



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. 6
SEP. 2014

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe
Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Avila - 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 Gutierrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Lilián Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
UNESCO - IHE Water Institute, Holanda
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California Davis, USA
- Polioptró Martínez - Ingeniería Hidráulica
Universidad de Puebla, México
- Victor Pochat - Gestión Integrada
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente
- STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF**
- Editor en Jefe / Editor in Chief**
Roberto Pizarro
- Editora Ejecutiva / Executive Editor**
Zelmira May
UNESCO
- Coordinador de Edición / Editorial Coordinator**
Gabriel Soumis-Dugas / Jan Timo Walter
UNESCO
- Diseño Gráfico / Graphic Design**
Ser Graficos
- Diseño de Portada / Cover Design**
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Fluvial topographic zone concept
Aline de Almeida Mota, Masato Kobiyama, Fernando Grison
El concepto de zona topográfica fluvial 1
- Vulnerabilidad de la población de la ciudad de Plata (Argentina)
a precipitaciones extraordinarias
Marcos Cipponeri, Mónica Laura Salvioli, Guillermo Larrivey, Andrea Vanina Afranchi, Gustavo Adrián Colli
Vulnerability of the population of the city of la Plata (Argentina)
to extraordinary rainfalls 11
- Simulación de los efectos del cambio climático en los recursos
hídricos y estrategias de adaptación, usando el modelo Water
Evaluation and Planning (WEAP), en la cuenca de la región
Yaque del Norte de la República Dominicana
J. F. Febrillet Huertas, S. José Clases, L. Bello y J. Chalas
Simulation of climate change impacts on water resources and
adaptation strategies, using the Water Evaluation and Planning
model (WEAP), in the Yaque del Norte River Basin in the
Dominican Republic 21
- Opciones de restauración ecológica a través de simulación
numérica; caso estudio del tramo medio del río Ebro, España
**ernesto Veres, María González-Sanchis, Javier Murillo
y Pilar García-Navarro**
Ecological restoration options with numerical simulation:
case study of the middle Ebro river, Spain 37
- Un modelo hidrodinámico 3D del humedal del río Cruces:
cálculo del tiempo de residencia utilizando mohid.
Antonio Tironi-Silva, Víctor H. Marin, Luisa E. Delgado
An hydrodynamic model of rio Cruces wetland:
calculation of residence time using mohid..... 50
- Determinación de la recarga hídrica potencial en la
cuenca hidrográfica Guara, de Cuba
Ing. Dulce María Rodríguez, Lugo, Dr. Pedro Pérez Álvarez
Determination of potential groundwater recharge in Guara
basin of Cuba 58
- Generación e integración de tecnologías destinada
al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras
de fruta en Chile
**Rodrigo H. Callejas, Juan Vera, Maximiliano Rioseco,
Fernanda Prohens, Helen Osorio, Paulina Pino,
Jaime Navarrete, Rodrigo Gálvez**
Development and integration of technologies to save
irrigation water in two fruit-producing regions in Chile 70

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

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

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

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

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

BLANCA JIMÉNEZ

Aguas Urbanas
Universidad Nacional Autónoma de México, México

EDUARDO PLANOS

Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

ALFONSO GUTIÉRREZ

Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ)
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ - Water Research Center)
University of Queretaro, México

JUAN CARLOS BERTONI

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
National University of Córdoba, Argentina

EVENS EMMANUEL

Université Quisqueya, Haïti
University of Quisqueya, Haïti

WILL LOGAN

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA
International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWarm), USA

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/uy/phi/aqualac
y envíelo a
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/uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org.uy

EDITORIAL

El presente número de la revista incluye una serie de artículos correspondientes al Congreso Regional "Ecohidrología: Un manejo armónico para un mundo sustentable" que tuviera lugar en Santiago, Chile, del 11 al 13 de noviembre de 2013. Este encuentro estuvo dedicado a resaltar la importancia de la ecohidrología como una ciencia emergente en América Latina, unificadora de los conceptos y aplicaciones de la ingeniería hidráulica clásica y su interacción con el medio ambiente. Este fue el primer evento de estas características en la región.

Desde la visión de la ecología, como ciencia que estudia el funcionamiento de los ecosistemas; el agua, el suelo, la vegetación, las actividades del hombre y la protección de los ambientes naturales, sus elementos interactúan fuertemente por lo que resulta necesario comprender el funcionamiento conjunto de todos ellos para desarrollar un conocimiento adecuado. De esta forma, la hidrología integra al resto de los componentes del ecosistema por medio del agua como un agente que interviene simultáneamente como causal, como mediador y como producto de diferentes procesos físicos, químicos y biológicos.

En este contexto, la ecohidrología constituye un enfoque innovador en el ámbito de las ciencias ambientales, y se centra en las relaciones funcionales entre la hidrología y los procesos ecosistémicos en los ambientes acuáticos y terrestres. Se basa en el supuesto de que la gestión sostenible de los recursos hídricos debe realizarse mediante un enfoque integrado del ordenamiento de los recursos terrestres y los hídricos, considerando la capacidad que ambos poseen para mantener procesos dinámicos de circulación de agua, de nutrientes y de flujos energéticos a escala de cuenca. Integra los procesos biológicos, biogeoquímicos e hidrológicos como instrumentos de gestión, que impactan sobre el camino del agua en una región, sobre la calidad y cantidad resultantes.

