,48	0,42	0,33
Limo	0,60	0,52	0,42
Migajón arcilloso arenoso	0,27	0,25	0,21
Migajón arcilloso	0,28	0,25	0,21
Migajón arcilloso limoso	0,37	0,32	0,26
Arcilla arenosa	0,14	0,13	0,12
Arcilla limosa	0,25	0,23	0,19
Arcilla		0,13-0,29	

Fuente: Kirkby y Morgan, 1984.

Los efectos de la longitud y del gradiente de la pendiente se representan en RUSLE como  $L$  y  $S$  respectivamente, sin embargo a menudo se evalúan como un factor topográfico único,  $LS$  (Foster y Wischmeier, 1974). La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante para que ocurra la erosión o hasta el punto en que el escurrimiento entra en un canal definido. El factor de la longitud de pendiente se define de la siguiente manera (Kirkby y Morgan, 1984):

$$L = \left( \frac{x}{22,13} \right)^m \quad (6)$$

En donde:

$L$ , es el factor de longitud de pendiente.

$X$ , es la longitud de pendiente, en metros.

$M$ , es un exponente empírico.

Las recomendaciones actuales (Wischmeier y Smith, 1978) para el exponente  $m$  son:  $m = 0,5$  si la pendiente  $\geq 5 \%$ ,  $m = 0,4$  si esta es menor a 5% y mayor

a 3 %,  $m = 0,3$  si es  $\leq 3\%$  y  $\geq 1\%$ , y  $m = 0,2$  si es  $< 1\%$ .

## B. Batimetría del embalse José Antonio Alzate.

El estudio batimétrico del embalse José Antonio Alzate fue realizado con una estación total de topografía durante el periodo de estiaje, donde el embalse se encontraba en sus niveles más bajos. La cuadrilla topográfica que llevó a cabo el estudio utilizó la técnica de una poligonal abierta geográficamente referenciada y la toma de puntos aleatorios que cubrieron satisfactoriamente todo el cuerpo del embalse Alzate. Para las zonas en donde aún se encontraba agua fue necesario utilizar embarcaciones pequeñas para cubrir correctamente todas las zonas del embalse.

Cabe mencionar que también se contó con la topografía original del año de 1959 utilizada para la definición del sitio de construcción de la cortina del embalse Alzate. El análisis de estos dos conjuntos de información batimétrica se llevó a cabo utilizando principalmente el paquete de SIG Idrisi (Eastman, 2006). El plano topográfico de 1959 escala 1:20 000 fue digitalizado y procesado en el paquete de SIG Idrisi con la finalidad de obtener las curvas de capacidad de almacenamiento versus niveles de inundación y área inundada versus elevación del nivel de agua.

La batimetría actual fue directamente obtenida por interpolación lineal con base en las curvas de niveles obtenidas de la cuadrilla de topografía que realizó los trabajos de campo.

Es importante subrayar, que fue necesario llevar a cabo un arduo proceso de ubicación geográfica y de acoplamiento de capas entre las dos temporalidades de la información batimétrica. Lo anterior debido a que el primer plano no contaba con coordenadas geográficas, sino geométricas.

Este proceso de acoplamiento fue realizado dentro del paquete Idrisi con base en el proceso de remuestreo (resample) y considerando la esperanza matemática de la ubicación del cuerpo del embalse con base en los ejes principales de los rasgos morfológicos de las dos batimetrías disponibles, además de considerar la cartografía digital del INEGI (1998) con escala 1:50000 y una imagen de satélite del año 2000 que corresponde al cuerpo del embalse Alzate. Es importante mencionar que el proceso de remuestreo (resample) lleva a cabo una restauración geométrica de las imágenes, especialmente en el caso de las imágenes captadas por sensores remotos las cuales, en su estado crudo, se encuentran sin coordenadas reales. Este proceso se utiliza para georegistrar una imagen o archivo vectorial en un sistema de referencia o en otro archivo. Este proceso toma las coordenadas de una serie de puntos de control en un archivo existente y en el nuevo sistema de referencia deseado, y convierte el archivo al nuevo sistema de referencia por medio de

una función cartográfica polinomial lineal, cuadrática o cúbica. (En el caso de imágenes satelitales, es suficiente un remuestreo simple lineal en la mayoría de las instancias). Con las imágenes satelitales (raster), las celdas de la nueva retícula rara vez coinciden de forma alguna con la retícula original. Por lo tanto, los nuevos valores de las celdas se estiman al remuestrear la retícula anterior (Eastman, 2006).

## RESULTADOS

Bajo el empleo de la técnica de polígonos de Thiessen para obtener las áreas aferentes a cada estación climatológica existente en la cuenca, se calculó el área de influencia correspondiente a cada estación pluviométrica (Tabla 2). Los valores de precipitación para cada estación se tomaron del Sistema ERIC (Quintas *et al.*, 2000).

**Tabla 2. Estaciones pluviométricas del CARL y sus respectivas áreas de influencia.**

Nombre de la estación	Clave Clicom	Área aferente (km <sup>2</sup> )
Almoloja del Río	15004	253,9
Atarasquillo	15011	84,7
Calixtlahuaca	15203	61,1
Capulhuac	15014	52,0
Cerro de la Catedral	MX19	75,3
CNA Gerencia Toluca	15266	69,9
Colonia Álvaro Obregón	15312	74,1
EPCCA	15315	86,1
Observatorio C. N. A.	15370	32,2
Hacienda de La "Y"	15030	35,8
La Marquesa	15045	163,9
Loma Alta	15229	42,6
Mexicalcingo	15056	64,6
Mimiapan	15057	117,2
Nevado de Toluca	15062	81,4
Nueva Oxtotitlán	15211	64,4
Nueva Santa Elena	15063	48,5
San Bernabé	15086	54,5
San Francisco T.	15089	37,0
San José El Contadero	15276	51,3
San Juan de las Huertas	15293	62,8
Temoaya	15119	89,8
Las Trojes	15201	54,9
Santín	SD1	81,9
Zacango	SD2	105,3
San Pedro Techuchulco	15105	74,9
Tenango del Valle	15222	97,5
	Área Total	2117,9

**Tabla 3. Valores del factor de erosividad pluvial (R) para cada polígono de Thiessen.**

Clave Clicom	Nombre de la estación	Área (km <sup>2</sup> )	%	R por Polígono [ MJ*mm/ha*h]
15004	Almoloya del Río	253,9	12,0	235,4
15011	Atarasquillo	84,7	4,0	205,3
15203	Calixtlahuaca	61,1	2,9	193,2
15014	Capulhuac	52,0	2,4	268,2
MX19	Cerro de la Catedral	75,3	3,5	259,4
15266	CNA Gerencia Toluca	69,9	3,3	244,6
15312	Colonia Álvaro Obregón	74,1	3,5	219,8
15315	EPCCA	86,1	4,1	260,2
15370	Observatorio C. N. A.	32,2	1,5	185,3
15030	Hacienda de La "Y"	35,8	1,7	234,3
15045	La Marquesa	163,9	7,7	402,1
15229	Loma Alta	42,6	2,0	179,1
15056	Mexicalcingo	64,6	3,1	216,9
15057	Mimiapan	117,2	5,5	249,6
15062	Nevado de Toluca	81,4	3,8	287,2
15211	Nueva Oxtotitlán	64,4	3,0	167,5
15063	Nueva Santa Elena	48,5	2,3	222,0
15086	San Bernabé	54,5	2,6	271,7
15089	San Francisco T.	37,0	1,7	208,8
15276	San José El Contadero	51,3	2,4	110,2
15293	San Juan de las Huertas	62,8	3,0	195,9
15119	Temoaya	89,8	4,2	260,3
15201	Las Trojes	54,9	2,5	245,8
SD1	Santín	81,9	3,9	225,4
SD2	Zacango	105,3	4,99	221,1
15105	San Pedro Techuchulco	74,9	3,59	223,6
15122	Tenango del Valle	97,5	4,69	194,2
	Suma	2117,9	100,00	

Para definir el factor C de uso de suelo se definieron 5 clases de coberturas (Agricultura, Urbano, Bosques, Cuerpos de agua y Pastizales) en el CARL, a las cuales se les asignó un factor C correspondiente. La tabla 4, muestra los valores de C utilizados. Las figuras 4 y 5 presentan el uso de suelo para el año 1973 y 2000 respectivamente, obtenido mediante clasificación supervisada de las imágenes de satélite Landsat MSS y ETM+ (figuras 2 y 3).

**Tabla 4. Valores (adimensionales) de C utilizados en las estimaciones de pérdida de suelo del CARL.**

Uso de suelo	Agri-cultura	Urba-no	Bos-ques	Cuerpos de agua	Pasti-zales
C	0,110	0,000	0,010	0,000	0,008

Las áreas de erosión encontradas y sus respectivos valores en ton/ha/año, se presentan en las figuras 6 y 7 para los años 1973 y 2000 respectivamente.

La siguiente tabla compara los datos de producción para cada periodo analizado

**Tabla 5. Grados de erosión, extensión y porcentaje en la CARL en 1973**

	Mínima (1-5 ton/ha/año)	Baja (5-10 ton/ha/año)	Mod-erada (10-30 ton/ha/año)	Alta (30-80 ton/ha/año)	Extrema (mayor a 80 ton/ha/año)
Km <sup>2</sup>	1051	125	402	435	103
%	50	6	19	20	5

**Tabla 6. Grados de erosión, extensión y porcentaje en la CARL en 2000**

	Mínima (1-5 ton/ha/año)	Baja (5-10 ton/ha/año)	Mod-erada (10-30 ton/ha/año)	Alta (30-80 ton/ha/año)	Extrema (mayor a 80 ton/ha/año)
Km <sup>2</sup>	1032	107	272	482	224
%	49	5	13	22	11

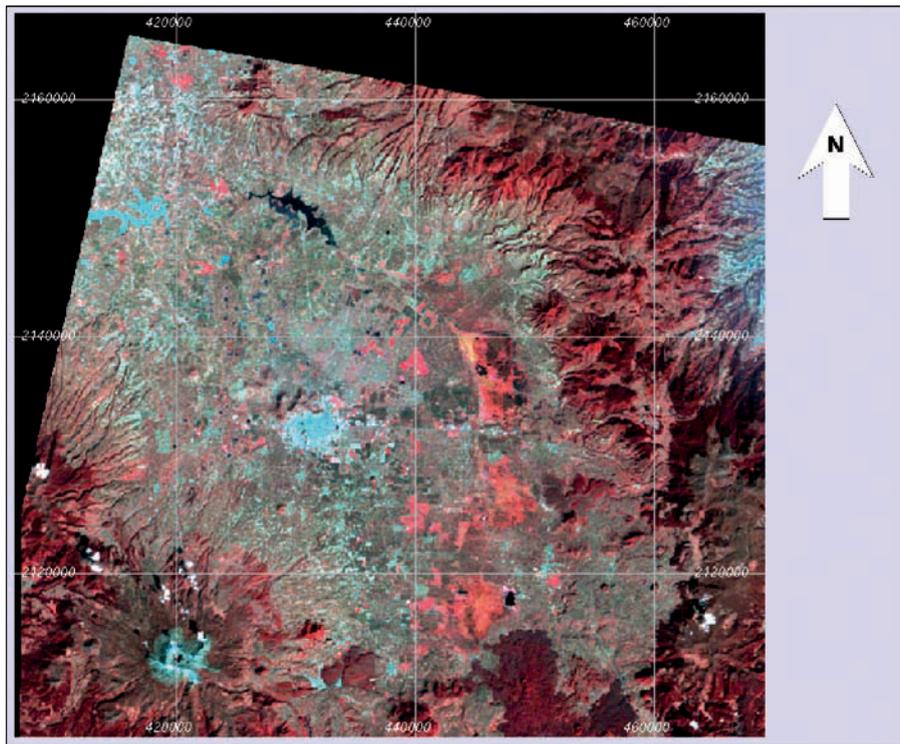


Figura 2. Imagen Landsat MSS de la CARL en 1973.

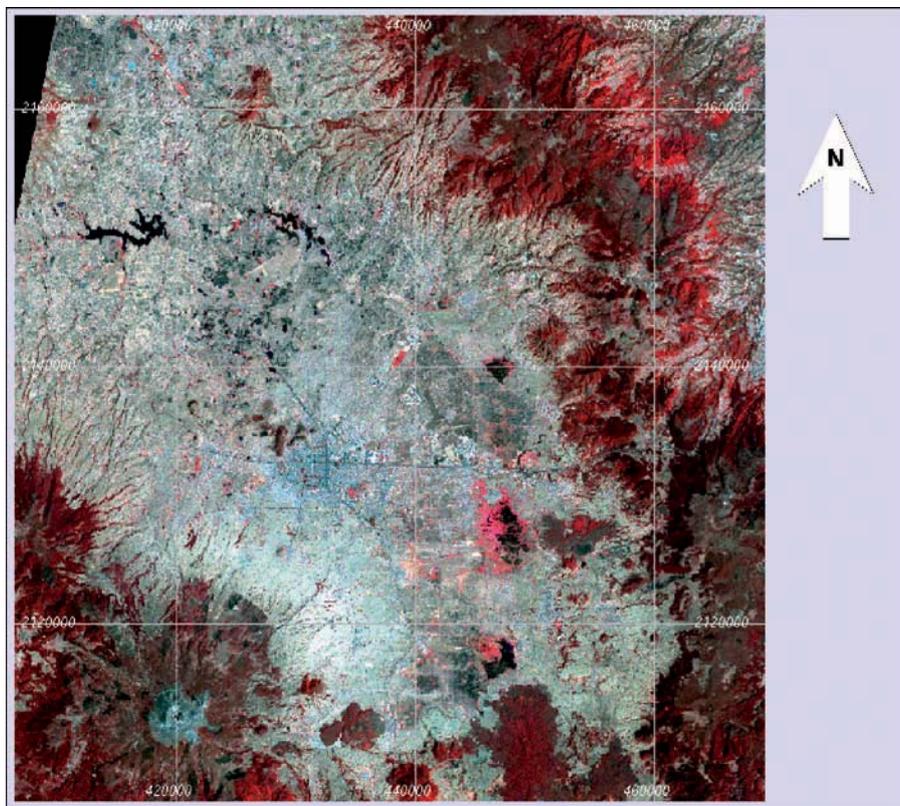


Figura 3. Imagen Landsat ETM de la CARL en el 2000.

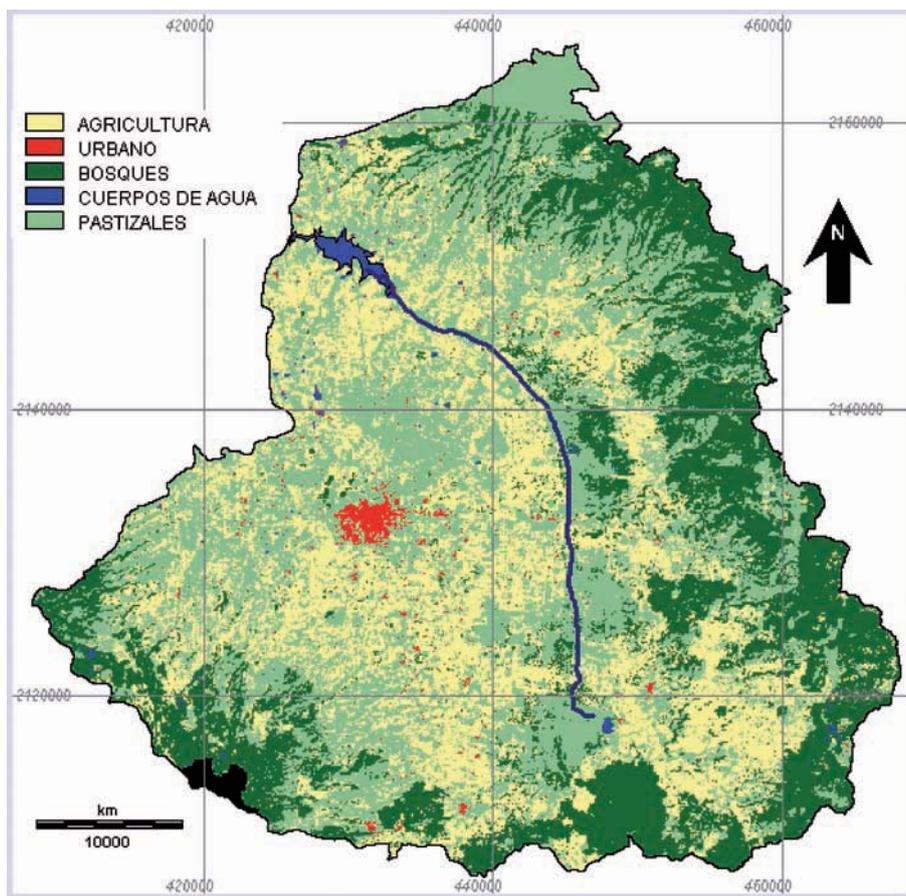


Figura 4. Uso de suelo en la CARL año 1973.