De acuerdo a la UNESCO, la ecohidrología está enfocada en la comprensión integrada de los procesos biológicos e hidrológicos, con el fin de crear una base científica para un enfoque socialmente aceptable, rentable y sistémico de la gestión sostenible de los recursos hídricos, buscando mejorar la integración de la investigación social, ecológica e hidrológica y generar resultados que permitan el desarrollo de políticas y prácticas eficientes. Es en este contexto que la UNESCO comienza a trabajar sobre el concepto de la ecohidrología, promoviendo una nueva relación en la gestión del agua basada en una aproximación ecosistémica y en el involucramiento activo de los actores sociales en el proceso de toma de decisiones.

Además, los desafíos sociales y ambientales relacionados con cuestiones del agua son sorprendentes en muchos casos. Específicamente, el número de muertes al igual que los daños ocasionados por desastres relacionados con el agua, como inundaciones, deslaves y sequías, se han incrementado impresionantemente en todo el mundo, sobre todo como resultado de nuestra

EDITORIAL

This issue of the journal includes a series of articles for the Regional Congress «Ecohydrology: A harmonious management for a sustainable world» that took place in Santiago, Chile, from 11 to 13 November 2013. This meeting was devoted to ecohydrology, and its importance as an emerging science in Latin America, that unifies concepts and applications of classical hydraulic engineering, as well as its interaction with the environment. This was the first event of its kind for the region.

From the ecology perspective, being a science that studies the interaction of ecosystems, water, soil, vegetation, human activities and the protection of natural environments, its elements interact strongly so that it is necessary to understand the functioning of all of them to develop relevant knowledge. Thus, the hydrology integrates the rest of the components of the ecosystem through water as an agent that intervenes simultaneously as causal, as a mediator and as a result of different physical, chemical and biological processes.

In this context, the ecohydrology provides an innovative approach in the field of environmental sciences, and focuses on the functional relationships between hydrology and ecosystem processes in aquatic and terrestrial environments. It is based on the assumption that sustainable management of water resources should be done through an integrated system of land resources and water approach, considering the capacity that both have to maintain dynamic processes of water and nutrient circulation as well as energy flow at the basin scale. It integrates the biological, biogeochemical and hydrological processes as management tools, which impact on the water cycle in a region, on the resulting quality and quantity.

According to UNESCO, the ecohydrology is focused on integrated understanding of biological and hydrological processes in order to create a scientific basis for a socially acceptable, cost effective and systemic approach to sustainable management of water resources. It also seeks to improve integration of social, ecological and hydrological research and produces results that enable the development of efficient policies and practices. It is in this context that UNESCO started to work on the concept of ecohydrology, promoting a new relationship in water management based on an ecosystem approach and the active involvement of stakeholders in the decision-making process.

In addition, social and environmental challenges related to water issues are surprising in many cases. Specifically, the number of deaths as well as the damage caused by water-related disasters such as floods, landslides and droughts, have increased impressively worldwide, especially as a result of our increasing vulnerability.

The most important global force that could significantly change the water-related risks in the near future is the population growth and its dynamic of space and time. Other forces, such as changes in land use, urbanization, migration patterns,

creciente vulnerabilidad.

La fuerza global más importante que podría cambiar significativamente los riesgos relacionados con el agua en el futuro cercano es el crecimiento poblacional y sus dinámicas espacio-temporales. Otras fuerzas, como los cambios en el uso del suelo, la urbanización, los patrones de migración, las cuestiones de energía y producción de alimentos, se derivan del cambio poblacional y del desarrollo económico. Además, es muy probable que el cambio y la variabilidad climática exacerben los riesgos al agregar mayor incertidumbre.

Ante la creciente inestabilidad climática, crecimiento demográfico y migraciones humanas, y el surgimiento de nuevos centros geopolíticos que afectarán la economía internacional (incluyendo el incremento en el precio de los alimentos y el impacto ambiental intensificado), existe la urgente necesidad de hacer retroceder la degradación de los recursos hídricos y detener el avance de la pérdida de biodiversidad. La apreciación y optimización de los servicios del ecosistema para la sociedad junto con el mejoramiento de la resiliencia de las cuencas hidrológicas ante el grado de presión climática y antropogénica podrían contribuir enormemente a alcanzar esta meta.

Por otra parte, los eventos hidrológicos extremos tales como sequías e inundaciones han aumentado en sus impactos debido al incremento de los asentamientos humanos en zonas propensas a este tipo de desastres. Cada año, son muchas las personas que se ven afectadas por desastres relacionados con el agua, y son cuantiosas las pérdidas económicas causadas por estos fenómenos. Es por esto que el estudio de los extremos hidrológicos debe considerar a los seres humanos al centro de los sistemas hidrológicos, tanto como agentes de cambio como en el rol de beneficiarios de los servicios que brindan los ecosistemas.

Existe la necesidad creciente de ser más activos en la transferencia de conocimiento a los responsables de formular políticas y de tomar decisiones, para garantizar que las decisiones que se tomen estén basadas en el mejor conocimiento disponible.

Este número presenta una serie de artículos que contribuyen a la toma de decisiones y la elaboración de políticas de desarrollo sostenible y a la búsqueda de soluciones alternativas a los problemas vinculados a la gestión del agua en un contexto de creciente incertidumbre.

energy issues and food production are derived from population change and economic development. Furthermore, it is very likely that the change and the climate variability exacerbate the risks by adding more uncertainty.

Given the increasing climatic instability, population growth, human migrations and the emergence of new geopolitical centers that will affect the international economy (including the increase in food prices and intensified environmental impact), there is an urgent need to reverse the degradation of water resources and to stop the advance of biodiversity loss. The appreciation and optimization of ecosystem services to society along with improving the resilience of watersheds to the degree of climatic and anthropogenic pressure could greatly contribute to achieving this goal.