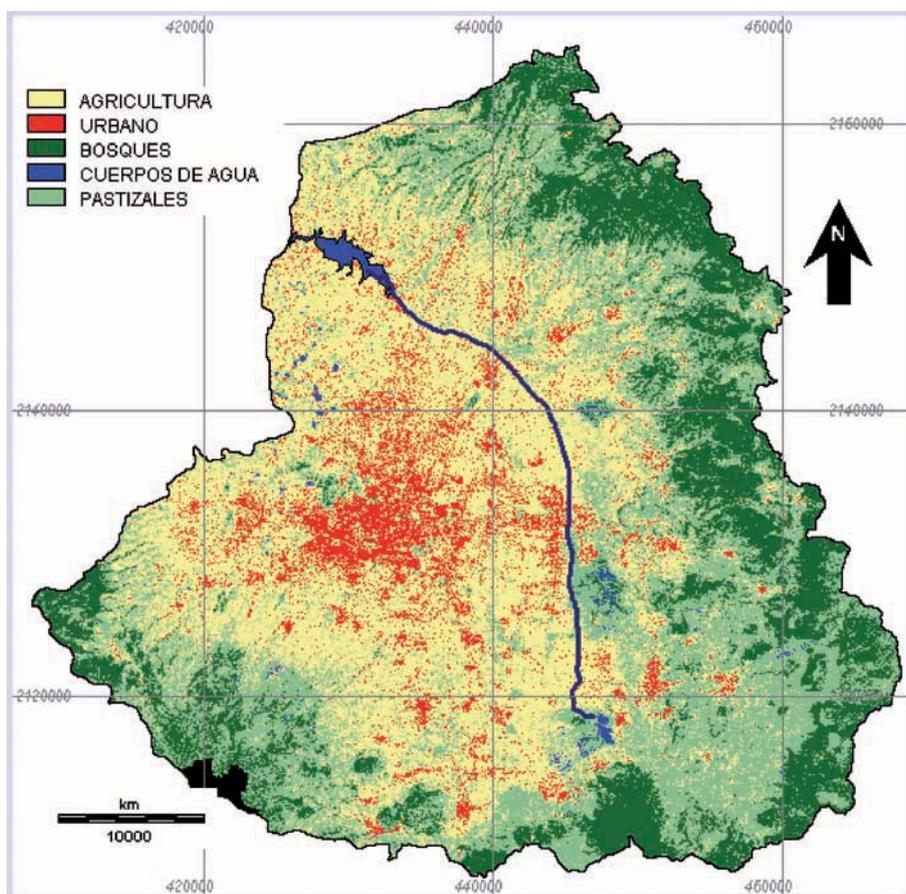


Figura 5. Uso de suelo en la CARL año 2000

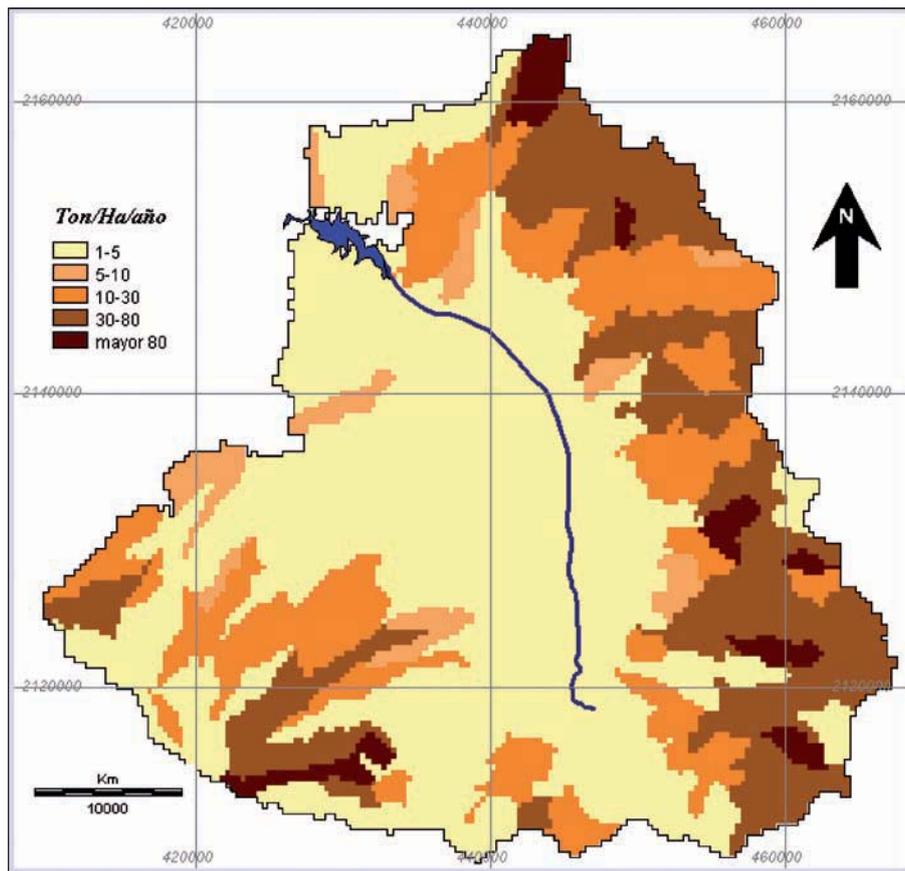


Figura 6. Pérdida de suelo en la CARL en 1973

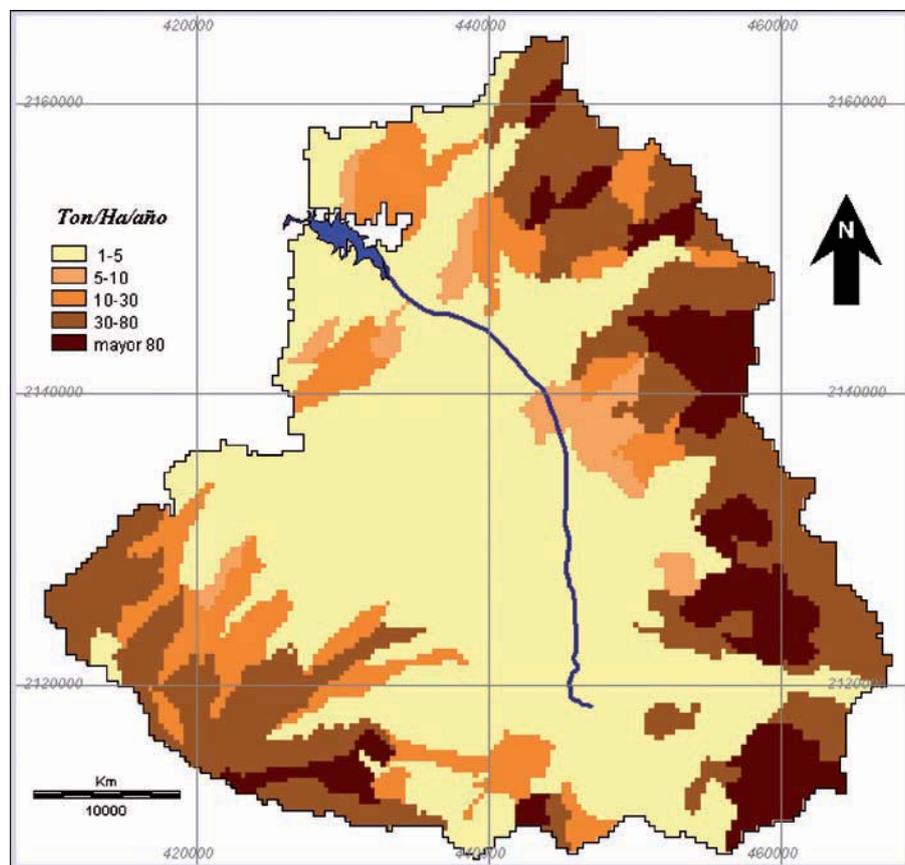


Figura 7. Pérdida de suelo en la CARL en 2000.

En las figuras 6 y 7 y tablas 5 y 6 se puede apreciar un aumento importante (6%) de las áreas de erosión extrema entre 1973 y 2000. La producción total en 1973 es de 4 580 000 ton/año aproximadamente lo que representa un volumen de 1 730 000 m<sup>3</sup>. Mientras que en el año 2000 esa producción se aumentó a 5 770 000 ton/año equivalente a 2 180 000 m<sup>3</sup>. Este aumento en la pérdida de suelo equivale a un 26%.

Para calcular la deposición de sedimentos en la CARL se efectuó un estudio batimétrico en el embalse José Antonio Alzate en el año 2004. Ese embalse capta

la mayor parte de los sedimentos generados en la cuenca. Estudios previos García-Aragón et al. (2006) han estimado una capacidad de retención media anual del embalse José Antonio Alzate de 75%. El volumen encontrado de deposición de sedimentos de acuerdo con la metodología antes descrita utilizando el software IDRISI es de 21 000 000 de m<sup>3</sup> (tabla 3) en 41 años de vida del embalse (1963-2004). La figura 8 presenta las profundidades de los depósitos de sedimentos en las diferentes áreas del embalse y la tabla 3 permite efectuar las comparaciones de volúmenes iniciales y medidos en el año 2004.

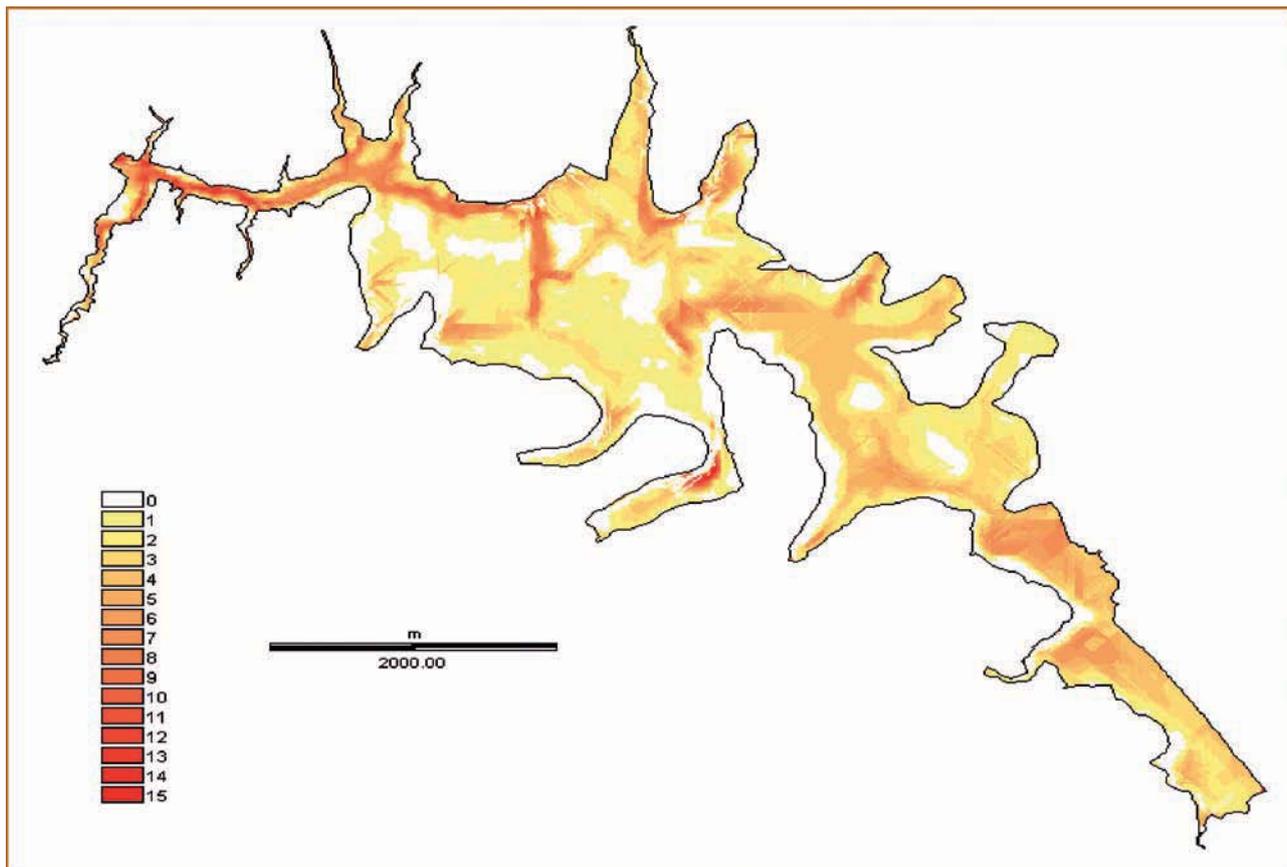


Figura 8. Profundidad de zonas de depósito de sedimentos en el embalse José Antonio Alzate en el año 2004.

Considerando la capacidad de retención del embalse de 75%, el volumen de sedimentos que se depositaron en el embalse más los que salieron del cuerpo de agua es de 28 000 000 m<sup>3</sup> (28 hm<sup>3</sup>).

Para calcular el factor de entrega de sedimentos (SDR por sus siglas en inglés) en la CARL hay que efectuar una estimación de la pérdida total de suelo en los 41 años de funcionamiento del embalse. Para ello se asumió una variación lineal de la pérdida de suelo en base a las dos estimaciones con que se cuenta en este estudio 1973 y 2000. El SDR se calcula como la relación entre el volumen depositado ( $V_{acum}$ ) en esos años en el embalse, afectado por la capacidad de retención (ret) y la sumatoria de los

volúmenes anuales de pérdida de suelo en los 41 años de vida del embalse analizados (ecuación 7)

$$SDR = \frac{V_{acum}}{\sum_{i=1}^{41} V_i} \quad (7)$$

La suma de los volúmenes de pérdida de suelo anual es de 80 000 000 m<sup>3</sup> (80 hm<sup>3</sup>) en los 41 años de vida del embalse, y el volumen acumulado de sedimentos en el embalse se calculó en 21 000 000 m<sup>3</sup> (21 hm<sup>3</sup>) por lo cual el SDR es de 0,35 en la CARL.

**Tabla 7. Características del embalse Alzate originales (1959) y en el año 2004**

Característica	Dato	Área inundada (ha)	Volumen de diseño (hm <sup>3</sup> )	Volumen estimado con uso del SIG (hm <sup>3</sup> )	
				1959	2004
Elevación corona de la cortina	2568,50 (msnm)				
Elevación aguas máximas	2566,92 (msnm)	1423,00	49,00	46,3	25,3
Elevación cresta del vertedor	2565,50 (msnm)	1049,00	35,30	32,6	11,6
Longitud del vertedor	282,00 (m)				
Gasto máximo normal en el vertedor	254,00 (m <sup>3</sup> /s)				
Elevación umbral obra de toma	2558,30 (msnm)	290,00	8,00	6,69	0,56
Gasto máximo normal obra de toma	20,00 (m <sup>3</sup> /s)				

El valor encontrado es relativamente alto, Walling 1983 establece un valor de referencia entre 0, 2 y 0,25 para cuencas grandes. Los estudios sin embargo se refieren a cuencas con poca intervención humana. Este no es el caso para la CARL durante el periodo estudiado.

### CONCLUSIONES

Por medio de técnicas que involucran sistemas de información geográfica (SIG), imágenes de satélite y la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada se ha podido evaluar la pérdida de suelo en la cuenca del Curso Alto del río Lerma durante 41 años de operación del embalse José Antonio Alzate.

Estudios paralelos de medición de azolve en el embalse Alzate permitieron encontrar el volumen acumulado de sedimentos depositados en ese mismo periodo.

Con la conjunción de esa información ha sido posible determinar que el factor de entrega SDR de sedimentos en al CARL es de 0,35. Este factor relativamente alto como reflejo de la intervención humana en la cuenca es de utilidad para estudios futuros de erosión en la CARL.

Es importante mencionar que una limitante del estudio presentado es que no fue posible efectuar verificación de los datos de uso de suelo en el terreno. A pesar de que revisiones en terreno son deseables, se considera que la información presentada es ampliamente suficiente para iniciar la elaboración de planes, programas y proyectos específicos para la mitigación de pérdida de suelo y control de erosión en la Cuenca.

### BIBLIOGRAFÍA

ANTÓN, D. Y DÍAZ-DELGADO, C. 2000. Capítulo 9. "Un Ejemplo de Contaminación de Aguas Superficiales: El Curso Alto del Río Lerma", del libro "Sequía en un Mundo de Agua". Editorial Piriguazú Ediciones, Montevideo, Uruguay. ISBN: 9974-7571-3-4.

BELL F. C. 1969. "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships", Proceedings of the ASCE, Journal Hydraulics Division, Vol. 95, No. Hy1, Paper 6357.

DÍAZ DELGADO, C.; QUENTIN, E.; DELGADO, P.; BÃ, K.; ESTELLER ALBERICH, M. V. 2003. "Atlas Hidrológico Digital del Curso Alto del Río Lerma", Proyecto CGIyEA-UAEM, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), Toluca, México.

EASTMAN, J. R. 2006. "IDRISI Andes, Guide to GIS and image processing", Clark Labs, Clark University, Worcester, Massachusetts, USA, 328 p.

FOSTER, G. R. Y WISCHMEIER, W. H. 1974. "Evaluating Irregular Slopes for Soil Loss Prediction". Trans. Am. Soc. Agric. Engrs, 17: 305-307.

GARCÍA ARAGÓN, J. A.; DÍAZ-DELGADO, C.; QUENTIN, E.; ÁVILA, P.; TEJEDA, S; Y ZARAZUA, G. 2006. Capítulo 17. "Problemática hidrosedimentológica del embalse José Antonio Alzate en el Edo. de México", del libro "La medición de los sedimentos en México" Editores: A. Gutiérrez, P.A. Sánchez, J. Aparicio, J. F. Rivera, L. Díaz, R. Mejía y R. Val ISBN: 968-5536-53-8 México.

HERSHFIELD, D. M. 1962. "Extreme Rainfall Relationships". Proceedings of the ASCE, Journal Hydraulics Division, Vol. 88, No. Hy6 : 73-92.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) 1998. Carta de uso de Suelos.
- KIRKBY, M. J. Y MORGAN R.C.P. 1984. "Erosión de Suelos", LIMUSA, México, P. p. 35-82.
- QUINTAS, I.Y RAMOS, D. 2000. "Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II)", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), México.
- RENARD, K. G.; FOSTER G.; R. WEESIES; MCCOLL G. A. Y YOSER. D. K. 1997. Predicting Soil Erosion by Water. "A Guide to Conservation Planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". USDA, Agricultural Research Service, Agricultural Handbook Number 703.
- SUNDAR, S. S., HONDA, K. Y MURAI, S. 1997. Watershed Prioritization For Soil Conservation Planning With Mos-1 Messr Data, Gis Applications And Socio-Economic Information A Case Study of Tinau Watershed, Nepal. GIS development.net.
- USDA – AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2003. "User's Guide": Revised Universal Soil Loss Equation". Version 2, Washington, D. C.
- WANIELISTA, M. P. Y YOUSEF, Y.A. 1993. "Stormwater Management", John Wiley & Sons Inc., New York, N. Y., 565 p.
- WALLING, D.E. 1983." The sediment delivery problem". Journal of hydrology 65, 209-237.
- WISCHMEIER, W. H. Y SMITH D. D. 1965. "Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland east of the Rocky Mountains", Agriculture Handbook No. 282, ARS-USDA Washington, D. C.
- WISCHMEIER, W. H. Y SMITH D. D. 1978. "Predicting Erosion Losses A. Guide to Conservation Planning", Agriculture Handbook No. 537, USDA Washington, D. C.

## HISTORICAL REVIEW OF TOPOGRAPHICAL FACTOR, LS, OF WATER EROSION MODELS

### REVISIÓN HISTÓRICA DEL FACTOR TOPOGRÁFICO, LS, DE LOS MODELOS DE EROSIÓN HÍDRICA

José L. García Rodríguez<sup>1</sup>, and Martín C. Giménez Suárez<sup>2</sup>,

#### Abstract

This paper summarizes the history of researches, from the empiricism until the present time, carried out on the topographical factor, known as *LS* factor, in reference to Universal Soil Loss Equation (USLE), and its influence on the estimation of water erosion with the use of hydrological models and geographical information systems (GIS).

**Keywords:** *LS* factor, water erosion, topographical factor.

#### Resumen

El presente trabajo resume la historia de las investigaciones, llevadas a cabo sobre el factor topográfico, o mejor conocido como factor, *LS*, en referencia a la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE en inglés), y su influencia en la estimación de la erosión hídrica, así como su integración en modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica (SIG).

**Palabras Claves:** factor *LS*, erosión hídrica, factor topográfico

#### INTRODUCTION

The erosion prediction in experimental plots and hillslopes or the erosion modelling of small basins at the same analysis scale have been successful using physical models that require a detailed parameters measurement and a considerable quantity of input data in many cases, with the purpose of being used in the planning and management of watersheds.

At present, the introduction of digital techniques of cartographic representation (Desmet and Govers, 1996) demands a readaptation of the traditional methods, making more complicated the calculation of the factors implied in the models; among all of them, the topographical factor or *LS* factor (from USLE model) is possibly one of the most questioned ones since their determination demands previous knowledge of the distribution in the space of the different erosive flows whose consequences in fact need to be evaluated (Gisbert Blanquer *et al.*, 2001).

The objective of this paper is to show in a summarized way a historical review of the topographical factor of the water erosion models until our days, and its influence in the water erosion estimation.

#### Material and Methods

##### *History of Soil Research*

Modern soil conservation research, as we know it today has only started in the second part of the 18<sup>th</sup>

century. Ewold Wollny, a German soil scientist, some time between 1880 and 1900 was perhaps the first to initiate scientific investigations of soil erosion. In his experiments, he used small plots to measure the effects of such factors as vegetation and surface mulches in intercepting rainfall and on decline of soil structure. The effects of slope and soil type on runoff and soil erosion were also investigated (Presbitero, 2003).

In 1907, the United States Department of Agriculture (USDA) declared an official policy of land protection which caused that the scientists began to investigate deeply the processes of soil erosion. During this period, 20% of arable lands in the United States were seriously damaged by the erosion.

The famous "Dust Bowl" (Figure 1), when dust storms affected a part of United States, generated the big programs on soil conservation, implemented by the USDA Soil Conservation Service (SCS), created by Hugh Hammond Bennett. In those days, the USDA-SCS had started with "about ten field stations to measure runoff and sediment load" (Roose, 1996). Measurements of runoff and soil erosion begun in 1915, by the U.S. Forest Service in Utah; and two years later, Professor M. F. Miller of the Soil Department at the University of Missouri, pioneered the use of experimental plots in the U. S. A., to measure "runoff and erosion as affected by different farm crops" and rotations (Smith, 1958).