Moreover, extreme hydrological events such as droughts and floods have increased their impacts due to increased human settlements in areas prone to this type of disaster. Each year, many people are affected by water-related disasters, and are large economic losses caused by these phenomena. That is the reason why the study of hydrological extremes should consider human beings in the center of hydrological systems, both as agents of change and as in the role of beneficiaries of services that are provided by ecosystems.

There is a growing need to be more active in transferring knowledge to policy makers and to make decisions, to ensure that decisions made are based on the best available knowledge.

This issue presents a series of articles that contribute to the decision-making, to the policy-making for sustainable development and to the search for alternative solutions to the problems related to water management in a context of increasing uncertainty.

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 fundaments 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”*.

FLUVIAL TOPOGRAPHIC ZONE CONCEPT

EL CONCEPTO DE ZONA TOPOGRÁFICA FLUVIAL

Aline de Almeida Mota¹, Masato Kobiyama², Fernando Grison³

Abstract

The objectives of the present study were: (i) to propose a new concept of a zone where the relationship between the river and hillslopes is more intense, which is called Fluvial Topographic Zone (FTZ), as well as to describe the method to delineate this zone on maps; and (ii) to compare the Permanent Protection Area (PPA) with the FTZ along the main river (28.8 km) of Bugres river basin (78.2 km²) which is located in Rio Negrinho city, Santa Catarina state, Brazil. The indices *TI* (Topographic Index), *STI* (Soil Topographic Index), and sinuosity were selected to verify the applicability of FTZ, because *TI* and *STI* are mainly influenced by the hillslopes, meanwhile sinuosity is related to the river. A significant correlation may indicate that such zone comprises a more intense interaction between the river and hillslope. The boundary of FTZ is the nearest contour line to the river channel. This procedure was evaluated for the studied main river by using a map (1:50,000). *TI*, *STI*, and the sinuosity of the main river and of the contributing areas were estimated. Subsequently, the correlations of the sinuosity with these two indices were evaluated for the whole basin and considering only the FTZ. It was showed that the sinuosity is more strongly influenced by the topography than by the soil properties and that this influence becomes more significant in FTZ. It implies the importance of FTZ as an area for protection as well as for scientific researches. Based on the Brazilian law, the PPA was delimited along the main river and its area was compared with FTZ. The FTZ and PPA comprise 10% and 3% of the total basin area, respectively. This comparison shows that only in the upper part of the main river the FTZ coincides with the PPA very well and that it gradually increases towards downstream. In the lower part of the basin, the width of FTZ reaches 300 m, while PPA keeps the 30-m width. The obtained results permit to conclude that FTZ comprises river meandering dynamics, which is of extreme importance for the preservation of various species of both flora and fauna of the riparian zone. Furthermore, the variable width of FTZ depending on each river can be considered positive, because it is adaptable to rivers' peculiarities.

Keywords: Hydrogeomorphology, Permanent Preservation Area, Riparian zone, sinuosity, Topographic index, Fluvial Topographic Zone.

Resumen

Los objetivos del presente estudio son: (i) proponer un concepto nuevo de una zona, la Zona Topográfica Fluvial (FTZ), donde la relación entre río y vertiente sea más intensa, así como describir el método para delimitar esta zona en mapas; (ii) comparar el Área de Preservación Permanente (PPA) con la FTZ a lo largo del río principal (28,8 km) de la cuenca dos Bugres (78,2 km²) que se ubica en la ciudad de Rio Negrinho, en el departamento de Santa Catarina, Brasil. Los índices *TI* (Índice Topográfico), *STI* (Índice Topográfico de Suelo), y sinuosidad fueron seleccionados para verificar la aplicabilidad de la FTZ, considerando que *TI* y *STI* son influenciados principalmente por las vertientes, mientras la sinuosidad está relacionada esencialmente al río. Por lo tanto, una correlación significativa de ellos debe indicar que la relación río-ladera es más intensa en esta zona. La curva de nivel más cercana al canal del río es el límite de la FTZ. El procedimiento de trazado de FTZ fue realizado para el río dos Bugres utilizando un mapa topográfico (1:50.000). *TI*, *STI* y la sinuosidad de las áreas de contribución fueron estimadas. En seguida las correlaciones de la sinuosidad con los dos índices fueron evaluadas considerando el área de toda la cuenca y sólo el correspondiente a FTZ. Los resultados revelan que la sinuosidad es más fuertemente influenciada por la topografía do que por las propiedades del suelo, y esta influencia se revela más significativa en la FTZ. Esto implica la importancia de la FTZ como área de preservación, así como en investigaciones científicas. Con base en la legislación nacional de Brasil, la PPA del río dos Bugres fue delimitada y comparada a FTZ. FTZ y PPA consisten en 10% y 3% del área de la cuenca, respectivamente. FTZ coincide totalmente con PPA sólo en la parte alta del río principal, y aumenta gradualmente aguas abajo. En la parte baja de la cuenca FTZ alcanza la anchura de 300 m, mientras PPA mantiene siempre el ancho de 30 m. Por lo tanto, los resultados permiten concluir que FTZ comprende la dinámica de meandramiento fluvial, la cual es de extrema importancia para la preservación de diversas especies de flora y fauna en la zona riparia. Además, el hecho del ancho de la FTZ ser variable de acuerdo con cada río debe ser considerado muy positivo, porque se adapta a las peculiaridades de cada río.