<sup>1</sup> Professor of Hydrology, Department of Forest Engineering, Hydraulics and Hydrology Laboratory, ETSI Montes, Polytechnic University of Madrid, Spain. josel.garcia@upm.es

<sup>2</sup> Forestry Engineer, Department of Forest Engineering, Hydraulics and Hydrology Laboratory, ETSI Montes, Polytechnic University of Madrid, Spain (corresponding author). martincgs@ingenieros.com

With the funds of the United States Congress for erosion research, H. H. Bennett and L. A. Jones of the USDA established ten experimental stations to measure and study the erosion in the more affected areas in the United States during the period 1928 to 1933 (Smith, 1958).

Baver, Borst, Woodburn, Musgrave and Zingg opened the way in the analytic investigations of the processes in the soil erosion in the 30's. The observation plots ranged in size from 2 to 7 m in width and from approximately 10 to 200 m in length. It result with the first empiric equation to estimate soil erosion, introduced by Baver in 1933, and which incorporated dispersion, absorption, soil permeability and soil particles size (Presbitero, 2003).

#### *Investigations Review About Slope Gradient And Slope Length Effect On Water Erosion*

Most investigation activities on soil erosion and their control have been done on relatively flat terrains. Traditionally, steeplands (usually referred to slopes above 20%) were considered for agricultural use, for that reason, the investigation in these slopes has been abandoned. Other investigators like McDonald, Liu and Tang consider slope gradient of 30% as the lower limit to be considered a steepland.

The statistical models used to describe the effect of the slope inclination or gradient (expressed in either *sin* of the slope angle or percent slope) in the soil loss caused on hillsides by rainfall and runoff, can adopt the lineal, power or polynomial forms (Liu, Nearing and Risse, 1994). Liu, Nearing and Risse (1994) found that within the slope gradient range of up to about 25%, all these functional forms of soil loss predictive equations provide quite similar values, but they become different beyond this slope gradient.

Using field inspections in 1936, Renner carried out the pioneering investigation on the effects of slope inclination (without considering the slope longitude), aspect, soil, vegetation type and density, and accessibility to livestock, on the soil erosion on the rangelands of Boise River watersheds (USA). The maximum effect of slope steepness was found at about 35% slope (here, slope percent is defined as  $100 \tan \theta$  where  $\theta$  is the slope angle in degrees). Inaccessibility to grazing animals was identified as the most likely reason for the decrease in soil erosion beyond the 35% slope (Presbitero, 2003). For superficial flow, in 1945, Horton developed a relationship between slope length, slope gradient and soil surface shearing force. With slope gradient defined as  $\tan \theta$  ( $\theta$  is the slope angle in degrees), the developed relationship predicted maximum soil loss at 30° slope, and which was assumed as zero at 90° slope. However, when  $\sin \theta$  was adopted as the definition for the slope gradient, the predicted maximum soil loss occurred at 90° slope.

Zingg (1940) analyzed simulated rainfall data, on crop lands of clay and sand from Kansas and on clay from

Alabama, (USA) was observed, in both situations, that the soil loss varied with the slope gradient (up to 20%) to the 1.49 power. However, gathered data from soil erosion plots of loam in Bethany, Missouri, USA (2.4m and 4.8m of length per 1.1 m of width on slopes of 4%, 8% and 12%) showed that the soil loss varied with the slope to the 1.37 power. Finally, Zingg recommended the following relationship:

$$A \approx \lambda^{0.6} s^{1.4} \quad (1)$$

Where  $A$  is the mean soil loss per unit area,  $\lambda$  is the slope length and  $s$  is the percent slope defined as  $100 \tan \theta$  where  $\theta$  is the slope angle in degrees. Zingg's equation was a pioneering attempt to express mathematically the relationship between soil erosion and topographic effects. On the other hand, a disadvantage of Zingg's slope steepness evaluation, was that the soil losses from slope gradients of 0 and, between 0 and 4% were zero in the first case and for the second, the values were directly underestimated. The constant of proportionality for Zingg's relationship combined the effects of rainfall, soil crop and management. Zingg is "often credited as the developer of the first erosion prediction equation" (Presbitero, 2003).

Alternatively, an investigation committee headed by Musgrave (1947) suggested an equation for the effect of the slope inclination on soil loss in the general form:

$$A = a + bs^n \quad (2)$$

Where  $s$  is the slope inclination,  $a$ ,  $b$  and  $n$  ( $n \approx 1.35$  and the slope length factor exponent is 0.35) are constants which are functions of rainfall intensity, soil and cover.

Using the form equation recommended by Musgrave (1947), Smith and Whitt (1948) analyzed the soil loss data gathered by Neal in 1938 from laboratory plots of 3.7 m per 1.1 m on a slope inclination of approximately 16 %, under simulated rainfall, and derived the following relationship:

$$A \approx 0.025 + 0.052 s^{4/3} \quad (3)$$

Before, Neal (1938) after analyzing the soil loss data from Putnam soil (USA) concluded that the soil loss from saturated soils, varied with the slope to the 0.7 power.

Around 1957, a considerable quantity of soil loss data from several croplands, were already available. Smith and Wischmeier (1957) could identify a parabolic equation that fit the seventeen years of data gathered from natural rainfall soil erosion plots (11.1 m and 22.1 m of length, and 4.3m of width), on slopes of 3%, 8%, 13% and 18% on a Lafayette mixed silts

soil in the experimental station of LaCross in Wisconsin. The equation was:

$$A \approx 0.0650 + 0.0453s + 0.00650s^2 \quad (4)$$

In addition, the gathered data from the artificial rainfall studies from Bethany, Missouri (Zingg, 1940) and, from the natural rainfall studies on two hillsides at Dixon Springs in Illinois and at Zanesville in Ohio (both in USA), were used to validate the relationship from LaCross experiment station. The following parabolic form was obtained, when all these soil data were combined:

$$A \approx 0.43 + 0.30s + 0.043s^2 \quad (5)$$

Smith and Wischmeier (1957) analyzed slope length, gathered soil loss data from 136 l, arrived to the following power form:

$$A \approx \lambda^m \quad (6)$$

Where,  $\lambda$  is the slope length and  $m$  is the fitted regression constant, with means values ranging from 0 to 0.9, with a mean for location of 0.46 (Presbitero, 2003).

In the U.S.D.A. Agriculture Handbook 282, Wischmeier and Smith (1965) detailed the use of the Universal Equation of Loss of Soil (USLE). Combining equations 5 and 6 the following relationship of slope length (expressed as function of  $\lambda$ ) and slope inclination (expressed as function of  $s$ ) resulted:

$$A \approx \lambda^{0.5} \frac{(0.43 + 0.3s + 0.043s^2)}{6.613} \quad (7)$$

The USLE factor was originally developed from soil erosion plots of less than 122m slope length with undisturbed medium textured agricultural soil of slope gradients that ranged from 3% to 18% under field condition and natural rainfall (McCool *et al.*, 1987), however, Wischmeier and Smith (1978) modified equation 7, after noting the increased use of USLE under extrapolated conditions like on steeper slopes of rangeland, by analyzing the soil loss data gathered from Fayette soil under crop production in Wisconsin (USA), to reduce the effect of slope steepness  $S$  factor, (expressed as function of  $\sin \theta$ ) on predicted soil loss (Presbitero, 2003):

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.0654) \quad (8)$$

Where,  $LS$ , slope length and slope steepness factor relative to a 22.13 m slope length soil erosion plot of uniform 9% slope gradient,  $\lambda$ , is the slope inclination and  $m$ , defined previously, is equivalent to 0.5 for  $s > 5\%$ , 0.4 for  $3\% < s \leq 5\%$ , 0.3 for  $1\% < s \leq 3\%$ , y 0.2 for  $s \leq 1\%$ .

The main difference between equations 7 and 8 was the change in the definition of the percent slope  $s$ , from  $100 \tan \theta$  a  $100 \sin \theta$  (Presbitero, 2003). Such redefinition of  $s$  was in accordance with the expected relationship for the shear force at the surface flow boundary (Chow, 1959) i.e.,  $\tau = \gamma R \sin \theta$ , where  $\tau$  is the shear force at the surface flow boundary,  $\gamma$ , is the specific weight (i.e., "weight density" equal to  $9.81 (10)^3 \text{ N/m}^3$ ) of runoff water and  $R$  is the hydraulic radius.

Values of predicted soil loss using either the  $\sin$  function or  $\tan$  function for slope angles of less than 20 % are almost the same; hence, the change has an insignificant effect. However, at slope gradient bigger than 20%, there is an initial rapid increase in the tangent of slope angle, which culminates to an infinite value for a vertical slope, while the  $\sin$  of slope angle approaches unity. In slope inclination of 50%, the change from  $\tan$  to  $\sin$  reduces  $S$  factor in the USLE, in an order of magnitude approximately from 19 to 15. Unluckily, for that kind of slopes inclinations, there are insufficient available experimental data, to validate some of these values. However, in a study at Utah State University Water Research Laboratory (UWRL), the same result took place at slopes  $< 84\%$ .

Combining all researches done by Zingg (1940), Musgrave (1947), Smith and Whitt (1948) and, Wischmeier and Smith (1965) the result is the following expression for  $LS$  factor:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \left( \frac{\sin \theta}{\sin 5.143^\circ} \right)^n \quad (9)$$

Where  $\lambda$ ,  $m$ , y  $\theta$  have been defined previously; and  $n$ , is a fitted regression coefficient.

The use of the constants 22.13 and  $\sin 5.143^\circ$  in the denominator normalizes the relationship to a 22.13m long soil erosion plot on a  $5.143^\circ$  slope i.e., "USLE unit plot condition". In a new effort to revise the relationship for the  $S$  factor in the USLE, McCool *et al.* (1987) derived two relationships for moderate slopes ( $s < 9\%$ ) and steeper slopes ( $s \geq 9\%$ ) i.e.:

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03^\circ \text{ for } s < 9\% \quad (10)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5^\circ \text{ for } s \geq 9\% \quad (11)$$

The equation 10 was obtained from gathered data in the study made by Murphree and Mutchler in 1981 mentioned in Presbitero (2003) in Fayette and Dubbs silt soils under natural rainfall and simulated rainfall, respectively, on slopes ranging from 0.1% to 3%. From a new analysis of Fayette soil loss data from field soil erosion plots on slopes up to 18% in LaCross experiment station at Wisconsin (USA), was obtained equation 11 (Presbitero, 2003).

The equations 10 and 11 are included in RUSLE. The values of estimated soil loss are similar for both the USLE and RUSLE from slope gradients less than

20%, but when the slope is increased, computed soil loss from RUSLE is only half of the USLE (Renard *et al.*, 1997).

On the other hand, in 1986, Danish Hydraulic Institute found that the interrill erosion rate is exempted from the effect of slope for slope gradient of even less than 5%. If the critical slope is exceeded, begins rill erosion, resulting finally into fast increment in the total soil loss with increasing slope gradients (Presbitero, 2003).

Using natural soil erosion plots under agricultural management from three sites in the Yellow River loess plateau of mainland China, Liu, Nearing and Risse (1994) presented soil loss data, for slopes ranging from 9% to 55% and found that S was linearly related to the *sin* of the slope angle of the form:

$$S = 21.91 \sin \theta - 0.96 \quad (12)$$

With the S factor in equations 11 and 12 normalized to a 9% slope gradient, equation 12 resulted in a superior value of S than computed by the equation 11 (RUSLE), but still low compared with the value calculated by USLE, at least for the range of slope steepness studied by Liu, Nearing and Risse (1994) i.e., for slope gradient bigger than about 22%.

USLE does not apply to slope lengths shorter than approximately 4m (Foster *et al.*, 1981), because for such slope lengths, soil loss can be attributed mainly to interrill erosion (raindrop impact and where runoff simply discharges at the end of the slope), with rill erosion being negligible (Presbitero, 2003). Consequently, the equations 8, 10 and 11 were developed from soil erosion plots 22.13m in length and can not be applied to any slope gradient if slope length is <4m (McCool *et al.*, 1987). On the other hand, Foster *et al.* (1981) recommended, for any slope gradient with a length of <4m, the derived equation, in 1974, by Lattanzi, Meyer and Baumgardner for estimating interrill erosion of the form:

$$S = 3 \sin^{0.8} \theta + 0.56 \quad (13)$$

For this last erosion experiment, a 0.61 m slope length under simulated rainfall was used. The equation 13 was confirmed by studies made by Singer and Blackard in 1982, Evett and Dutt in 1985 and Rubio-Montoya and Brown in 1984.

The modification for complex terrain and GIS is described as RUSLE3D. (Mitasova *et al.*, 2010 [online]).

#### Spatial Modelling With Rusle3d

At present time, the models of hydrological processes spatially distributed, have been developed to incorporate the space patterns of terrain, soils, and vegetation with the use of remote sensors and GIS

(Band *et al.*, 1991; Star *et al.*, 1997). This approach makes use of several algorithms to extract and represent basin structure from digital elevation data.

In the 80s it was considered that the implementation of the LS factor was unfeasible in watersheds, since the variation of the slope length,  $\lambda$ , is a difficult parameter to represent on such a scale of work.

Revised USLE - RUSLE uses the same empirical principles as USLE, however it includes numerous improvements, such as monthly factors, incorporation of the influence of profile convexity/concavity using segmentation of irregular slopes, and improved empirical equations for the computation of LS factor (Renard *et al.*, 1997).

To incorporate the impact of flow convergence (Fig. 2), the slope length factor,  $\lambda$ , was replaced by upslope contributing area, A (Moore and Burch, 1986). The modified equation for computation of the LS factor in finite difference form in a grid cell representing a hillslope segment was derived by Desmet and Govers (1996). A simpler, continuous form of the equation for computation of the LS factor at a point  $r=(x,y)$  on a hillslope, is (Mitasova *et al.*, 1996):

$$LS(r) = (m+1) \left[ \frac{A_s(r)}{22,13} \right]^m \left[ \frac{\text{sen } b(r)}{\text{sen } 5,143^\circ} \right]^n \quad (14)$$

Where  $A_s$  [m] is the specific catchment area and is the upslope contributing area, A, divided by the contour width which is assumed to equal the width of a grid cell.  $b$  [deg] is the slope,  $m$  and  $n$  are parameters for a specific prevailing type of flow and soil conditions, and 22.13 m (72.6 ft) is the length and  $0.09 = 9\% = 5.143$  deg is the slope of the standard USLE plot.

The Figure 3 shows the results of the comparison of the estimation of the LS factor using slope length,  $\lambda$ , on the left, and on the right, using the upslope contributing area, A, in each point in particular (Moore & Burch, 1986). We can observe an overestimation in the values of the factor LS, when it is calculated in the traditional way (left figure). LS values decrease when is estimating with A.

The problem of an overestimation of erosive power is solved at the top or at the beginning of hillsides and concentrated on streams.

#### CONCLUSIONS

This manuscript attempts to summarize the research history of topographical factor, represented by the LS factor, of water erosion models.

The manuscript shows the difficulty of slope length evaluation,  $\lambda$ , and the intention of different approaches to interpret it. For this reason, in most of the research projects evaluating water erosion, an average or theoretical slope length value is assumed for the entire basin.

This allows to move a step forward and recommend the use of upslope contributing area concept instead of slope length( $\lambda$ ), as proposed in the hydrological models like RUSLE3D (Mitasova *et al.*, 2010 [online]).

## REFERENCES

- Band, L. E., Peterson D. L., Running S. W., Coughlan J. C., Lammers R. B., Dungan J., And Nemani R. 1991. Forest Ecosystem Processes at the Watershed Scale: Basis for Distributed Simulation, Ecology Modelling, 56, 151-176.
- Desmet, P. J. J. And Govers, G. 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor On Topographically Complex Landscapes Units. Journal of Soil and Water Conservation 51 427-433
- Foster, G. R., , L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laften And Young R. A. 1981. Estimating erosion and sediment from field-sized areas , Trans. ASAE 24, 1253-1262.
- Gisbert Blanquer J.M.; Ibáñez Asensio S.; Andrés Aznar G. And Marquéz Mateu A. 2008. Estudio Comparativo de Diferentes Métodos de Cálculo del Factor LS para la Estimación de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica. Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo. Edafología, vol 8 - nº 2 Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología, Universidad de Santiago de Compostela, Spain. [In Spanish]
- Liu, B. Y., Nearing, M.A. And Risse, L. M. 1940. Slope Gradient Effects on Soil Loss for Steep Slopes. Trans ASAE 37, 1835-1840.
- Mccool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. And Meyer, L. D. 1987. Revised Slope Steepness Factor for the USLE. USA.
- Mitasova, H. 1996. GIS Tools for Erosion/Deposition Modelling and Multidimensional Visualization. Part III: Process based erosion simulation. Geographic Modelling and Systems Laboratory, University of Illinois. USA,
- Mitasova H., Brown W. M., Hohmann M. And Warren S. 2010 [on line]. Using soil erosion modelling for improved conservation planning: A GIS-based Tutorial Geographic Modelling Systems Lab. UIUC., <http://skagit.meas.ncsu.edu>
- Moore. I. D. Y Burch G. J. 1986. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. Trans ASAE, 29 1624-1630, 1640.
- Musgrave, G. W. 1947. The Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion- A First Approximation. Journal Soil Conservation, 321-327, UK.
- Presbitero A. L. 2003. Soil Erosion Studies on Steep Slopes of Humid-Tropic Philippines. School of Environmental Studies, Nathan Campus, Griffith University, Queensland. Australia,
- Renard, K. G., Foster G. R., Weesies G. A., Mccool D. K. And Yoder D. C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation. US Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Agricultural Handbook 703. USA,
- Smith, D. D. & Wischmeier, W. H. 1957. Factors Affecting Sheet and Rill Erosion. Trans. Amer.. Geophys. Union, 38 (6), 889-896.
- Smith, D. D. 1958. Factors Affecting Rainfall Erosion and their Evaluation. International Association of Scientific Hydrology Pub, 43, 97-107.
- Star, J. L., Estes J. E., And Mcgwire K. C. 1997. Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing, Cambridge University Press, Cambridge, UK,
- Roose E. 1996. Land Husbandry-Components and Strategy. FAO soils, bulletin 70.
- Smith, D. D. And Whitt, D. M. 1948. Estimating Soil Losses from Field Areas. Ag. Eng., 29, 394-396.
- Wikipedia. (2006) Dust bowl pictures. Available from [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. 1965. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East Of The Rocky Mountains: A Guide For Selection Of Practices For Soil And Water Conservation. Agriculture Handbook 282. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. USA
- Wischmeier, W.H. & Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning. Agriculture Handbook (AH) 537. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, DC. USA
- Zingg, A. W. 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. Agric. Eng., 21(2), 59-64.



Figure 1. Dust storm in Texas in 1935 (Wikipedia, 2006)

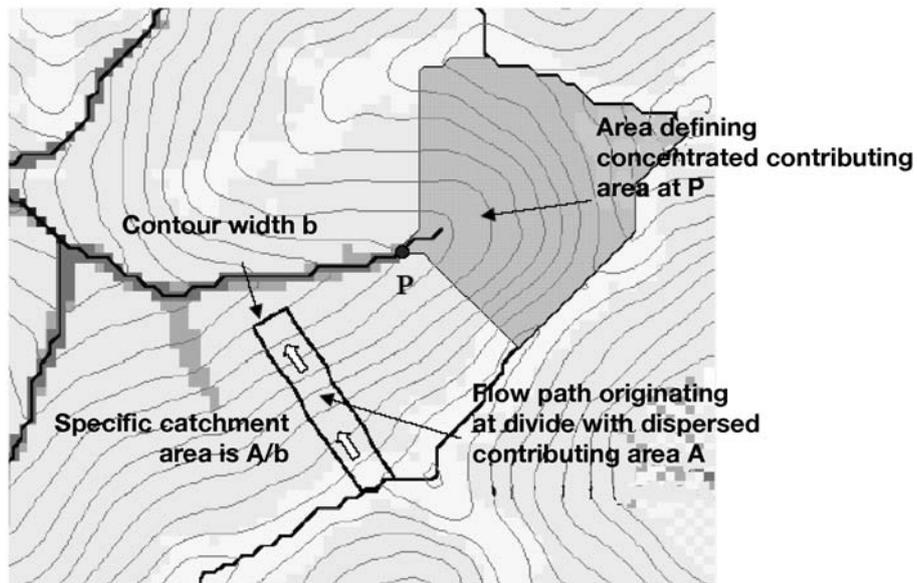


Figure 2. The concept of upslope contributing area is shown graphically in shady. From Tarboton and Ames, 2001.