Palabras Clave: Hidrogeomorfología, Área de Preservación Permanente, Zona Riparia, Sinuosidad, Índice Topográfico, Zona Topográfica fluvial.

¹ Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, aline.mota@ufrgs.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, masato.kobiyama@ufrgs.br

³ Engenharia Ambiental, UFFS - Campus Chapecó, fernando.grison@uffs.edu.br

INTRODUCTION

Riparian zones, wetlands, and hyporheic zones can be considered as ecotones, which were defined by Holland (1988) as transitional zones between adjacent ecological systems of several types and spatial scales. Kolasa & Zalewski (1995) emphasize the potential role that such ecotones play in maintaining and shaping of various ecological processes. In this sense the results obtained by Smith et al. (1997) suggest that ecotones may be integral to the production and maintenance of biodiversity in tropical rainforests. Poole (2010) defined the fluvial hydrogeomorphology with the question: "How are streams (channels, riparian zone/floodplains, and alluvial aquifers) shaped by surface and subsurface water dynamics and how does the resulting shape influence spatial and temporal patterns of surface and subsurface water movement?". Therefore, hydrogeomorphological processes result from the action of water originating from both river and hillslope. Then, they influence variables such as humidity, temperature, sedimentation rate, and consequently the ecological ones. Ecotones often intensify many of these processes (Kolasa & Zalewski, 1995), which are important for environmental preservation.

The fluvial channel patterns (straight, meandering, braided, etc.) and the dynamic modification of riverbanks can be described by means of sinuosity. This index is scientifically related to morphological, sedimentological and hydraulic characteristics of a river (Ratzlaff, 1991). Given that the erodibility of the riverbanks is associated to their grain size (Knighton, 1998), Schumm (1963) showed that sinuous streams are characterized by a high percentage of silt-clay in the perimeter of the channel.

Geology, land use and topography are factors that directly influence on the hydrological response of the catchments (Kirkby et al., 2002). According to Dunne (1978), the topography of the basin is a variable that strongly influences on the movement of both groundwater and surface water.

For representing the distributed topographic characteristics of a basin, Beven & Kirkby (1979) proposed the Topographic Index – *TI* which is a hydrogeomorphic parameter showing areas with potential for surface runoff generation by saturation. This index was initially tested in TOPMODEL (Topographic-based hydrological model). Furthermore, in order to spatialize soil heterogeneous characteristics and better predict the behavior of infiltration into the soil, Beven (1986) proposed the Soil Topographic Index - *STI* and implemented it in TOPMODEL. The difference between *TI* and *STI* is that the latter includes soil transmissivity.

The variables (sinuosity and topographic indices) explored in the present work to reveal other basin information are obtained from maps. That is one of

the advantages of applying this analysis, because as Tarolli (2014) highlighted, in the last decade, a range of new remote-sensing techniques has led to a significant increase in terrain information, providing new opportunities for a better understanding of earth surface processes based on geomorphic signatures.

Given the importance of the ecotones, there are some specific laws for environmental protection that aim to preserve them. In Brazil, because of such a law, Forest Code, to protect riparian zones, there are the so-called permanent preservation areas (PPA) along the riversides. This protection is strongly justified by their several functions such as river sediment control, mitigation of river water temperature amplitude, and so on. Based on this law, the PPA width varies from 30 m to 500 m depending on river width. However, there is still much uncertainty on what should be its appropriate width along the river.

Therefore, the objectives of the present study were: (i) to propose a new concept of a zone where the relationship between the river and hillslopes is more intense, which is called Fluvial Topographic Zone (FTZ), as well as to describe the method to delineate this zone on maps; and (ii) to compare the PPA with the FTZ on the main river (28.8 km) of Bugres river basin which is located in Rio Negrinho city, Santa Catarina state, southern Brazil. Here, the scientific interest was to verify if some characteristics of river and hillslope in this zone are different from those in the whole basin. In the present study, the river and hillslope characteristics are represented with sinuosity and topographic indexes, respectively.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Bugres river basin – BRB (78.2 km²) is totally inserted in the Rio Negrinho city, Santa Catarina state, Brazil. By observing the digital elevation model (DEM) it is noted that the altimetry strongly varies near the headwater, and that the main thalweg is incised except on the reach very near to the basin outlet (Fig. 1). Its land use is mostly characterized by native forest (Mixed Ombrophilous Forest), secondly pine reforestation, and lastly agriculture.

The predominant soils of BRB are mineral soils, not hydromorphic with an incipient subsuperficial horizon quite heterogeneous in terms of color, thickness, texture, and chemical activity of the clay fraction, i.e. they are similar to Inceptisols. Furthermore, these soils are originated from materials related to rock composition of quite variable nature, such as the rocks that constitute the metamorphic rocks of Brusque Complex, Eo-Paleozoic granite, Paleozoic sedimentary rocks (Botucatu sandstone), and effusive rocks of Serra Geral Formation (EMBRAPA, 1998).