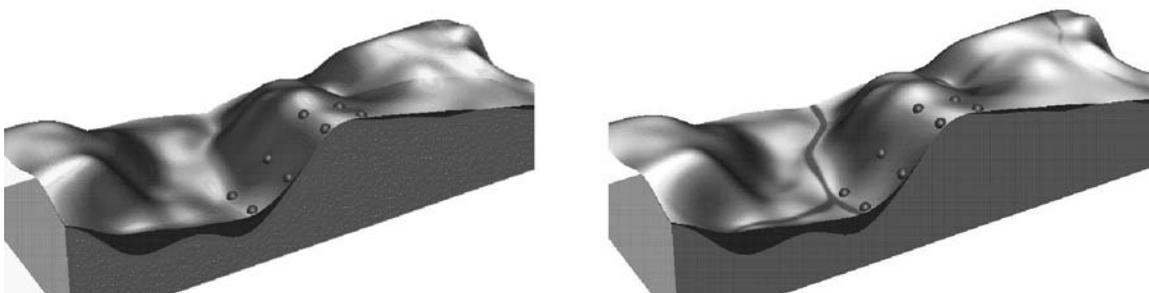


Figure 3. Visual comparison of the calculation of water erosion, according to whether this is determined using the slope length ( $\lambda$ ) with the RUSLE model (Left Fig.) or the upslope contributing area, A, with RUSLE3D model (right Fig.). From Mitsova et al., 2010 [on-line].

## ANÁLISIS DE LA ADECUACIÓN DE LAS ACCIONES RESTAURADORAS EFECTUADAS EN EL CONO DE SEDIMENTACIÓN DE UN CURSO TORRENCIAL, ANTE LA INCIDENCIA EN EL MISMO DE EVENTOS EXTRAORDINARIOS DURANTE EL INVIERNO DE 2009-10

### ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF THE RESTORING ACTIONS APPLIED TO A SEDIMENTATION FAN OF A TORRENTIAL STREAM, DURING THE EXTREME RAINFALL EVENTS OCCURRED DURING THE WINTER 2009-2010

Juan A. Mintegui Aguirre<sup>1</sup>, José C. Robredo Sánchez, Pablo Huelin Rueda y Carlos de Gonzalo Aranoa

#### RESUMEN

Se analiza el comportamiento de la restauración del tramo final del arroyo del Partido, un curso torrencial que vierte a la marisma del Parque Nacional de Doñana, espacio declarado por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad, cerca de la población de El Rocío, provincia de Huelva, en el extremo suroeste de España, tras la ocurrencia en la zona entre el 20-12-2009 y el 5-02-2010 de seis eventos torrenciales extraordinarios, del mismo rango que los utilizados como hipótesis de partida para redactar el proyecto restaurador, el cual constituye la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005. Con el proyecto restaurador se pretendió mantener la estabilidad en los límites de la marisma, mediante el control de las avenidas del citado arroyo en el paraje en cuestión. Con el análisis planteado se espera adquirir un conocimiento práctico del grado de cumplimiento de los objetivos de la Actuación núm. 3, e indagar en los efectos secundarios que la misma pueda causar en el territorio hasta donde alcanzara su influencia; pues tratándose de fenómenos torrenciales las soluciones definitivas solo se consiguen tras una adaptación del medio a los mismos; lo que exige mantener un continuo seguimiento de las acciones emprendidas.

**Palabras clave:** sistema de control de avenidas, impacto sobre actuaciones, restauración hidrológica, recuperación ecológica.

#### SUMMARY

In this paper it is presented a performance analysis of the restoration actions conducted at the lower reach of the El Partido stream, a torrential watercourse flowing into the Doñana National Park marshes –declared UNESCO Heritage site–, at El Rocío village, Huelva (extreme SW of Spain). The analysis is based on six extreme torrential events occurred between 20th Dec 2009 and 5th Feb 2010. These torrential events ranged over the same flow rates as those used as starting hypothesis to draft the restorer project (the Action num. 3 of the project Doñana 2005). The aim of this restoration project was to maintain the steadiness of the limits of the marsh, by controlling the flow rates getting to the lower reach of the aforementioned stream. With this analysis it is intended to acquire a practical knowledge of the degree of fulfilment of the project objectives, and to investigate the secondary effects occurred across the territory; since regarding torrential phenomena the definitive solutions are only achieved by an environment adaptation to them; which requires a continuous monitoring of the actions undertaken.

**Key words:** flood control system, actions impact, hydrologic restoration, ecologic recovery

#### INTRODUCCIÓN

El arroyo del Partido es un pequeño curso de carácter torrencial de 39 Km. de longitud y 307,67 km<sup>2</sup> de cuenca vertiente, que descarga a la marisma del Parque Nacional de Doñana cerca de la población de El Rocío, en la provincia de Huelva situada en el extremo suroeste de España. El PND es un espacio declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (1994), que sirve de tránsito a las aves migratorias entre el Norte de Europa y el Continente Africano. En 1981 el tramo final del arroyo fue objeto

de un encauzamiento, coincidiendo con un plan de puesta en cultivo del área dominada de su cuenca; lo que causó que el tramo canalizado funcionara como la prolongación de la garganta del curso torrencial, alterando la morfología inicial del arroyo y causando un nuevo cono de sedimentación de grandes proporciones (4,3 Km<sup>2</sup> de superficie y 4,48 millones de m<sup>3</sup> de volumen) en el interior de la marisma del PND (Sendra, 2002; Mao, 2005; Mintegui et al., 2006).

Entre 1995-2003 se realizaron varias investigaciones sobre dicho proceso y durante el verano de

<sup>1</sup> Unidad de Hidráulica e Hidrología, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid (España), Tel. +34 91 3367118, juanangel.mintegui@upm.es

2006, en el marco de un amplio programa de Recuperación Hídrica de la marisma del PND conocido como Proyecto Doñana 2005 (Saura et al., 2001), se ejecutó un sistema hidráulico para el control de las avenidas en el arroyo en cuestión y la restauración de su primitivo cono de sedimentación, a través de la Actuación núm. 3 del citado Proyecto. En los tres años siguientes 2006-09 se efectuó un Seguimiento al mencionado sistema hidráulico, lo que permitió realizar algunas rectificaciones al mismo, para mejorar el grado cumplimiento de los objetivos de la Actuación núm. 3 (Mintegui et al., 2009). Pero hasta el invierno del presente año hidrológico 2009-10 no han tenido lugar en este paraje unos eventos torrenciales extraordinarios, que confirmaran la adecuación de las medidas adoptadas.

## OBJETIVO

El propósito de este artículo es analizar el comportamiento de las acciones (obras y disposiciones adoptadas sobre el terreno) ejecutadas sobre el antiguo cono de sedimentación del arroyo del Partido con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, utilizando de referencia seis eventos torrenciales extraordinarios acaecidos durante el invierno del año hidrológico 2009-10, que presentan una gran aproximación a las condiciones de cálculo con las que se concibió el proyecto; para tener un conocimiento práctico del grado de cumplimiento de sus objetivos, es decir, de los aspectos positivos conseguidos, y para percatarse también de las situaciones problemáticas que lo realizado en el territorio con la Actuación núm. 3 ha generado; pues siempre que se trate de fenómenos torrenciales, se debe insistir que no caben soluciones definitivas; sino una adaptación a ellos, que se adecue a las necesidades de uso del territorio; lo que sólo resulta posible con un seguimiento de lo realizado.

## METODOLOGÍA

### **Esquema y explicación del funcionamiento previsto para sistema hidráulico de control de avenidas realizado en el verano de 2006 en el tramo final del arroyo del Partido**

El primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido obligaba a sus avenidas a expansionarse antes de alcanzar la marisma del PND, causando con ello: a) su laminación, b) una pérdida de carga en las mismas y c) el depósito de gran parte de los materiales que transportaban hasta el lugar. Con el sistema hidráulico planteado con la Actuación núm. 3 se pretendió conseguir los mismos efectos (Mintegui et al. 2010); por lo que se estableció un área de inundación-laminación-sedimentación que ocupara una parte importante de la superficie que constituía el primitivo cono de sedimentación del citado arroyo con anterioridad a 1981. Dicha área se ubicó en el margen izquierdo del arroyo del Partido, comprendida

entre su cauce y la de otro arroyo conocido por la Cañada del Pinar que discurre al este del mismo; su superficie presenta una ligera pendiente hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y el control de la inundación en ella se realiza a partir de dos diques. El primero, Dique 1, actúa como director del sistema hidráulico planteado y se ubica en el arroyo del Partido en un emplazamiento próximo al inicio de su primitivo cono de sedimentación; tiene dos vertederos, uno frontal al propio arroyo que permite el paso de una pequeña parte de las avenidas aguas abajo del mismo, y otro lateral que desvía el grueso de las avenidas hacia el área de inundación-laminación-sedimentación establecida. El segundo, Dique 2, está situado en el arroyo de la Cañada del Pinar y sus cometidos son mantener el régimen subcrítico aguas arriba del mismo y regular el caudal vertiente directo al arroyo de la Cañada del Pinar, asegurando con ello la expansión de las avenidas por el área de inundación (Figura 1); a la cual le atraviesa un camino asfaltado que enlaza las poblaciones de El Rocío, situada al borde la marisma del PND, y Villamanrique que se encuentra al este de la anterior, fuera de los límites de la cuenca vertiente del arroyo del Partido. Se previó que en avenidas máximas éstas podrían verter por encima del mencionado camino asfaltado.

Tras los periodos lluviosos de los años 2007-08 se comprobó que el diseño dado al Dique 1 en el verano de 2006, aunque resultaba eficiente ante avenidas extraordinarias del arroyo del Partido, no evitaba problemas menores por inundación y deposición de sedimentos en el entorno oriental de la población de El Rocío, ni solucionaba la definitiva estabilización del nuevo cono de sedimentación del arroyo formado sobre la marisma; porque los caudales normales que llegaban hasta ella aún resultaban elevados. Por otra parte, las avenidas del arroyo del Partido no causaban la inundación proyectada en el área destinada al efecto. Ante estas circunstancias, como paso previo a la ejecución de las rectificaciones necesarias en el Dique 1, se determinaron las curvas de gasto teóricas del sistema de control de las avenidas del arroyo del Partido establecido con los Diques 1 y 2.

Como en adelante se utiliza el concepto de caudal de avenida asociado al sistema de control del arroyo del Partido, se define éste por el caudal punta de avenida en la hipotética sección que agruparía a los perfiles de vertido de los Diques 1 y 2, englobando por tanto a las cuencas de los dos cauces (el arroyo del Partido y el arroyo de la Cañada del Pinar) y en la situación anterior a la laminación que experimente el sistema analizado. En la práctica se asimila con el caudal del arroyo del Partido al inicio de su primitivo cono de sedimentación, que en la fotografía superior de la Figura 1 se puede identificar por el triángulo amarillo situado en el centro de su extremo superior.

Las rectificaciones en el Dique 1 se plantearon tras el verano de 2008 y estaban operativas al inicio de 2009; con ellas: a) se modificó el perfil inicial del vertedero frontal (2006), reduciendo su superficie de de-

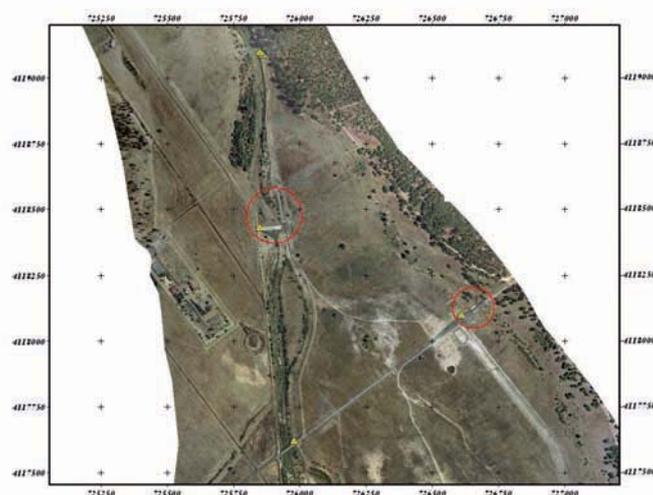


Figura 1.- Imagen superior. Superficie de inundación-laminación-sedimentación establecida con la Actuación núm. 3 sobre una fotografía aérea de 2008. El arroyo del Partido circula por la izquierda; el arroyo de la Cañada del Pinar por la derecha y el camino entre El Rocío y Villamanrique se aprecia en la parte inferior de la imagen. Las posiciones de los Diques 1 y 2 están resaltados con círculos. Los triángulos que aparecen en la figura son clavos topográficos de coordenadas conocidas, instalados durante las operaciones de nivelación efectuadas en la superficie objeto del Seguimiento y que permiten precisar la ubicación de las obras.

Imágenes inferiores: Izquierda: Dique 1 construido sobre el arroyo del Partido (2006). Derecha: Dique 2 ubicado en el arroyo de la Cañada del Pinar (2006).

sagüe y con ello el caudal de paso directo al arroyo del Partido a través del mismo y *b*) se taparon con grava los mechinales del dique, para que durante las avenidas se retrasara la descarga a través de ellos. Con estas modificaciones el nuevo perfil del vertedero frontal del Dique 1 se transformó una sección trapezoidal centrada en el lecho del arroyo de 20 m en su base, 24 m en su coronación, manteniendo los 2 m de altura; frente a los 70 m de anchura en su base que presentaba en su diseño original de 2006 (Figura 1. imagen inferior izquierda). Las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, cuyos caudales máximos se estimaron en  $85$  y  $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respectivamente, sorprendieron; porque el empuje de la corriente en la primera avenida arrastró a la grava que taponaba a los mechinales por los huecos de éstos, dejándolos operativos (se calculó que por ellos pasó un caudal de  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); razón por la cual posteriormente todos los mechinales fueron taponados con hormigón a excepción del mechinal de fondo, que se ha mantenido operativo para dar continuidad al flujo en el arroyo

del Partido. La Figura 2 muestra las curvas de gasto teóricas del sistema de control de avenidas establecido con la Actuación núm. 3 en el Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en éste.

#### **Análisis de las seis avenidas extraordinarias acaecidas en el arroyo del Partido entre el 21-12-2009 y el 4-02-2010, utilizadas de referencia en el presente estudio**

Las avenidas que se analizan tuvieron lugar en las fechas siguientes: la primera el 21-12-2009; la segunda el 23-12-2009; la tercera el 28-12-2009; la cuarta el 4-01-2010; la quinta entre la noche del 13 y la madrugada del 14 de enero de 2010 y la sexta el 4-02-2010. Con anterioridad a la primera avenida estaban ejecutadas todas las rectificaciones pertinentes en el Dique 1; por tanto, las curvas teóricas de gasto en el mismo son las representadas en la Figura 2 y resumidas en la Tabla 1.

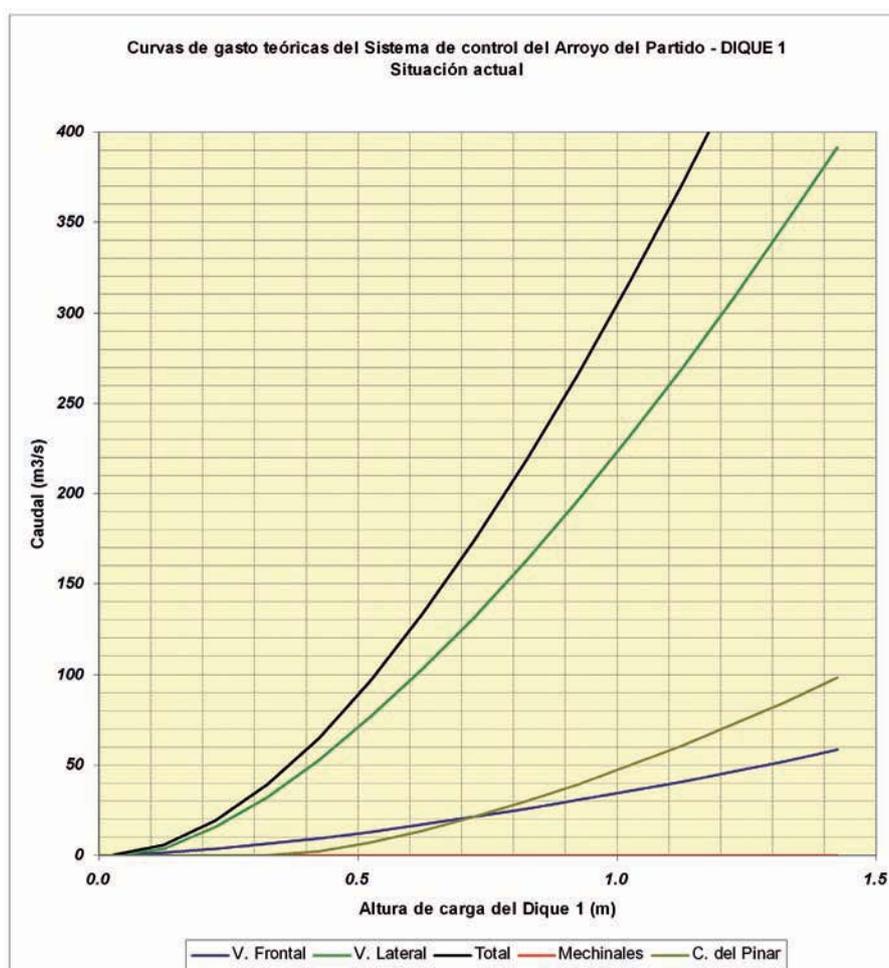


Figura 2. Distribución teórica del caudal total ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) en el inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido entre las diferentes secciones de vertido del Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en el mismo en 2009: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el del arroyo de la Cañada del Pinar debido a la curva de remanso formada aguas arriba del Dique 1 (verde-pardo).

Tabla 1. Distribución de los caudales de 20; 50; 100; 200 y 350  $m^3 \cdot s^{-1}$  en el inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, por las diferentes secciones de vertido del Dique 1 y el inicio de la Cañada del Pinar por el efecto de la curva de remanso formada aguas arriba de dicho dique.

Escenario propuesto en el DIQUE 1	Caudal ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )			
		Mechinales	Vertedero frontal	Vertedero lateral	Sección inicial de la C. Pinar
Situación 2006; con el vertedero frontal inicial y sin tapar los mechinales.	20	12	1	7	-
	50	15	10	25	-
	100	15	20	65	-
	200	15	50	120	15
	350	15	90	210	35
Situación 2010; modificado el vertedero frontal y tapados los mechinales*.	20	*	4	16	-
	50	*	9	41	-
	100	*	13	80	7
	200	*	25	147	28
	350	*	40	253	57

(\*) El vertedero de fondo del dique permanece siempre operativo con un caudal  $> 0,20 m^3 \cdot s^{-1}$ .