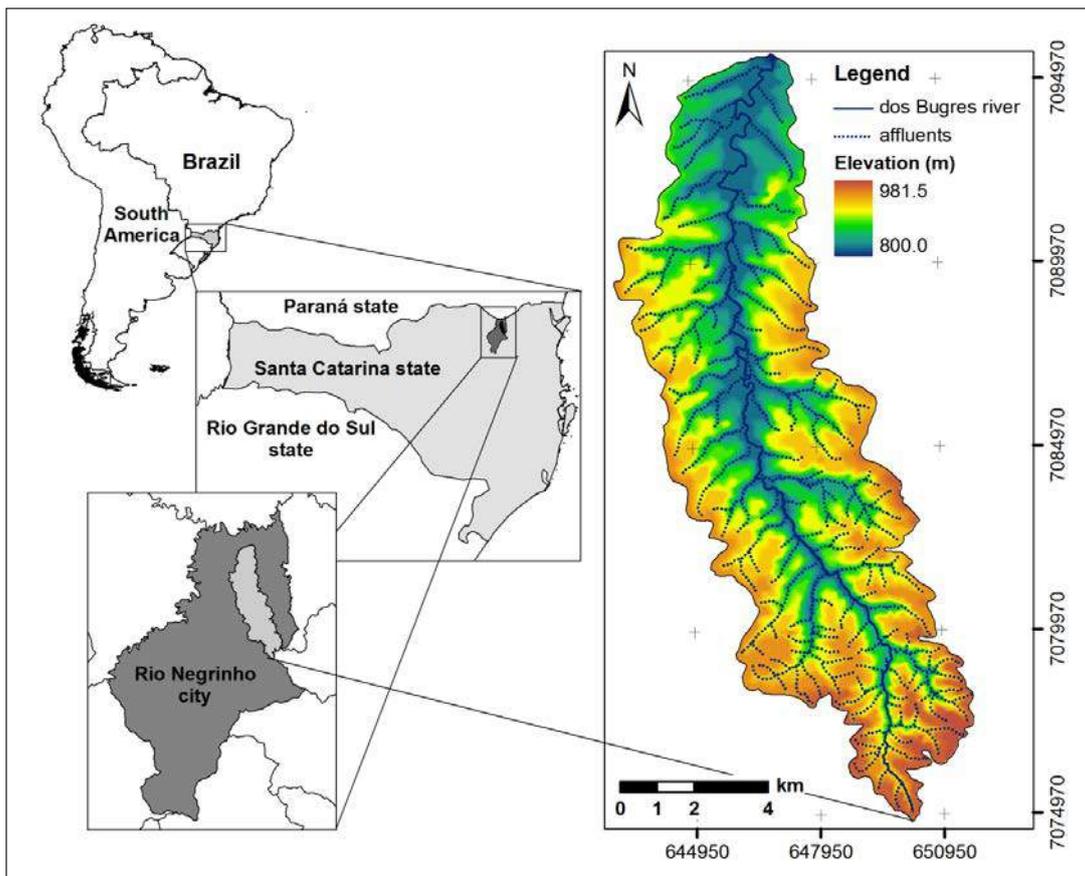


Figure 1. Localization and DEM of Bugres river basin

Materials

The digital topographic map (1:50,000) were interpolated to generate the DEM with 30-m resolution. The results of Sørensen & Seibert (2007), as well as several studies, revealed considerable differences between topographic indices computed for DEMs of different grid resolution. Vaze et al. (2010) noted that the accuracy and resolution of the input DEM have serious implications on the values of the hydrologically-important spatial indices derived from the DEM, and recommended to use the higher resolution DEM available. In this sense, we adopted the highest spatial resolution by considering the scale of the available maps (altimetry, drainage network, and soil survey), i.e., 30 m.

Basin subdivision

The BRB was subdivided into 20 drainage areas from the headwater to the outlet (Fig. 2). The subdivision was based on the following criterion: the outlet of each drainage area is located where a 2nd-order river joins the main Bugres river, and its delineation is made according to the relief.

For example, the area A1 begins at the top and ends where there is a junction of a 2nd-order river and the main river. Then, the area A2 begins just after area A1, and the procedure of subdivision continues until the BRB outlet. These areas support the analysis of the variables' behavior along the BRB.

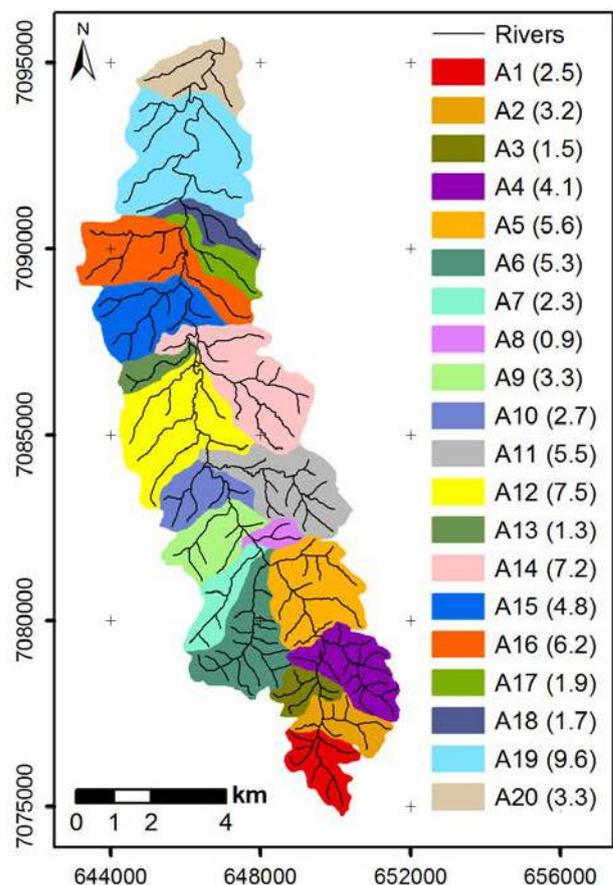


Figure 2. Delineation of drainage areas (in parenthesis their respective areas in km²)

Spatial distribution of soil properties

The estimation of *STI* requires spatially-distributed data of soil depth (*D*) and saturated hydraulic conductivity (*Ks*). Firstly we elaborated a BRB map of soil classification (scale 1:250,000) based on a soil survey conducted in 2004 by the Centre for Information on Environmental Resources and Hydrometeorology of Santa Catarina state (EPAGRI/CIRAM, 2008) (Fig. 3). In this survey, some physical properties of each soil type, the number of layers (or horizons), and its range of depth are also available (Tab. 1).