Para analizar el comportamiento de las avenidas, se realizaron las operaciones siguientes:

- Se simularon los caudales de avenida de los seis eventos acaecidos en el arroyo del Partido, en función de las condiciones hidrológicas de su cuenca y de las precipitaciones habidas en ella en las horas previas a su aparición, utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS (2009).
- Para la aplicación del modelo HEC-HMS se identificó la precipitación de la cuenca con la registrada en la estación de Bollullos, situada en el centro de la misma. Esta hipótesis sólo es fiable, cuando se trata de una precipitación generalizada en toda la cuenca; lo que en el caso de los eventos analizados se puede asumir en una primera aproximación, pues se trata de precipitaciones torrenciales extraordinarias.
- En la Figura 3 aparecen en granate las precipitaciones habidas en la estación de Bollullos en los periodos analizados y se muestran las simulaciones realizadas de los caudales de avenida del arroyo del Partido asociadas a ellas en azul y verde. Las diferencias entre ambas simulaciones se deben a los diferentes valores aplicados a los tiempos de concentración de las avenidas.
- Para estimar el tiempo de concentración se utilizó la ecuación propuesta por el USDA-

SCS, por considerar la expresión que mejor responde a las características morfológicas y edáficas de la cuenca del arroyo del Partido, que presenta suelos profundos y permeables; ya que introduce en su cálculo, además de la longitud  $L$  y la pendiente  $J$  del cauce principal, el valor del Número de Curva medio de la cuenca

$$t_c = 0,071 \left( \frac{L^{0,8}}{J^{0,25}} \right) \cdot \left( \frac{1000}{NC - 9} \right)^{0,7}$$

Posteriormente los valores obtenidos con dicha ecuación, se multiplicaron por un factor de reducción para adecuarlos a los valores de las 17 mediciones disponibles (Tabla 2). Se realizaron dos aproximaciones, utilizando como factores de reducción 0,50 (simulación en azul en la Figura 3) y 0,75 (simulación en verde en la Figura 3)

En la misma Figura 3 se muestran los valores de las 17 mediciones disponibles (con un círculo rojo para las mediciones realizadas sobre fotografías y con un triángulo amarillo para las mediciones directas en el vertedero) junto con las simulaciones realizadas.

La fiabilidad de los resultados de cualquier modelo necesita del aforo de los caudales obtenidos. Para las situaciones analizadas sólo se dispuso de los diecisiete valores puntuales de la Tabla 2, que utilizan la altura de carga en el vertedero frontal del Dique 1 para distintos momentos del tránsito de las avenidas por

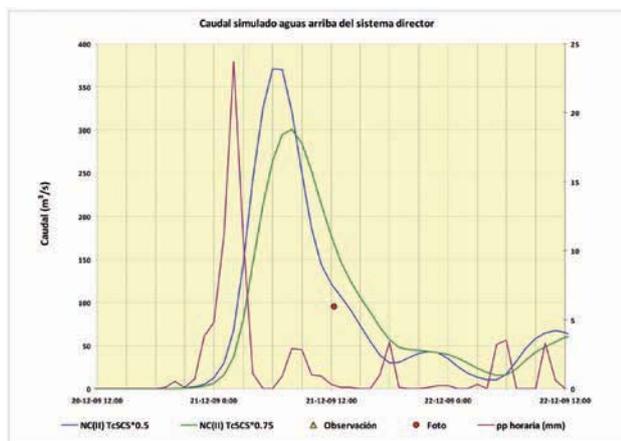
**Tabla 2. Caudales que vierten por las diferentes secciones de la estructura de control definida con el Dique 1, establecidos a partir de la altura de carga en su vertedero frontal, obtenida por medición en el umbral de dicho vertedero: directa (observación) o a través de fotografía (fotog.).**

Fecha y hora	Observación	H. vertido	Q. VF+Mech.	Q. D1	Q. D1+CP	Q. D2
05/01/2010 10:30	1,72	0,28	5,2	29,5	29,5	24,2
14/01/2010 10:00	1,85	0,15	2,2	8,2	8,2	6,0
15/01/2010 10:00	2,00	0,00	0,2	0,2	0,2	0,0
04/02/2010 8:00	1,22	0,78	23,7	172,5	198,2	174,5
04/02/2010 11:00	1,30	0,70	20,2	144,6	163,8	143,5
04/02/2010 18:51	1,84	0,16	2,4	9,5	9,5	7,1
05/02/2010 12:45	1,80	0,20	3,2	15,2	15,2	12,0
Fecha y hora	Fotog.	H. vertido	Q. VF+Mech.	Q. D1	Q. D1+CP	Q. D2
21/12/2009 13:20	1,48	0,52	13,0	88,2	95,2	82,2
22/12/2009 13:22	1,90	0,10	1,2	3,2	3,2	1,9
24/12/2009 13:12	1,68	0,32	6,4	37,7	37,7	31,4
04/01/2010 12:45	1,14	0,86	27,5	202,0	234,9	207,4
05/01/2010 11:05	1,78	0,22	3,7	18,5	18,5	14,8
14/01/2010 12:32	1,88	0,12	1,6	4,9	4,9	3,3
15/01/2010 12:45	2,04	-0,04	0,2	0,2	0,2	0,0
04/02/2010 11:56	1,51	0,49	11,9	79,8	85,2	73,3
04/02/2010 18:41	1,80	0,20	3,2	15,2	15,2	12,0
05/02/2010 13:39	1,84	0,16	2,4	9,5	9,5	7,1

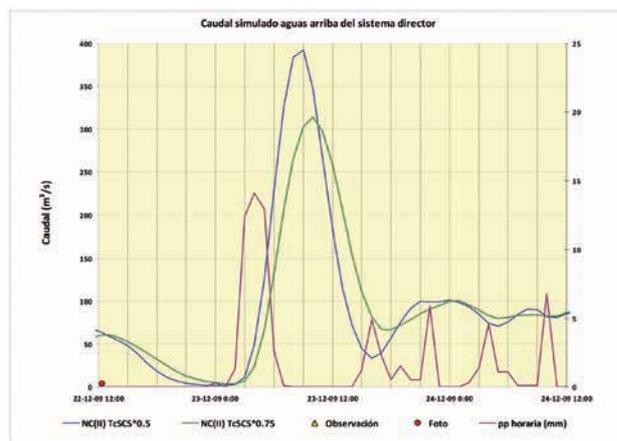
**Notaciones:** H. vertido, Altura de carga en el vertedero; Q. VF+ Mech, Caudal que pasa por el vertedero Frontal + Mecinales; Q. D1, Caudal acumulado aguas arriba del Dique 1; Q.D1+CP, Caudal total; Q.D2, Caudal que pasa al arroyo de la Cañada del Pinar.

el mismo. Estos valores se obtuvieron de dos maneras: a) por medición directa inmediatamente aguas arriba del umbral del vertedero (siete valores); b) a

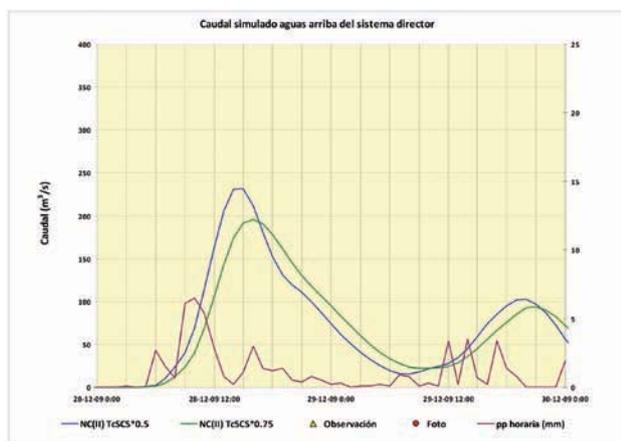
través de su medición sobre las fotografías del paso de la lámina de agua por el mismo (diez valores). La Figura 4 detalla el uso de las fotografías para la



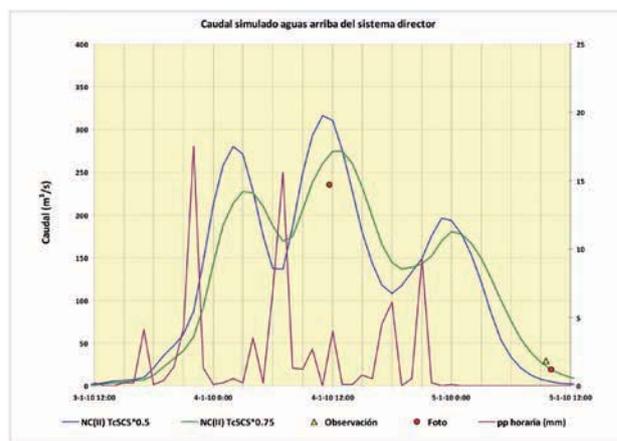
Avenida del 21-12-2009.



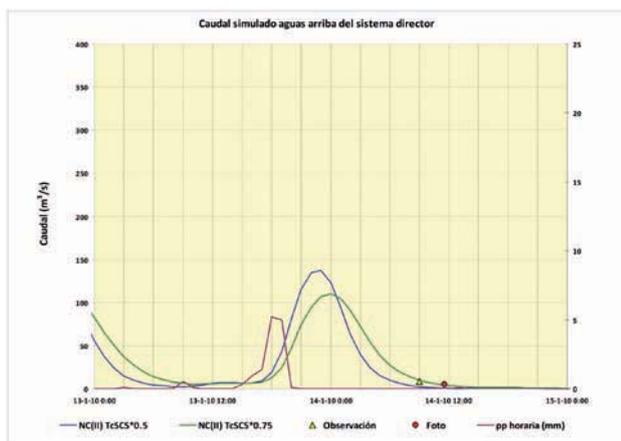
Avenida del 23-12-2009.



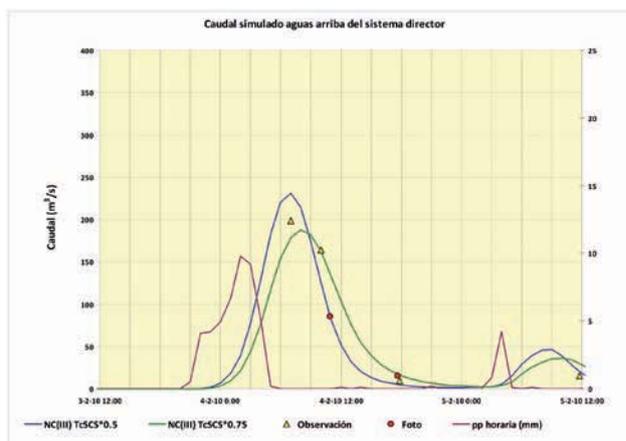
Avenida del 28-12-2009



Avenida del 4-01-2010



Avenida del 13-01-2010



Avenida del 4-02-2010.

Figura 3. Precipitaciones torrenciales en la estación de Bollullos (mm) en los eventos considerados (granate) y simulación de los caudales de avenida ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) en el arroyo del Partido para el sistema de control establecido en el mismo con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, en las condiciones que se especifican de NC y tc (Para tc \*0,50, azul; para tc \*0,75, verde). Mediciones de la altura de carga en el vertedero frontal del Dique 1: obtenido de forma directa, triángulo amarillo; obtenido mediante el método fotográfico, círculo rojo.

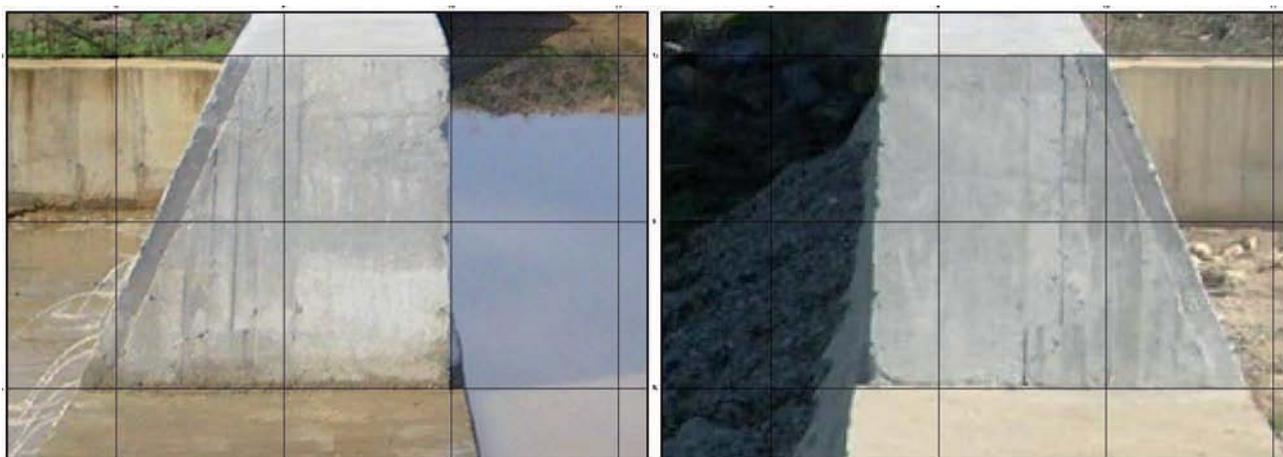


Figura 4. Fotografías que muestran las paredes interiores del vertedero frontal del Dique 1, visto desde el margen izquierdo hacia el derecho (imagen izquierda) y visto desde el margen derecho hacia el izquierdo (imagen derecha). En ellas aparecen dos cuadrados ajustados desde el umbral del vertedero hasta su coronación. Cada cuadrado tiene 1 m de lado y sobre ellos se representa el vertido de la lámina de agua procedente de la fotografía del paso del flujo por el umbral del vertedero.

**Tabla 3. Características de las seis avenidas sintéticas adoptadas para conocer la respuesta la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en los cuatro parajes seleccionados en este estudio.**

TORMENTA	HORA inicial	HORA final	P (mm)	$I_{max}$ (mm/h)	$t_{p(}$ (Fecha y hora)	$q_p$ ( $m^3/s$ )
21/12/2009	20-12-09 19:00	21-12-09 6:00	56,9	23,7	21-12-09 7:00	332
23/12/2009	22-12-09 23:00	23-12-09 7:00	43,7	14,1	23-12-09 9:00	347
28/12/2009	28-12-09 2:00	28-12-09 13:00	26,6	6,5	28-12-09 15:00	212
04/01/2009	3-1-10 9:00	4-1-10 11:00	62,4	17,5	4-1-10 12:00	292
14/01/2009	13-1-10 14:00	13-1-10 20:00	12,9	5,2	13-1-10 23:00	122
04/02/2009	3-2-10 20:00	4-2-10 5:00	44,7	9,8	4-2-10 7:00	205

**Notaciones:** Columna 1: Fecha de la avenida; columnas 2 y 3: Hora inicial y final (solares) de la precipitación torrencial previa a la avenida; columna 4: Precipitación anterior a la avenida: P (mm); columna 5: Intensidad máxima de la precipitación de avenida:  $I_{max}$  (mm/h); columna 6: Tiempo al pico del hidrograma de avenida (fecha y hora solar) y columna 7: Caudal punta de la avenida:  $q_p$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).

obtención del caudal de paso por el vertedero frontal del Dique 1.

También se utilizó en el análisis de las avenidas, el comportamiento hidráulico del tirante de su corriente a su paso por la sección badén-puente del Ajolí, situado al inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido, cerca de la población de El Rocío, utilizando para ello el programa de circulación del flujo en cauces abiertos HEC-RAS (2008).

Para centrar el análisis del funcionamiento de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en los diferentes parajes que podrían resultar más afectados por ella con las avenidas seleccionadas, se optó por establecer unos caudales sintéticos para éstas; que se definieron por el valor medio de las dos simulaciones de caudales representadas en la Figura 3 para cada avenida. Las principales características de

estas avenidas sintéticas utilizadas en el estudio se resumen en la Tabla 3.

## RESULTADOS

Analizadas las avenidas, se procedió a estudiar sus efectos en los lugares donde el impacto de lo proyectado debía ser más relevante o donde, de acuerdo con sus características físicas, podría resultar más vulnerable. En síntesis se estudiaron los siguientes parajes:

- En la sección donde se ubica el Dique 1 (en el arroyo del Partido).
- En el área de inundación-laminación-sedimentación destinada para este fin entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005.

- c. En la sección donde se sitúa el Dique 2 (en arroyo de la Cañada del Pinar) y
- d. En la sección badén-puente del Ajolí (inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido) y en la superficie situada al este de una mota o pequeño dique de protección construida para defender a la aldea de El Rocío de las avenidas del arroyo del Partido.



Figura 5. Reparto del caudal de avenida de 234,9 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> en el Dique 1 construido sobre el arroyo del Partido a las 12:50 horas locales del día 4-01-2010. Se estima que en dicho momento pasan por el vertedero frontal al arroyo del Partido 27,5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>; por el vertedero lateral hacia la superficie de inundación 174,5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> y los restantes 32,9 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> se desvían hacia el arroyo de la Cañada del Pinar por la curva de remanso generada aguas arriba del paramento frontal del Dique 1.

### Sección donde se ubica el Dique 1 en el arroyo del Partido

El sistema de distribución de los caudales de avenida entre los vertederos frontal y lateral del Dique 1 funcionó de acuerdo con lo proyectado en las seis avenidas analizadas (en la imagen de la Figura 5 aparece dicho reparto para la avenida del 4-01-2010 a las 12:50 horas locales). En ningún caso los caudales que continuaron por el arroyo del Partido aguas abajo de su vertedero frontal superaron los 40 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> previsto con el sistema de control (Tabla 1). El único problema detectado en el comportamiento de esta estructura de regulación de las avenidas, se debió a que los sucesivos flujos de avenida se concentraron en el extremo izquierdo del paramento frontal del Dique 1, lo que causó que sus corrientes erosionaran el empotramiento lateral del mismo que, al



Figura 6. Inundación causada por la avenida del arroyo del Partido del 4-01-2010 a las 12:49 horas locales en la superficie destinada al efecto con la Actuación núm. 3, aguas arriba del camino asfaltado entre las poblaciones de El Rocío y Villamanrique, que se ubica al fondo de la imagen.

ser de arena, resultó muy vulnerable. Tras la avenida del 14-01-2010 se consideró de la zona erosionada necesitaba un relleno urgente de arena, que fue realizada en los días siguientes; lo que permitió al sistema continuar funcionando según lo proyectado.

### Área de inundación-laminación-sedimentación destinada como tal en la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 y ubicada entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar

La parte de esta superficie ubicada aguas arriba del camino asfaltado entre las poblaciones de El Rocío y Villamanrique (Figura 1, imagen superior) funcionó de acuerdo con lo proyectado en la Actuación núm. 3; aunque debido a la textura arenosa y muy permeable el terreno, éste tardó en saturarse y solo a partir de la avenida del 4-01-2010 la inundación resultó manifiesta y extensiva como se muestra en la Figura 6.

Aguas abajo del citado camino asfaltado el esquema proyectado se alteró en la primera avenida, la del 21-12-2009, al desbordar ésta un muro de tierra construido en el margen izquierdo del Dique 2 situado sobre el arroyo de la Cañada del Pinar. Ello ocasionó que al llegar los caudales de avenida a la sección donde se ubica el Dique 2, derivaran por gravedad hacia el paso generado por el desbordamiento en el muro de tierra, en lugar de atravesar su vertedero. Posteriormente los caudales de avenida se concentraron nuevamente en el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar, como se explica en el apartado siguiente, que detalla el accidente comentado y sus consecuencias.

### Sección donde se sitúa el Dique 2 en arroyo de la Cañada del Pinar

Se ha comentado que las misiones del Dique 2 son las de mantener el régimen subcrítico aguas arriba del mismo y regular el caudal vertiente directo al arroyo de la Cañada del Pinar, asegurando con ello la expansión de las avenidas por el área de inun-

dación, lo que en situaciones de avenidas máximas debe causar la inundación de la superficie destinada al efecto situada aguas abajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique. La presencia a la izquierda del Dique 2 de un paso de fauna, motivó que para mantenerlo operativo se construyera un muro de tierra protegiendo al mismo y encauzando a las corrientes de avenida hacia el vertedero del citado dique.



Figura 7. Secuencia de imágenes de la avenida del 24-12-2009 que muestran de izquierda a derecha: a) el muro de tierra situado en el margen izquierdo del Dique 2; b) el tránsito de la corriente de avenida hacia la sección del paso de fauna y c) la salida del flujo de avenida del paso de fauna, para dirigirse al cauce del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2.