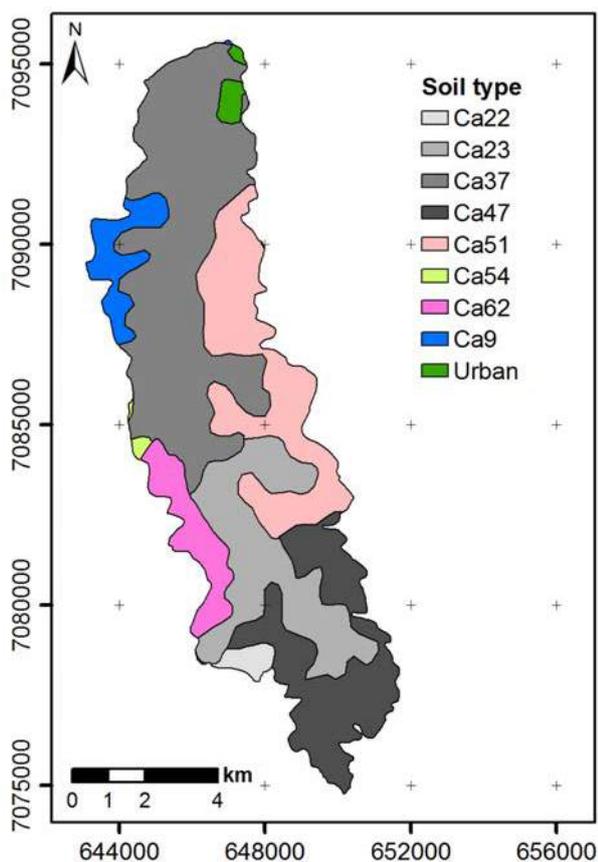


Figure 3. Soil types in BHRB

Table 1. Range of variation of the depth of each soil type present in BHRB

Soil Type	Horizon depth (cm)	
	1	2
Ca22, Ca23, Ca54	60 - 150	60 - 150
Ca51, Ca62	60 - 150	< 60
Ca37, Ca47, Ca9	60 - 150	-

After preparing the soil classification map and checking the range of its respective depth, the spatial distribution of soil depths in BRB was verified. For it, we applied the equation proposed by Saulnier et al. (1997), i.e.

$$D_i = D_{\max} - \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \cdot (z_i - z_{\min}) \quad (1)$$

where D_i is the soil depth at pixel (m); D_{\max} and D_{\min} are the maximum and minimum soil depth encountered in the basin, respectively (m); z_i is the elevation at pixel (m); z_{\min} and z_{\max} are the minimum and maximum elevation found in the basin, respectively (m). In this equation, the values of D_{\max} and D_{\min} used were 3.0 and 0.6 m, respectively, they were obtained by verifying the number of layers and their depth range for each soil type shown in Table 1.

The *Ks* value was estimated by applying the computer program Rosetta Lite Version 1.1 proposed by Schaap et al. (2001). The program is included in the model HYDRUS-1D and implements 5 hierarchical pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters and saturated hydraulic conductivity.

Although the input data in this program can be textural classes only, texture (percentage of sand, silt and clay), bulk density, and one or two water retention points, the present study used only the textural class data obtained in the soil survey (EPAGRI/CIRAM, 2008) to estimate the *Ks* mean value for each soil type. These values were interpolated by the nearest neighbor method to generate a spatially-distributed *Ks* map of BRB.

Table 2. Estimative of *Ks* by applying Rosetta Lite Version 1.1

Texture*	Textural Class **	<i>Ks</i> (m/day)
Medium	Silt	0.4374
Clayey	Clay	0.1475
Very clayey	Clay loam	0.0818

*Soil survey (EPAGRI/CIRAM, 2008).

**Input data on Rosetta Lite Version 1.1.

Calculation of Topographic Index (*TI*) and Soil Topographic Index (*STI*)

TI and *STI* were computed in ArcGIS 9.3.1 by applying eq. 2 and 3 respectively.

$$TI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \quad (2)$$

where $a = (A/c)$ is the area per unit contour; *A* is the drainage area to the section considered (m²); *c* is the contour length of the portion of the area considered (m); and β is the slope of the plot area (degrees).

$$STI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta \times T_0} \right) \quad (3)$$

where $T_0 (= Ks \cdot D)$ is the transmissivity (m²/day); *Ks* is the saturated hydraulic conductivity (m/day); and *D* is the soil depth (m). The calculation procedure is shown in Figure 4. These values were calculated for the entire basin.

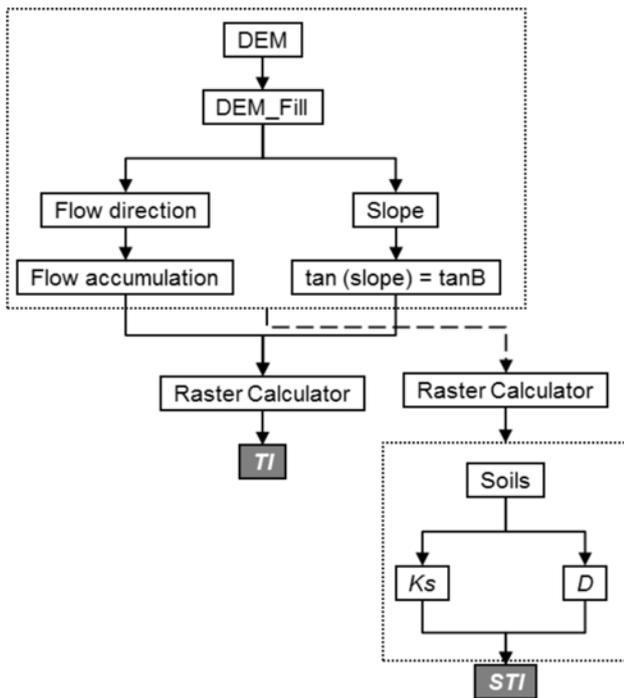


Figure 4. Calculation scheme of *TI* and *STI* using ArcGIS

According to Wood et al. (1988), *TI* is a fundamental parameter in TOPMODEL and is used to predict the topographic redistribution of subsurface moisture. Therefore, the *TI* map reveals potential areas to generate saturation surface (or subsurface) excess runoff. On the *STI* map, areas with higher values are also identified as contribution areas to runoff.

Calculation of sinuosity

The sinuosity was analyzed only on the main river of BRB. The sinuosity of a stream is defined as the ratio of the curvilinear length along the river (C_{RP}) and the straight line distance (C_T) between the end points defined on the stream (Fig. 5). This parameter was calculated for each reach delimited by the drainage areas of the studied basin(Fig. 2).

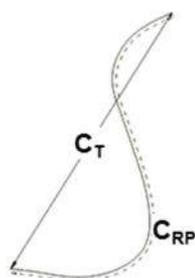


Figure 5. Schematic representation of the measurements involved in the sinuosity calculation

Delineation of the Fluvial Topographic Zone (FTZ)

The FTZ is superficially delimited by the nearest contour line to the river channel. Its delineation

consists of the following steps (Fig. 6): (1) to get a topographic map which includes the basin of interest, its main river (or any river channel whose FTZ is interested to be delineated), and contour lines; (2) to identify the nearest contour line to the river of interest; (3) to join the contours where the nearest contour line changes to other one.

There is an agreement that spatial and temporal scale influences the analysis of environmental processes. In the case of the present work, we are searching for a zone where the interaction between fluvial and hillslope processes is more intense. The scale of the maps available to verify the applicability of FTZ was 1:50,000, and the influence of the maps' scale on the FTZ delineation was not yet explored. Therefore, it is necessary to test it with other scales.

After delineating the FTZ, the relations between *TI* and sinuosity and between *STI* and sinuosity were analyzed for the whole basin and only for the FTZ.

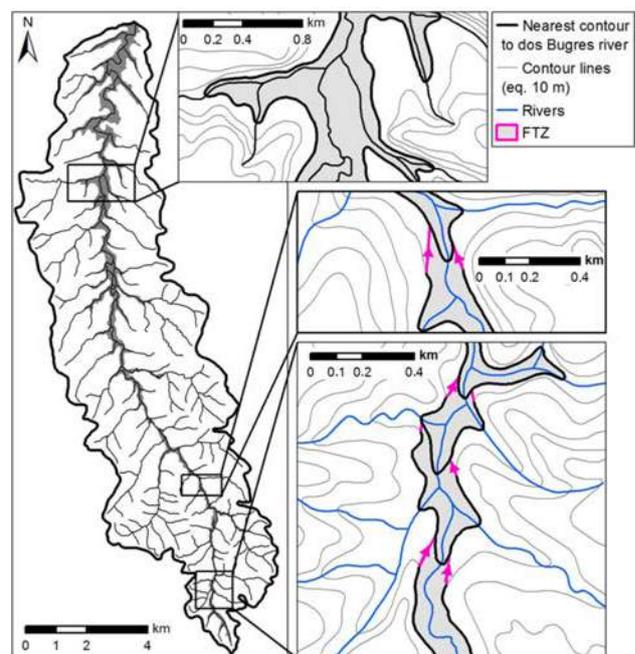


Figure 6. Delineation of Fluvial Topographic Zone

There are other studies that proposed concepts and methods to delimit an area along the river channel for various objectives. For example, Schreiber & Demuth (1997) defined “river network areas” and proposed a new methodology for regionalization of low flows. Though their idea is very similar to that of the present study to delimit the FTZ, they applied a different criterion of delineation: the areas were defined as corridors with 1 km width and length along the main river.

As well as Schreiber & Demuth (1997), the purpose of determining such areas is to identify a more homogeneous zone in the basin. In case of the present study, this zone, i.e. FTZ is where hillslopes relate more directly to the main river.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 7 shows the spatial distributions of D and K_s in BRB. The highest values of K_s are found in the low portion of the basin, close to the basin outlet. It can be mainly explained by the fact that the soil texture in this area is predominantly sandy. Soil depth has a direct relationship to the altimetry. This general aspect is observed in Figure 7b.