Sin embargo, dicho muro de tierra fue desbordado en su extremo más oriental en la primera avenida y la mayor parte de su corriente se desvió por el hueco del desbordamiento en lugar de dirigirse al vertedero del Dique 2, para atravesar posteriormente el paso de fauna, como se aprecia en la secuencia de imá-

genes de la Figura 7. En las tres primeras avenidas esta cuestión no llegó a tener mayor trascendencia; pues sus flujos, tras atravesar el paso de fauna, desembocaron nuevamente en el cauce de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2; por tanto, no se alteró en esencia el esquema de la Actuación



Figura 8. Corte del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique por la corriente de la avenida del 4-01-2010 en la sección donde se situaba el paso de fauna, en el margen izquierdo del arroyo de la Cañada del Pinar, al este del Dique 2 y muy próximo a su ubicación. Izquierda: Detalle del corte del camino asfaltado. Derecha: Panorámica de la situación.

núm. 3, ya que lo proyectado era que finalmente las avenidas afluyeran al arroyo de la Cañada del Pinar y, a partir de él, al cauce del Caño Mayor, para desde este curso desembocar en la marisma del PND en un entorno diferente al de la marisma de El Rocío, pero que era precisamente en el que tenía lugar con anterioridad a 1981. En cualquier caso, esta alteración contribuyó a que la corriente adquiriese una velocidad superior a la que hubiera adquirido, si se hubiera expandido por la superficie de inundación situada aguas abajo del citado camino asfaltado.

Pero la corriente de la avenida del 4-01-2010 arrastró la estructura de hormigón cuadrangular que constituía el paso de fauna y cortó el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique en dicha sección (Figura 8). Este efecto tuvo repercusiones negativas

para el normal desarrollo de la vida y la economía de la zona; pero desde el punto de vista de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en este paraje, no supuso una nueva alteración respecto a los ya producidos con las avenidas precedentes. En cualquier caso las previsiones de la Actuación núm. 3 en el lugar quedaron alteradas.

### Sección del badén-puente del Ajolí (inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido) y superficie situada al este de una mota o pequeño dique de protección construida para defender a la aldea de El Rocío de las avenidas del arroyo del Partido

Este paraje constituye el objetivo principal del sistema de protección de la Actuación núm. 3 del Proyecto



Figura 9. Izquierda: Tránsito de la avenida del arroyo del Partido del 21-12-2009 por la cañada real a las 11:42 horas locales, cerca de la aldea de El Rocío. Derecha: El arroyo del Partido inmediatamente aguas abajo del puente del Ajolí a las 12:21 horas locales del día 5-02-2010.

El cauce que aparece a la derecha en esta imagen es el que actualmente se encuentra operativo desde el invierno del año 1997; en que el cauce primitivo, que corresponde al de la izquierda, quedó aterrado por los sedimentos transportados por las avenidas hasta este lugar, dejándolo no operativo. El nivel de agua que aparece en la imagen sobre el cauce izquierdo, responde únicamente a una elevación del calado del agua causado por la avenida del día anterior.

Doñana 2005. La imagen de las avenidas del arroyo del Partido circulando por la cañada real<sup>1</sup> se repitió en cinco de las seis avenidas analizadas (Figura 9, imagen de la izquierda). Sin embargo, estas inundaciones no han tenido ni el impacto ni la repercusión que tuvieron las avenidas que llegaron hasta la sección del Ajolí<sup>2</sup> en años siguientes al encauzamiento del arroyo del Partido (1981) hasta la instalación y rectificación del sistema de control de avenidas en el mismo (2009).

Antes de su encauzamiento, por la sección del Ajolí circulaba el canal de desagüe del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido; que funcionaba como un caño marismeño y era conocido como caño Ajolí. Los caños presentan una escisión central pronunciada y amplias superficies laterales de inundación para el caso de avenidas, esta descripción se ha podido reconstruir estudiando tramos del arroyo no alterados (Urdiales, 1996; Mintegui et al., 2003). En el caso del caño Ajolí en el paraje en cuestión, la escisión central se estima que podía transportar un máximo entre 4 a 5 m<sup>3</sup>-s-1; el resto de la avenida, que por la morfología del lugar podría alcanzar entre cuatro o cinco veces este valor en situaciones extremas, inundaba las superficies colindantes (Mintegui et al., 2010). Pero el encauzamiento del arroyo del Partido (1981) provocó que sus avenidas condujeran todo su caudal (de valores similares a los que se analizan en esta ocasión, del orden de 200 m<sup>3</sup>-s-1 o superiores) hasta su sección final, ubicada a poca distancia aguas arriba del puente del Ajolí. Dichos caudales atravesaban previamente siete Km. de canalización, en los que erosionaban por abrasión tanto el lecho como los márgenes del encauzamiento; por

tanto, venían cargados de sedimentos. Al encontrar el flujo libertad para expansionarse aguas abajo de la sección del Ajolí, se iniciaba allí mismo el depósito de los sedimentos que transportaba la corriente y de este modo se formó el nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido sobre la marisma de El Rocío.

A partir de la construcción del Dique 1 en el arroyo del Partido en el verano de 2006, los caudales que llegaban hasta la sección del badén-puente del Ajolí comenzaron a disminuir y el arroyo del Partido fue adquiriendo de nuevo la fisonomía de caño en dicho paraje (Figura 9, imagen de la derecha), proceso que se reforzó tras las rectificaciones realizadas en el Dique 1 en 2009.

El nuevo cono de sedimentación, formado aguas abajo de la sección del Ajolí, supuso serios problemas en el entorno de la aldea de El Rocío, tanto ecológicos como hidráulicos, motivados por los efectos torrenciales de las avenidas ocurridas entre los años 1981-2008, especialmente por las que tuvieron lugar en el trienio 1995-98. Se citan los más importantes: a) la desaparición de 4,3 Km<sup>2</sup> de superficie de marisma por la deposición de 4,48 millones de m<sup>3</sup> de arena sobre ella; b) La elevación de la cota de la solera por la que actualmente circula el tramo final del arroyo del Partido antes de afluir en la zona inundada de la marisma, como consecuencia del depósito de los sedimentos aportados por sus propias avenidas sobre su propio lecho; que condicionó, además, a la pendiente del lugar hacia el oeste, es decir, hacia la zona urbanizada de la aldea de El Rocío; motivo por el cual los técnicos responsables de la seguridad del lugar construyeron una mota o pequeño muro de protección en el límite oriental de la citada aldea en el invierno de 1997, para protegerla de las futuras avenidas del arroyo del Partido, como se observa a la izquierda de la imagen de la Figura 10.

La situación del paraje que se comenta al comienzo del invierno del año hidrológico 2009-10 era prácticamente similar a la que se muestra en la imagen

<sup>1</sup> Camino tradicional no asfaltado que conduce a la ermita de El Rocío, de alto contenido socio-cultural y religioso en la región.

<sup>2</sup> Tramo del citado camino tradicional que es atravesado por el cauce del arroyo del Partido. Ha dispuesto siempre de un puente y, desde el comienzo de este siglo, también tiene un badén.

de la Figura 10, obtenida en agosto de 2008. En ella se distingue: a) el arroyo del Partido, convertido en caño, que dirige su corriente desde la sección del badén-puente del Ajolí (extremo superior derecho de la imagen) hacia el oeste para desembocar en la marisma (extremo izquierdo de la imagen); b) la confluencia del caño Marín en el arroyo del Partido en el centro de la imagen; el caño Marín es el encargado de recoger los caudales de drenaje de las áreas de cultivo situadas a la derecha del arroyo del Partido y, por tanto, procede del oeste (extremo superior izquierdo de la imagen); c) el citado muro de protección del límite oriental de la aldea de El Rocío, a la izquierda de la fotografía y d) la cañada real en el extremo superior de la imagen, desde el puente del Ajolí (derecha) hasta el puente sobre el caño Marín (izquierda).

Debido a la dirección este-oeste de la pendiente del terreno en el paraje que se comenta, si el caudal líquido del arroyo del Partido alcanzase la capacidad suficiente para arrastrar sedimentos, como ocurría en el pasado; podría reactivarse el cono de sedimentación del arroyo del Partido, expandir su abanico aluvial hacia el oeste y llenar de sedimentos el espacio comprendido entre el cauce actual del arroyo del Partido en el paraje en cuestión y el pequeño muro

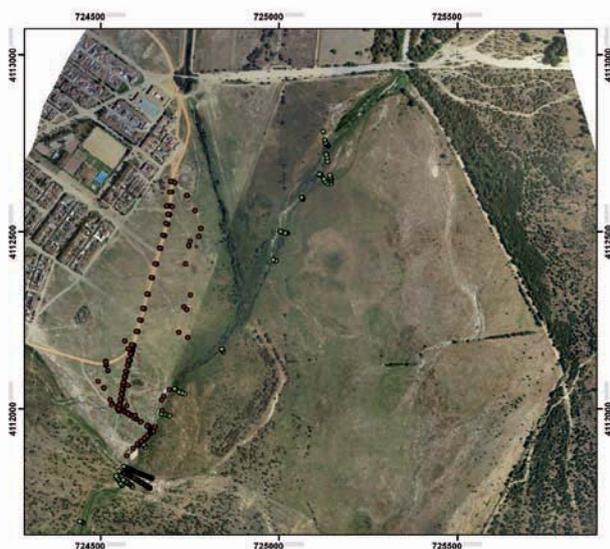


Figura 10. Recorrido del arroyo del Partido al este del muro de protección de la aldea de El Rocío, que se ve a la izquierda en la fotografía tomada en 2008, desde la sección badén-puente del Ajolí al noreste (derecha) y la estación de bombeo de la aldea de El Rocío próxima a la marisma del PND al suroeste (izquierda). En la imagen se distingue también la confluencia en el arroyo del Partido del caño Marín en el centro de la imagen y el trazado la cañada real desde el puente del Ajolí (derecha) hasta el puente sobre el caño Marín (izquierda), en el extremo superior de la imagen. Los puntos de la imagen corresponden a levantamientos topográficos realizados en 2007 (marrón) y 2008 (verde).

protección que defiende a la aldea de El Rocío por su lado este; lo que, en el caso de producirse precipitaciones torrenciales en la zona, podría causar en el futuro graves problemas para el drenaje al área urbanizada de la aldea de El Rocío. El propósito de la construcción del Dique 1 en el arroyo del Partido en el verano de 2006 y su posterior rectificación en el 2009 fue reducir el caudal de avenida que pudiera llegar hasta la sección del badén-puente del Ajolí, para disminuir su tirante e impedir que la corriente adquiriese la capacidad suficiente para arrastrar sedimentos. Los puntos en marrón y verde que aparecen sobre la fotografía corresponden a dos levantamientos topográficos realizados en la zona. El primero (puntos marrones) se llevó a cabo en el 2007 para analizar el efecto del muro de protección de la aldea de El Rocío ante diferentes avenidas del arroyo del Partido. El segundo (puntos verdes) en el 2008 para detectar las alteraciones morfológicas sufridas por el arroyo del Partido a partir de 2006. En el extremo inferior izquierdo de la imagen aparece una acumulación de puntos verdes, que pertenecen a secciones del arroyo del Partido a su entrada en el PND, a poca distancia de su afluencia en la marisma.

A continuación se analiza el comportamiento de las seis avenidas de este estudio en el paraje que se comenta. Al respecto se comprobó que:

- Mientras el caudal de avenida del arroyo del Partido asociado a su sistema de control no supere los  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , la corriente que descarga por el verterlo frontal del Dique 1 hacia el arroyo del Partido circulará por su cauce actual hasta la marisma, sin que en principio tengan lugar fenómenos de carácter geo-torrencial (es decir, de erosión, transporte y sedimentación) en su recorrido; pues se prevé que el caudal que llegue hasta la sección badén-puente del Ajolí será menor de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y, por tanto, circulará por el cauce que abrió el propio arroyo en el invierno de 1997 aguas abajo del puente (cauce de la derecha de la imagen derecha de la Figura 9).
- Cuando el caudal de avenida supere los  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , debido a las condiciones hidráulicas que se dan inmediatamente aguas arriba de la sección del badén-puente del Ajolí, en las que incide directamente la topografía del lugar y el propio puente; aunque la corriente continúe circulando hacia la marisma por el cauce abierto por ésta aguas abajo del puente del Ajolí en el invierno de 1997, a partir de un caudal de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  la avenida deriva una parte de su corriente a la cañada real. Este efecto se ha comprobado aplicando el programa informático HEC-RAS (2008) al movimiento de la corriente en el tramo comprendido entre una sección situada inmediatamente aguas arriba del badén y otra sección ubicada inmediatamente aguas abajo del puente del Ajolí. La fotografía de la izquierda de la Figura 11

muestra en planta al arroyo del Partido en el paraje en cuestión y la Figura 12 el resultado de la aplicación del programa HEC-RAS en la misma.

- c. El caudal de avenida del arroyo del Partido que en la sección badén-puente del Ajolí derive hacia la cañada real, circulará por ésta aprovechando la pendiente del terreno en el lugar hasta confluir con el caño Marín. Una parte de la corriente de ambos cursos se dirige hacia la zona inundada de la marisma por el cauce del arroyo del Partido en el lugar; pero otra se almacena en la llanura situada al este de la mota de protección de la aldea de El Rocío, provocando en ella una inundación; que en principio no es causa de problemas importantes, porque el agua que llega hasta el lugar no arrastra arenas y puede ir evacuando poco a poco hacia la marisma.
- d. Pero si la inundación se prolonga durante mucho tiempo, el agua que se concentra en las cotas más bajas del terreno, siguiendo la microtopografía del lugar o aprovechando movimientos del terreno efectuados anteriormente en la zona, puede abrir nuevos derramaderos; como el señalado en rojo en la imagen de la derecha de la Figura 11, que ha generado una nueva vía de agua hacia la marisma representada con una flecha azul en la misma imagen. Si estos derramaderos permanecen aislados, su efecto es reducido; pero si alguno de ellos provoca una erosión remontante que enlace con el cauce actual del arroyo del Partido en el paraje en cuestión; el arroyo (que es el eje del cono de sedimentación) se desviará adoptando la dirección del nuevo derramade-

ro hacia el oeste. Esto causaría la activación del cono y generaría un nuevo problema, porque dirigiría todo el volumen de agua hacia el oeste sobre el área urbanizada de la aldea de El Rocío, elevando la cota de inundación y creando dificultades para el drenaje del área urbanizada en el lugar. Para evitar este problema, se recomienda mantener con una cota suficiente y uniforme las motas principales que se disponen en el zona (mota de protección de la aldea de El Rocío, prolongación de la misma en dirección a la marisma y mota-camino que partiendo de la última se dirige hacia la estación de bombeo de El Rocío; aunque sin poner otros obstáculos a la circulación de las avenidas.

## CONCLUSIONES

Se resume el comportamiento de las obras y disposiciones adoptadas con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 ante las avenidas ocurridas en el arroyo del Partido entre el 20-12-2009 y el 5-02-2010; señalando: a) los aspectos de la Actuación núm. 3 que han funcionado de acuerdo con lo previsto y que han servido para evitar problemas graves de inundación y aterramiento en el entorno de la aldea de El Rocío y para planificar el futuro de esta zona; b) los problemas que han causado los comportamientos no previstos de la Actuación núm. 3 y que, siguiendo el esquema corrector de los cursos torrenciales, deben ser objeto de revisión y rectificación; como ha sido el criterio mantenido hasta la fecha; c) los problemas que no se previeron, pero entran dentro de la lógica que pudieran ocurrir tratándose



Figura 11. Izquierda: Paraje del badén-puente del Ajolí con la cañada real en el centro de la imagen tomada en 2008. El flujo circula de norte a sur y el cauce operativo del arroyo del Partido aguas abajo de la cañada real es el de la izquierda que se dirige al oeste. Los puntos amarillos en la imagen corresponden a un levantamiento topográfico realizado en 2009. Derecha: Recorrido del arroyo del Partido próximo a su afluencia en la marisma del PND, en su margen derecho se ve la estación de bombeo de El Rocío y más al oeste se señala el lugar donde se produjo un nuevo derramadero durante las avenidas de 2010 (en rojo) y la dirección de la corriente en el mismo (en azul).

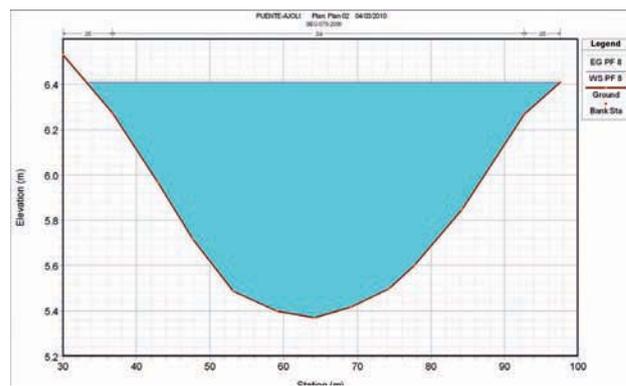
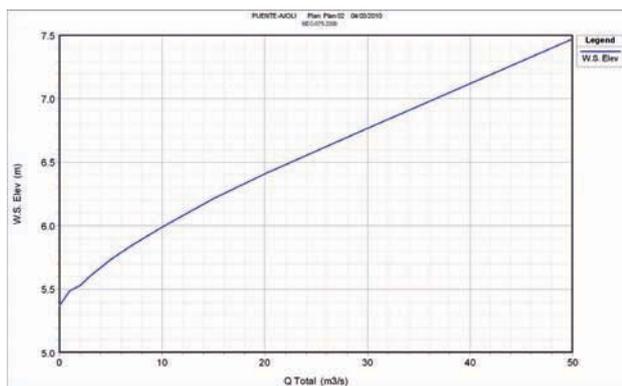
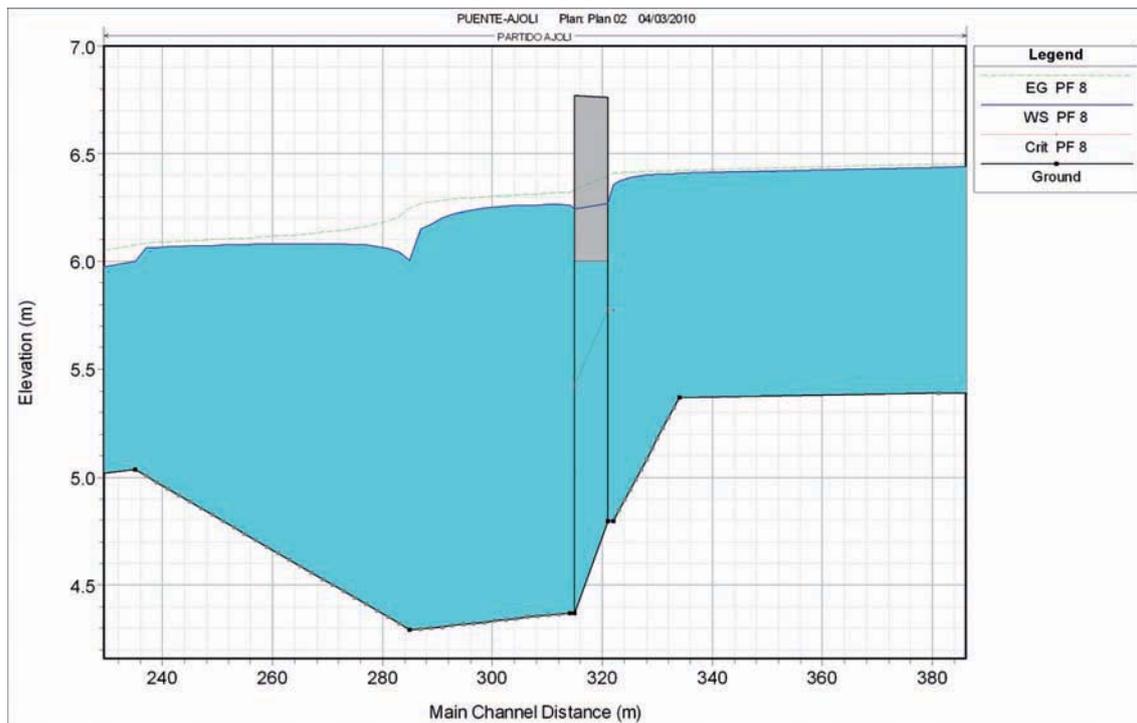


Figura 12. Esquema superior: Perfil de la representación en HEC-RAS del paso del flujo del arroyo del Partido por el tramo comprendido entre el badén y el puente en la sección del Ajolí para una avenida de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a partir de la cual una parte del flujo del arroyo del Partido deriva hacia la cañada real, siguiendo el gradiente del terreno en el lugar. Esquemas inferiores: Izquierda: Curva de gasto en la sección badén- puente del Ajolí. Se observa que la cota del terreno para un caudal de avenida de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  es 6,4 m. Derecha: Sección del badén del Ajolí para el caudal de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

de cursos torrenciales en un medio altamente vulnerable.

**Ha funcionado de acuerdo a lo previsto:**

a. El reparto de los caudales de avenida entre los vertederos frontal y lateral del Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en el mismo en el 2009; lo que ha propiciado que los caudales que han llegado hasta la sección badén- puente del Ajolí funcionasen de acuerdo con lo establecido en el sistema de control de avenidas del arroyo del Partido (Tabla 1), no superando en dicha sección, incluso para los caudales de avenida más elevados, el orden de los  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  que aparece en ella.

b. Los caudales que han llegado hasta la sección badén- puente del Ajolí, incluso los más elevados, no han presentado la capacidad de arrastre de arenas que tuvieron las avenidas que llegaron hasta ella antes de la construcción y rectificación del Dique 1, lo que ha evitado una elevación de la cota del terreno por deposición de arenas en la superficie situada al este de la aldea de El Rocío (en concreto al este de la mota de protección de la aldea de El Rocío), manteniéndose las posibilidades actuales de drenaje del área urbanizada de El Rocío en dicho paraje, al conservarse en la práctica su relieve

- c. Se ha comprobado en un reconocimiento realizado sobre el terreno en julio de este año 2010, que los caudales de avenida del arroyo del Partido derivados hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y desde éste al Caño Mayor, para descargar finalmente en la marisma del PND en un paraje diferente al del entorno de la aldea de El Rocío, que, aunque han causado inundaciones en las zonas de menor cota que han encontrado en su recorrido, no han producido arrastres significativos de arenas ni el depósito de las mismas. Ello se debe básicamente a que tanto el arroyo de la Cañada del Pinar como el Caño Mayor mantienen en la mayor parte de su recorrido su morfología natural original, que permite expansionar a las avenidas durante el tránsito por ellos.
- d. La opción de reducir el caudal de las avenidas del arroyo del Partido que llegan hasta la sección del badén-puente del Ajolí, a costa de derivar la mayor parte del caudal de dichas avenidas hacia el Caño Mayor, es un retorno al funcionamiento del sistema hidrológico-sedimentario de la zona anterior al encauzamiento del arroyo del Partido en 1981, que lo avala tanto la morfología del terreno en el lugar como la ecuación de continuidad. La única diferencia respecto del pasado está en el grado de expansión de las avenidas del arroyo del Partido en el paraje comprendido entre el emplazamiento del Dique 1 y la sección anterior al Ajolí (que constituye una parte de su antiguo cono de sedimentación) y en el tiempo de duración de dicha expansión, que condiciona la velocidad de incorporación de las avenidas del arroyo del Partido en el arroyo de la Cañada del Pinar.
- b. En la zona norte de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación de las avenidas del arroyo del Partido el esquema operativo funcionó de acuerdo con lo previsto; pero no ocurrió lo mismo en la zona sur, donde la primera avenida del arroyo, del día 21-12-2009, el agua embalsada aguas arriba del Dique 2 desbordó el muro de tierra ubicado en el margen izquierdo del arroyo de la Cañada del Pinar, construido para encauzar a la corriente hacia el vertedero de dicho dique, lo que impidió que el caudal de avenida se repartiera según lo establecido en la Actuación núm. 3. Por ello, la corriente no llegó a verter por encima del camino asfaltado, sino que en su mayor parte, tras desbordar el muro, derivó por gravedad hacia un paso de fauna situado por debajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique, ubicado al este del Dique 2 y próximo a él. Tras atravesar el paso de fauna, la corriente retomó el cauce natural del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2. El citado muro de tierra se realizó para mantener la funcionalidad del paso de fauna.
- c. Durante las avenidas siguientes la corriente terminó cortando el camino asfaltado en la sección donde se ubicaba el paso de fauna; lo que motivó que prácticamente todas las avenidas del arroyo del Partido incorporadas al cauce del arroyo de la Cañada del Pinar aguas arriba del Dique 2 pasaran directamente por gravedad a la sección cortada del camino asfaltado, dejando de ser operativo el vertedero del Dique 2. Sin embargo, en avenidas importantes como las del 4-01-2010 y 4-02-2010 se observó la existencia de un efecto de embalse en el paraje aguas arriba del Dique 2 y de lo que quedaba de la estructura del muro de tierra situado en su margen izquierdo, que se mantuvo lo bastante rígida como para funcionar como un elemento de retención y/o de vertido de la corriente de la avenida; consiguiendo con ello un moderado laminado de la avenida, o manteniendo algo del efecto que estaba previsto con la Actuación núm. 3.

#### **No ha funcionado como estaba previsto, pero se puede reconducir**

- a. Para aumentar el tiempo de duración de la descarga de las avenidas del arroyo del Partido en el arroyo de la Cañada del Pinar, la Actuación núm. 3 había dispuesto medidas que, en las avenidas analizadas en este artículo, no llegaron a funcionar plenamente de acuerdo con lo previsto. Dichas medidas consistían en expansionar las avenidas en la superficie reservada al efecto, comprendida entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar, aguas abajo del vertedero lateral del Dique 1. Dicha superficie está dividida por el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique que le atraviesa de oeste a este, dejando la zona norte aguas arriba del mismo (Figura 1). El esquema operativo se concretaba del modo siguiente: Los caudales de avenida que en el Dique 1 no pasaran directamente por su paramento frontal (vertedero y mechnal de fondo) en dirección a la sección badén-puente del Ajolí, derivarían hacia el arroyo de la Cañada del Pinar; donde serían retenidos aguas arriba del Dique 2 y posteriormente repartidos, de modo que una fracción pasara directamente por su vertedero aguas abajo del arroyo de la Cañada del Pinar y el resto del caudal vertiera por encima del camino asfaltado, hacia la zona sur de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación.
- d. La puesta nuevamente en funcionamiento de los objetivos de la Actuación núm. 3 en el paraje que se comenta implicaría las operaciones siguientes: 1) La reparación del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique en

la sección donde se ha interrumpido; 2) Conseguir que las avenidas inunden la superficie prevista para ello, situada aguas abajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique y 3) Eliminar cualquier obstáculo que impida al flujo de avenida dirigirse hacia el arroyo de la Cañada del Pinar en la superficie de inundación-laminación-sedimentación situada aguas abajo del mencionado camino asfaltado; porque, además de tratarse de su drenaje natural marcado por la pendiente del paraje en cuestión, el gradiente de ésta es tan suave, que resulta suficiente por sí mismo para regular la velocidad del flujo en el lugar. Además, el desagüe tendría lugar, como en el pasado, a través de los caños o antiguos derramaderos existentes en dicha superficie de inundación; aspecto que ha sido comprobado en el 2009 en la superficie inundación-laminación-sedimentación situada al norte del camino asfaltado durante el tránsito de las avenidas por el mismo.

**Problemas que no se previeron, pero que están dentro de la lógica que pudieran ocurrir tratándose de procesos torrenciales y que requieren solución.**

- a. La socavación del terreno aguas abajo del paso del flujo por el vertedero lateral del Dique 1. Este efecto se esperaba que fuera controlado por el resalto hidráulico que se generase en el lugar; en realidad no causó problemas salvo en el extremo sur del citado vertedero; donde la socavación afectó al ala izquierda del paramento frontal del Dique 1, descalzándola y creando el riesgo que la corriente pudiera abrir un paso de agua hacia el cauce del arroyo del Partido, lo que anularía el principal objetivo de la Actuación núm.3. El problema se detectó a tiempo y se adoptó como solución provisional inmediata cubrir el ala izquierda con la arena del lugar, a la espera de adoptar la solución definitiva. Ésta podría consistir en mantener la socavación para asegurar la formación del resalto hidráulico, pero proteger al mismo tiempo el ala en cuestión cubriéndola con sacos terreros, para que la corriente no pueda arrastrar la arena, la cubierta de sacos de arena podría reforzarse con una escollera exterior para asegurar la protección
- b. La escisión en el terreno producida en la superficie situada al este del muro de protección de la aldea de El Rocío, cerca de donde se ubica la estación de bombeo de la aldea de El Rocío, abriendo un nuevo paso de agua hacia la marisma. Esta vía (en azul en la imagen de la derecha de la Figura 11, con las flechas indicando hacia la marisma de El Rocío) no es un problema serio por el momento; pero podría

serlo, si la socavación (señalada en rojo en la Figura 11) remonta hasta unirse con el cauce del arroyo del Partido en dicho paraje, pues en este caso el arroyo daría un giro en dirección hacia la aldea de El Rocío, reactivando un nuevo brazo del cono de sedimentación en el lugar.

**AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Comisión Científica del Proyecto Doñana 2005 y al Espacio Natural de Doñana, de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), su apoyo a través de la financiación de los proyectos de investigación que han permitido el conocimiento de la situación para redactar este artículo. Se reconoce especialmente al Ingeniero Director de las obras de la Actuación núm. 3, Benigno Bayán Jardín; al Técnico del Área de Conservación del PND, Carlos Urdiales Alonso y a los ayudantes de éste Abel Valero Lancho y Diego García Díaz; así como también a Juan Ignacio García Viñas que nos acompañó en los trabajos de campo.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Mao L. 2005. Analisis comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici Ph Thesis. pp. 307. Dipartimento Territorio e Sistema Agro-Forestali. Università degli Studi di Padova.
- Mintegui J. A., Robredo J. C. & Sendra P. J. 2003. Avenidas torrenciales en el arroyo del Partido y su incidencia en la marisma del Parque Nacional de Doñana, pp. 373, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid.
- Mintegui J. A., Lenzi M. A., Robredo J. C. & Mao L. 2006. Movilización versus estabilización de los sedimentos en cursos sometidos a la dinámica torrencial, pp. 143, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid.
- Mintegui J. A., Robredo J. C., Gonzalo C de & Huelin P. 2009 Seguimiento de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, 139 pp., E. T. S. de Ingenieros de Montes, Departamento Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.
- Mintegui J. A., Robredo J. C., Gonzalo C de & Huelin P. 2010 Restoration of a degraded torrential stream by means of a flood control system: the case of Arroyo del Partido stream (Spain). Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III, Editors: Wrachien D. de & Brebbia C. A., pp. 213-223, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 67, doi:10.2495/DEB100181
- Saura J.; Bayán B.; Casas J.; Ruiz de Larramendi A. & Urdiales C. 2001 Documento marco para el desarrollo del Proyecto Doñana 2005, Regeneración

hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana, pp. 201, Ministerio de Medio Ambiente.

Sendra Arce P. J. 2002 Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales: Aplicación al caso del arroyo del Partido, Huelva. Tesis Doctoral, pp. 400, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela T. S. Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

Urdiales C. 1996. Informe sobre los cambios recientes en el tramo final del arroyo del Partido.

Parque Nacional de Doñana. Organismo Autónomo Parques Nacionales. 30 pp. Anexo fotográfico 45 pp. Ministerio de Medio Ambiente.

U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2008. HEC-RAS (River Analysis System). Version 4.0.

U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2009. HEC-HMS (Hydrologic Modelling System). Version 3.4.

## COMPARISON OF MATHEMATICAL ALGORITHMS FOR DETERMINING THE SLOPE ANGLE IN GIS ENVIRONMENT

### APLICACIÓN DE ALGORITMOS MATEMÁTICOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE PENDIENTE EN UN ENTORNO SIG.

José L. García Rodríguez<sup>1</sup> and Martín C. Giménez Suárez<sup>2</sup>

#### Abstract

Many environmental models depend to a great degree on the accuracy of estimated slope values. A Geographic Information Systems (GIS) can extract slope angles from Digital Elevation Models (DEMs) using slope algorithms. The objective was to verify differences in estimating slope values using nine different mathematical algorithms on 10 m resolution DEMs. Software used were ArcGIS® 9.2 and SEXTANTE®. SEXTANTE® allows selecting the algorithm in order to calculate slope angle values, unlike ArcGIS, which offers only one option.

The results indicated that the 2<sup>nd</sup> Polynomial Adjustment algorithm of Zevenbergen and Thorne is the most appropriate for the slope angle estimation.

**Keywords:** ArcGIS, Sextante, slope angle, algorithm, DEM, GIS

#### Resumen

Muchos de los modelos ambientales dependen en gran medida de la precisión en las estimaciones de pendiente. Un sistema de información geográfica (SIG) puede extraer ángulos de pendiente desde modelos de elevación digital (DEM en inglés) usando los denominados algoritmos de pendiente. En este trabajo se busco verificar diferencias en la estimación del valor de pendiente, calculados a partir de 9 diferentes algoritmos matemáticos sobre DEMs de 10 m de resolución. El software utilizado ha sido los GIS, ArcGIS® 9.2 y SEXTANTE®. Este último permite la posibilidad de poder elegir con que algoritmo poder calcular los valores de pendiente sobre una cuenca, a diferencia de ArcGIS® que solo tiene una opción disponible. Los resultados indicaron que el algoritmo de Ajuste de Polinomio de 2° grado de Zevenbergen y Thorne (1987), resultó el más apropiado para la estimación de la inclinación de pendiente.

**Palabras Clave:** ArcGIS, Sextante, inclinación de pendiente, algoritmo de pendiente, DEM, SIG

#### INTRODUCTION

The improved accuracy of slope gradient values obtained from Geographic Information Systems (GIS) has a fundamental objective: to contribute to a wide range of environmental models, like erosion models, that have the slope factor as an input.

A GIS can extract slope angles from Digital Elevation Models (or DEMs) using slope algorithms. The effects of slope algorithms over slope angle estimation can vary widely in terms of the accuracy of the calculation.

#### Objectives

- Objective 1: Confirm differences in estimated slope values, calculated using 9 different mathematical algorithms on DEMs of 10 m resolution.
- Objective 2: Study Root Mean Square Error (RMSE) between each method and field data obtained for three ranges of slopes, 0-5° (9%), 5-20° (9-36%), and >20° (>36%) to verify the slope algorithm that best represents each range.

#### Material and Methods

The aim of this study was to compare data calculated using GIS and sample points measured in the Arroyo del Lugar basin (Figure 1). To make this possible, a series of slope data was taken in the field, in order to compare them with the data extracted from DEMs (Table 1). An analog clinometer was used in the field to measure the slopes; and a Trimble® GeoExplorer 3 GPS to determine the geographical position. The Topogrid method included in ArcGIS was used to create a DEM from 10 m contour lines.

Software used in this paper were GIS ArcGIS® 9.2 and SEXTANTE® (Olaya, 2006).

One of the GIS used for this study was the recently launched SEXTANTE (Olaya, 2006). It facilitated the modernization, as it offers very significant advantages in terms of the hydrological analysis, in comparison with ArcGIS. One of the most important advantages provided by SEXTANTE is the possibility of selecting the algorithm to calculate slope angle values, as it has several algorithms integrated, unlike ArcGIS,

<sup>1</sup> Professor of Hydrology, Department of Forest Engineering, Hydraulics and Hydrology Laboratory, ETSI Montes, Polytechnic University of Madrid, Spain. josel.garcia@upm.es

<sup>2</sup> Corresponding author. Forestry engineer. Hydraulics and Hydrology Laboratory, Forest Engineering Department, ETSI Montes at the Polytechnic University of Madrid, Ciudad Universitaria s/n (28040), Madrid, Spain. Tel/Fax:+34-913367093, martinccgs@ingenieros.com

which offers only one option. SEXTANTE is a free software and available in English and Spanish. SEXTANTE is now part of GvSIG package (<http://www.gvsig.gva.es/>).

### Test Area

The basin chosen was the Arroyo del Lugar Basin located in the Municipality of Puebla de Valles, in the northwest section of the Province of Guadalajara, Spain (Figure 1). The total area of Arroyo del Lugar basin is 768.62 ha and total length of the main stream is 7,253 m.

The main characteristic of the basin is the high quantity of gullies with steep slopes.

### Methods - Objective 1

Slopes were calculated over a DEM with a resolution of 10 x 10 m, using nine different mathematical algorithms:

- a. Neighbourhood Method. Burrough, P. A. and Mcdonell, R.A. Algorithm (1998). Included in ArcGIS.
- b. 2<sup>nd</sup> Degree Polynomial Adjustment. Bauer, Rohdenburg and Bork Algorithm (1985)
- c. 2<sup>nd</sup> Degree Polynomial Adjustment. Heerdegen and Beran Algorithm (1982).
- d. 2<sup>nd</sup> Degree Polynomial Adjustment. Zevenbergen and Thorne Algorithm (1987).
- e. 3<sup>rd</sup> Degree Polynomial Adjustment. Haralick Algorithm (1983)
- f. Maximum Slope. Travis Algorithm (1975)
- g. Maximum Slope by Triangles. Tarboton Algorithm (1997)
- h. Least Squares Fit Plane. Costa-Cabral and Burgess Algorithm (1996)
- i. Maximum Downhill Slope. Hickey, Van Remortel and Maichle Algorithm (2004)

The methods named above can be divided into three groups.

The first group consists of methods marked with letters a to e; i.e. the neighbourhood method and the polynomial methods, which calculate an average value through the central cell, using at least 4 of 8 surrounding cells (Dunn *et al.*, 1998) over a 3 x 3 cells network (Figure 2). This group of algorithms is known as "averaged algorithms", because they use four or more cells in a network to calculate the slope of the central cell.

The neighbourhood method is the technique incorporated in ArcGIS, to determine slope values (Dunn *et al.*, 1998).

Dunn *et al.* (1998) mention that the neighbourhood method does not consider the elevation of the central cell. As such, this leads to a certain inaccuracy in

slope estimates if the information regarding altitude presents small depressions, peaks, or if the network is centred along a mountain range or valley.

The polynomial adjustment or the quadratic surface method is a partial quadratic equation that can be used to pass through exactly nine elevation points in a three by three grid (Zevenbergen and Thorne, 1987). The slope is the first derivative z (altitude) with regard to the direction of the slope.

This methodology considers only 4 neighbouring cells ( $z_2, z_4, z_6$  and  $z_8$ ) which are adjacent to the central cell ( $z_9$ ); consequently its consideration is limited to the local variability surrounding the central cell (Figure 2). In summary, according to Dunn *et al.* (1998) the same limitations inherent in the neighbourhood method apply to the Polynomial Adjustment methods.

A second group includes the methods labelled from f to h. These methods are fundamentally associated with flow algorithms, and not with a purely morphometric analysis. They consider the flow moving through a flat surface in the direction of the maximum slope (Suet-Yan Lam, 2004). Due to that, the local morphometry is not defined based on a mathematical function type  $z = f(x, y)$ , nor are the tools for differential calculus used, as often happens in other cases. As a result, obtaining certain parameters using these methods is not recommendable. Slopes and directions obtained may be valid, although less accurate (Olaya, 2006).

The third group represents algorithms that calculate maximum slope as the direct difference between the central cell and a neighbouring cell. This group, is represented by the Maximum Downstream Slope Algorithm of Van Remortel *et al.* (2004). Hickey *et al.* (1994) originally created the algorithm for LS factor estimation. LS factor is part of USLE model for hydric erosion calculation. Van Remortel *et al.* (2004) adapted LS factor for RUSLE, i.e., revised USLE model.

This method, unlike the first group, considers the elevation of the central cell ( $z_9$ ) when estimating slope, and this type of methodology, is known as *non-averaged*. This method proposes that the maximum slope (rise/run relation) between the central cell ( $z_9$ ) and its eight neighbours ( $z_1$  to  $z_8$ ) should be used to estimate the slope of the central cell in a 3 x 3 cells network (Dunn *et al.*, 1998).

### Methods - Objective 2

For purposes of this study, DEM error at one point is the difference between calculated slope value and its real value. In this case, the accuracy of slope estimations is presented in the form of the Root Mean Square Error (RMSE) statistic expressed as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i^{interpolated} - S_i^{real})^2}{N}} \quad (1)$$

Where,  $S_i^{interpolated}$  refers to the  $i^{th}$  interpolated slope angle value,  $S_i^{real}$  refers to the  $i^{th}$  known or measured slope angle value of a sample point and N is the number of sample points.

In this case, the RMSE was calculated for the slope algorithms studied in Objective 1 (Table 1), for three ranges of slopes, attempting to make calculations for flat, intermediate and steep surfaces.

Dividing the slopes into three ranges allowed us to determine the methodology that best represents the reality of the terrain in each situation, which consecutively shows which model we should choose at the time we undertake a research, according to the type of predominant surface area.

## RESULTS

### Determine the existence of differences between the slope algorithms groups (field data included).

The analysis revealed that there were no significant differences at the 95% confidence level between all the groups. Statistical values were  $F=0.690$  and  $p=0.718$ . Tarboton's Maximum Slope by Triangles Algorithm (maxpend\_tri) presented the highest "Maximum" value (Max=29.48) and Van Remortel, Maichle and Hickey Maximum Downstream Slope Algorithm had the greatest variability (Std. Dev.= 8.06).

Kruskal-Wallis analysis confirmed the ANOVA results, indicating no difference between the groups. Statistical values with a 95% confidence level, were  $\chi^2=8.125$  and  $p=0.522$ .

### Determine the existence of relations between each slope algorithm and field data

In order to observe the way in which groups are related, correlation coefficients between pairs of variables were calculated using the Pearson and Spearman correlation.

The best correlation with field data, according both, Pearson and Spearman correlation coefficients, was with Zevenbergen and Thorne 2<sup>nd</sup> Degree Polynomial Adjustment (Zevenb\_AP2) algorithm, with a positive value of 0.671 and 0.721 at 99% confidence level, respectively.

### Results of Root Mean Square Error (RMSE) estimation for Slope Algorithms

For smaller slopes than 9%, the polynomial adjustment methods show a tendency for smaller RMSE (Table 2).

RMSE values are similar in the mean slope range (9%-36%) but for slopes bigger than 20 %, RMSE values were disparate.

The row "Total" of Table 2 shows mean RMSE values for each slope algorithm, calculated for the to-

tal spectrum of slopes. According to this, the lowest RMSE corresponds to Zevenbergen and Thorne (Zevenb\_AP2) algorithm.

## Discussion and Conclusions

Since early 1960s, GIS has been used to manage large surfaces of land. A common objective in these management plans has been how to obtain a topographic model. As a result, an accurate estimate of the topography and topographical elements is essential.

The great majority of GIS users, use ArcGIS as the only option. ArcGIS could easily be complemented with other GIS, such as SEXTANTE, which offers calculation variants that are not found in ArcGIS: simply export the DEM made in ArcGIS to SEXTANTE using the *floatgrid* module, apply the slope algorithm, which is appropriate for the study area, reverse this step with the slope raster, and continue working in ArcGIS, if this is the environment preferred by the user.

Tests showed that all algorithms provide similar results of slope angles, but due to the correlation indexes and RMSE values, the recommended algorithm for determining slope angles is the Zevenbergen and Thorne 2<sup>nd</sup> degree Polynomial Adjustment algorithm (Zevenbergen and Thorne, 1987).

## REFERENCES

- Bauer, J., Rohdenburg, H., Bork, H. R. 1985. Ein digitales reliefmodell als voraussetzung fuer ein deterministisches modell der wasser- und stoff-fluess, landschaftsgenese und landschaftsoekologie, h.10, parameteraufbereitung fuer deterministische gebiets-wassermodelle, grundlagenarbeiten zu analyse von agrar-oekosystemen (Eds.: Bork, H.-R.; Rohdenburg, H.), pp 1-15 [In German].
- Burrough, P. A., Mcdonell, R.A. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, p. 190.
- Costa-Cabral, M. C., Burges, S. J. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research* **30**: 1681-92.
- Dunn, M., Hickey, R. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography* **27**(1): 9-15.
- Haralick, R. M. 1983. Pattern recognition and classification. Manual of Remote Sensing, 2<sup>nd</sup> Edition, Vol. 1, Ch.18, American Society of Photogrammetry.
- Heerdegen, R.G. & Beran, M.A. 1982. Quantifying Source Areas Through Land Surface Curvature and Shape. *Journal of Hydrology*. **57**: 359-373.

Hickey, R, A. Smith, AND P. Jankowski. 1994. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 18, 5, pp. 365 - 380.

Olaya, V. 2006. SEXTANTE. Edition 1.0. Digital version. UNEX. Extremadura, Spain. www.sextantegis.com (http://www.gvsig.gva.es/).

Suet-Yan Lam, C. 2004. Thesis: Comparison of flow routing algorithms used in geographic information systems. Master's Thesis. Faculty of the Graduate School University of Southern. California. USA.

Tarboton, D.G. & Shankar, U. 1997. The identification and mapping of flow networks from digital elevation data. Invited Presentation at AGU Fall Meeting. San Francisco. USA

Travis, M.R., Elsner, G.H., Iverson, W.D., Johnson, C.G. 1975. VIEWIT computation of seen areas, slope, aspect for land use planning. US Dept. of Agricultural Forest Service Technical report PSW 11/1975, Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkley, California. USA

Van Remortel, R. D., Maichle R. J., Hickey, R. J. 2004. Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through Array-Based Slope Processing of Digital Elevation Data Using a C++ Executable. *Computers & Geosciences*. 30: 1043-1053.

Zevenbergen, L. W., Thorne C. R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*. 12: 12-56.

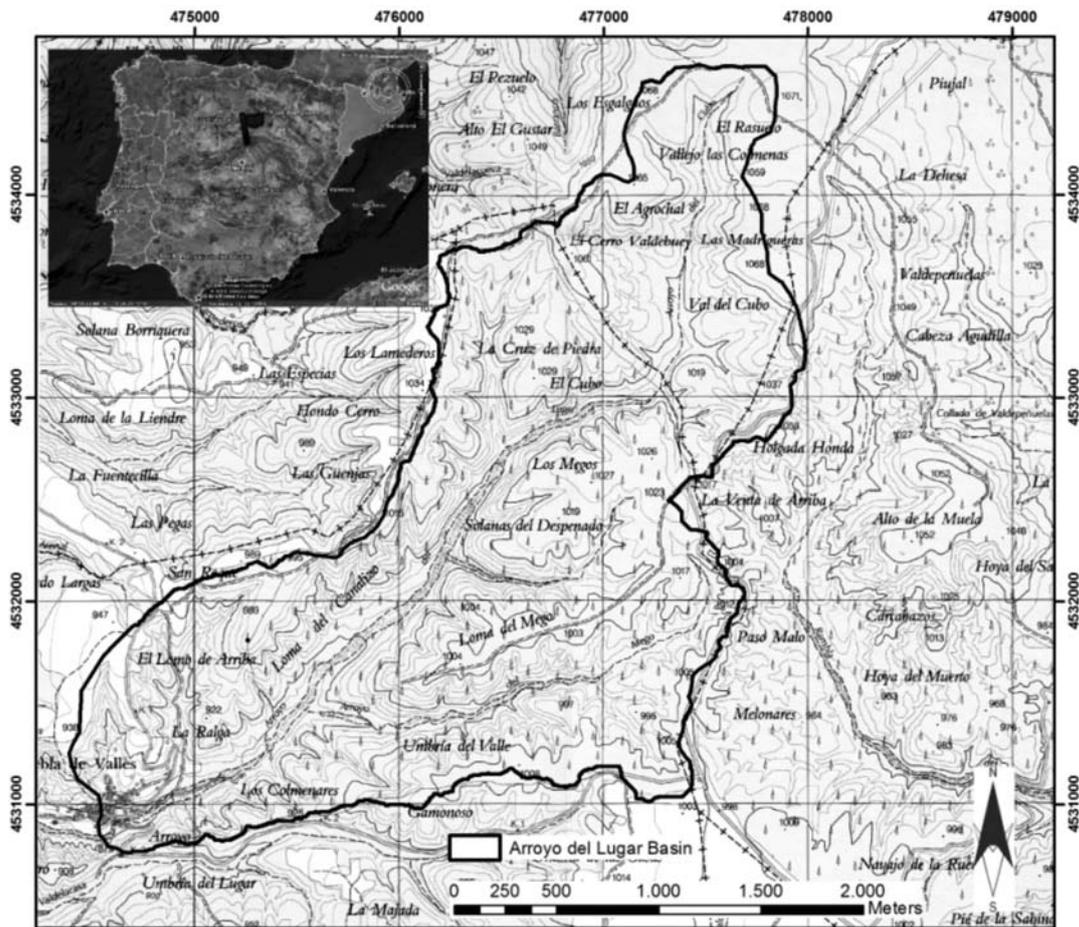


Figure 1. Location of the Arroyo del Lugar basin (Puebla de Valles, Spain)

z1	z2	z3
z8	<b>z9</b>	z4
z7	z6	z5

Figura 2. 3 x 3 mask of cells of a raster grid.

**Table 1. Slope Values in degrees from nine different algorithms to estimate slope, extracted from nine rasters, with a cell size of 10 m and sample points taken in the field (“Campo10m” column).**

Point	Cam-po10m	ArcGIS (S&E)	Bau_AP2	Zeve_AP2	Herr_AP2	Max_pen	Max-pen_tri	PI_ajuste	Hara_AP3	Hick_mpab
1	22.294	14.864	16.931	15.205	16.931	13.278	13.609	15.128	15.365	14.332
2	7.407	8.514	8.715	8.432	8.715	6.838	10.380	8.118	8.677	9.524
3	16.699	10.179	12.885	10.228	12.885	5.840	8.358	9.613	9.694	5.439
4	14.036	15.444	15.979	14.244	15.979	8.609	14.196	13.564	13.343	11.411
5	1.718	4.424	3.694	3.595	3.694	3.054	2.485	3.473	3.655	2.438
6	12.407	15.283	8.715	12.448	8.715	10.582	9.254	11.605	11.767	14.684
7	30.964	15.640	15.651	14.331	15.651	12.120	9.254	14.263	14.720	15.025
8	1.146	14.897	3.694	7.341	3.694	4.864	5.527	6.857	6.592	11.251
9	30.964	23.494	12.663	24.581	12.663	20.500	20.384	23.822	24.179	19.684
10	20.807	23.926	19.742	23.495	19.742	21.350	21.762	23.086	23.099	26.044
11	20.807	25.910	20.322	27.015	20.322	28.018	22.864	27.072	27.615	24.754
12	19.290	17.582	20.322	19.889	20.322	25.407	21.287	20.002	20.488	28.066
13	14.036	6.675	15.873	7.885	15.873	9.634	17.122	8.042	7.424	6.021
14	6.277	15.133	15.914	12.086	15.914	11.106	19.803	12.218	12.367	13.359
15	4.574	13.120	14.447	19.636	14.447	21.765	15.923	19.767	20.545	15.724
16	11.860	11.161	14.447	11.526	14.447	10.969	19.560	11.623	11.104	10.503
17	1.718	15.041	16.237	12.647	16.237	15.023	19.560	13.009	12.613	20.119
18	6.277	15.275	12.702	12.459	12.702	13.038	18.692	12.827	13.081	14.533
19	6.843	1.025	6.121	4.850	6.121	6.325	10.834	4.925	4.532	1.085
20	2.291	0.754	2.912	0.754	2.912	0.952	4.477	0.717	0.596	0.852
21	1.146	1.459	2.388	3.110	2.388	3.628	5.092	2.919	3.013	1.403
22	1.146	1.922	3.212	2.545	3.212	3.448	5.092	2.647	2.580	2.143
23	9.090	6.766	8.388	10.121	8.388	14.023	11.443	10.476	11.276	11.157
24	1.146	1.348	3.932	2.048	3.932	2.495	6.757	2.008	1.924	1.107
25	4.004	5.618	9.704	6.903	9.704	7.595	14.438	6.804	6.075	5.551
26	5.143	3.825	10.018	6.232	10.018	8.003	15.321	6.073	5.983	5.046
27	7.407	14.015	10.581	11.878	10.581	11.535	10.988	11.618	11.716	12.022
28	7.407	7.455	10.581	8.412	10.581	7.333	20.832	8.220	7.853	5.573
29	6.843	7.789	10.492	9.778	10.492	13.099	20.832	9.800	9.897	10.279
30	7.970	12.828	12.662	15.093	12.662	14.105	20.737	14.472	14.651	11.234
31	14.574	16.128	13.560	15.612	13.560	20.503	24.385	15.609	15.795	23.584
32	11.310	24.858	21.889	27.826	21.889	29.487	24.385	27.317	27.633	26.406

Note: Campo10m: Field data; ArcGIS(S&E): Burrough, P. A. and Mcdonell, R.A. Alg. (1998); Bau:AP2: Bauer, Rohdenburg and Bork Alg. (1985); Herr\_AP2: Heerdegen and Beran Alg. (1982); Max\_pen: Travis Alg. (1975); Maxpen\_tri: Tarboton Alg. (1997); PI\_ajuste: Costa-Cabral and Burgess Alg. (1996); Zeve\_AP2: Zevenbergen and Thorne Alg. (1987); Hara\_AP3: Haralick Alg. (1983); Hick\_mpab: Van Remortel, Maichle and Hickey Alg. (2004).

**Table 2. Root Mean Square Error (RMSE) values, with regard to field data, for each one of the 9 slope algorithms, extracted from 9 rasters with a cell size of 10 m. Smallest RMSE is indicated in shady.**

Slope Ranges	ArcGIS (S&E)	Bau_AP2	Zeve_AP2	Max_pen	Maxpen_tri	PI_ajuste	Herr_AP2	Hara_AP3	Hick_mpab
0-5° (9%)	7.09	6.37	6.71	6.37	7.57	8.45	6.75	6.84	7.97
5-20° (9%-36%)	5.61	4.55	5.34	4.55	6.54	8.95	5.27	5.44	6.66
>20° (>36%)	8.74	10.95	9.09	10.95	10.94	11.53	9.23	9.05	9.88
Total	6.61	6.46	6.45	6.46	7.67	9.27	6.46	6.52	7.62

## INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social.

Las contribuciones deben ser el resultado de una investigación original adecuadamente diseñada y que contenga un **título, resumen, palabras clave, introducción, metodología, resultados y discusión, conclusiones o consideraciones finales, agradecimientos (opcional) y referencias bibliográficas**. Los artículos presentados deben ser originales en idioma español o inglés y escritos a espacio sencillo, con letra Arial tamaño 10 y márgenes de 2 cm. y de una extensión de entre 8-15 páginas, contando inclusive aquellas con tablas y figuras.

### Formato

Primera página: Incluirá el título en español e inglés, que debe ser conciso y reflejar el contenido del trabajo, los nombres de los autores, así como su afiliación (nombre de la institución a la que pertenece y correo electrónico). Siempre que aparezcan nombres científicos en el título, estos deberán ser escritos de acuerdo a los registrados en **ITIS** (Sistema de Información Taxonómica Integrado, <http://www.itis.usda.gov/>) siempre y cuando se encuentren disponibles.

Resumen: Los trabajos deben incluir un resumen representativo del artículo, en el idioma original del texto y en el otro idioma oficial de la revista. Se requiere además de 3-6 palabras clave en ambos idiomas separadas por comas que permitirán ubicar el trabajo en las bases internacionales de datos que incluirán a la revista.

### Texto

Tendrá que ser consistente con el tipo de publicación, siguiendo la estructura estándar presentada en la matriz disponible en el sitio web de Aqua-LAC.

### Referencias

Las referencias que aparecen en el texto deben estar presentes en la sección Referencias Bibliográficas en orden alfabético y cronológico. Solo los trabajos citados en el texto deberán aparecer en la sección de Referencias Bibliográficas y viceversa.

### Figuras y Tablas

Se prefieren figuras, dibujos y fotografías electrónicas en formato GPS o TIFF, de 300 DPI (color) y 1200 DPI (blanco y negro).

Las figuras, ilustraciones y fotografías digitales deben ser enviadas en forma separada, debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con una breve descripción.

Las tablas deben ser enviadas por separado, enumeradas y con un título, que aparecerá en la parte superior de la misma. Deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas, preferiblemente no debiendo exceder un máximo del 50% del tamaño de la página. **NOTA:** Las tablas deben utilizar el Sistema Internacional de unidades

### Remisión de Trabajos

Los autores deberán enviar sus trabajos en solamente en formato electrónico a [aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy).

### Derechos de autor

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la Revista.

**NOTA:** Descargue las instrucciones en versión extendida en [www.unesco.org.uy/phi/aqualac](http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac)

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Aqua-LAC journal is a multidisciplinary publication that will contain articles, technical notes and water resources reviews, as much in a scientific as in an economic and social dimension.

The articles must be the result of an original research, dully designed and containing **title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, conclusions, acknowledgments (optional), and bibliographic references**. The manuscripts presented will be originals in Spanish or English, on subjects related to the areas of the journal. Will be written with Arial font size 10 pt, with single spacing, 2 cm margins, and with a length between 8 and 15 pages including tables and illustrations.

### Format

First page: will include the title in Spanish and English, that should be concise reflecting the content of the document, the authors names and their affiliation (name to their belonging institution, telephone, fax and e-mail). If scientific names appear in the title, this should be written according with those in ITIS (Integrated Taxonomic Information System, <http://www.itis.usda.gov/>) if they are available.

Abstract: the articles must include a representative abstract, in the language of the paper and in the other official language of the journal. Also, 3-6 key words in both languages will be requested, separated by commas to allow finding the manuscript in the international databases including the journal.

### Text

Shall be consistent with the type of journal, following the standard format presented in the template provided in the Aqua-LAC web-page.

### References

References that appear in the text should be presented in the Bibliographic References section in alphabetical and chronological order. Only works cited in the text should appear in the References section and viceversa.

### Tables and Figures

Figures, drawings and digital photos are preferable in GPS or TIFF, 300 DPI (colour) and 1200 DPI (black and white).

The figures, illustrations and digital photos should be sent separately, properly identified with a number that should be consistent with the way they are mentioned in the manuscript and a short description.

The tables should be sent separately, numbered and with a title that will be shown on its upper part. In the text the tables should be cited with a rising numeration order according to its description, preferably not exceeding a maximum of 50% of the size of the page.

**NOTE:** The tables should use the International Units System.

### Submission of manuscript

Manuscripts must be submitted only in electronic format to [aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy).

### Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree for the author's rights to be transferred to the Journal.

**NOTE:** Download the extended instructions from [www.unesco.org.uy/phi/aqualac](http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac)

UNESCO

Programa Hidrológico Internacional  
Oficina Regional de Ciencia  
para América Latina y el Caribe

International Hydrological Programme  
Regional Office for Science  
for Latin America and the Caribbean

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94  
[aqualac@unesco.org.uy](mailto:aqualac@unesco.org.uy)  
[www.unesco.org.uy/phi/aqualac](http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac)