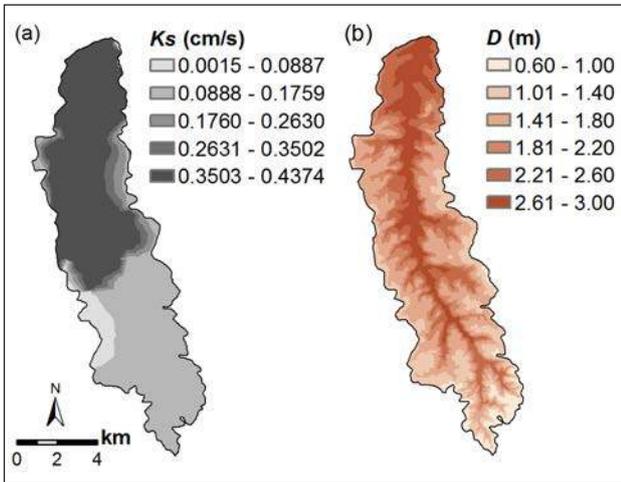


Figure 7. Spatial distribution of soil properties in BRB. (a) K_s ; and (b) D

Some of the most important maps elaborated in the intermediate stages of TI and STI calculation are in Figure 8. On the map of flow direction (Fig. 8a) an integer value is assigned for each cell according to its flow direction. It is noted that the flow direction is consistent with the topography and hypsometry of the basin.

On the map of Flow accumulation (Fig. 8b), the value assigned to each the cell is correspondent to the quantity of cells that directed to it. Thus, the highest values of flow accumulation are found on the main river. Also, the maps of slope (β) and tangent of slope ($\tan \beta$) are shown in Fig. 8c and Fig. 8d, respectively.

The procedure presented in Figure 6 was applied only to the main river of the BRB. The FTZ delineation for the BRB has been already shown in the same figure. In general, the FTZ width varies and increases from the headwater to the outlet. In Figures 9a and 9b, it is observed that the interval of values of TI and STI are almost the same, with a difference that the STI 's interval is smaller. However, no significant difference about the indication of potential areas to generate saturation excess runoff is noted on the maps. It is also observed that the mean TI increases when the mean slope decreases. Moreover, the largest values of TI and STI are encountered at those cells associated to channel network and the smallest at cells located at the top of the hillslope. The maps of TI and STI in FTZ are presented in Figures 9c and 9d.

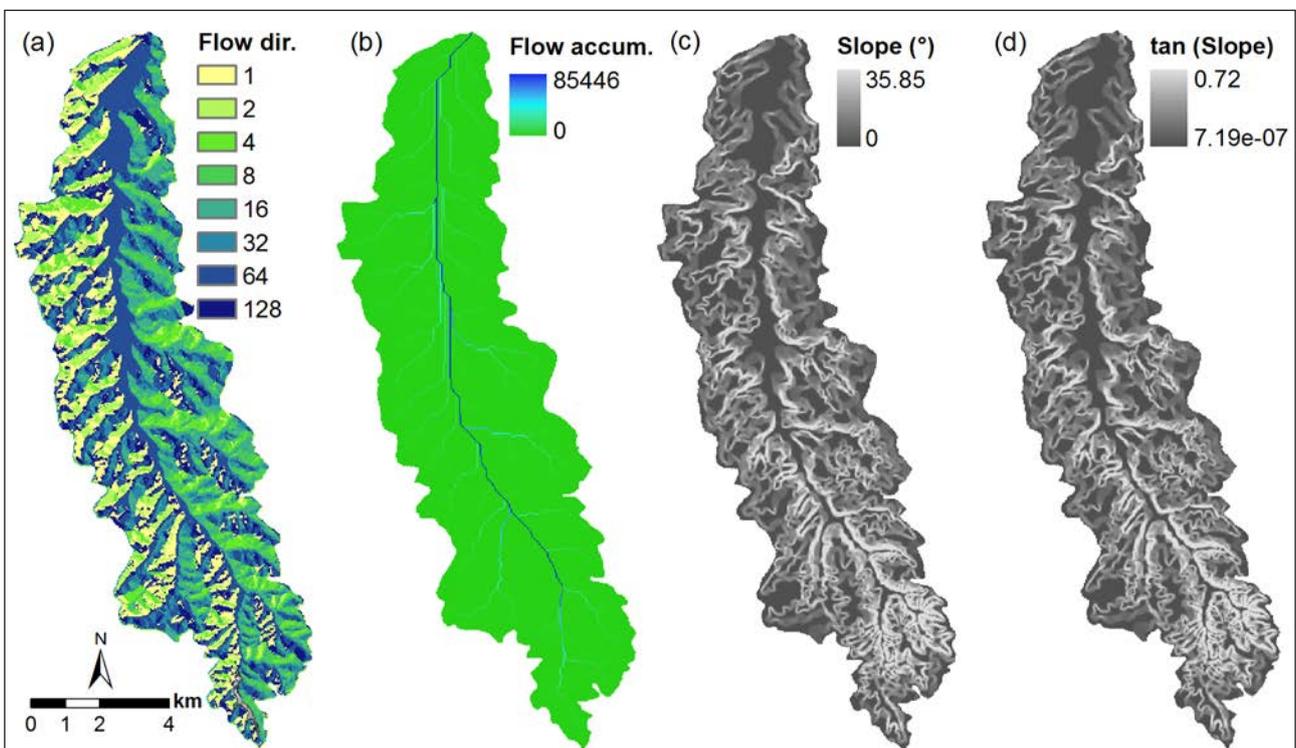


Figure 8. Intermediary steps of calculation of TI and STI . (a) Flow direction; (b) Flow accumulation; (c) Slope (β); and (d) Tangent of slope ($\tan \beta$)

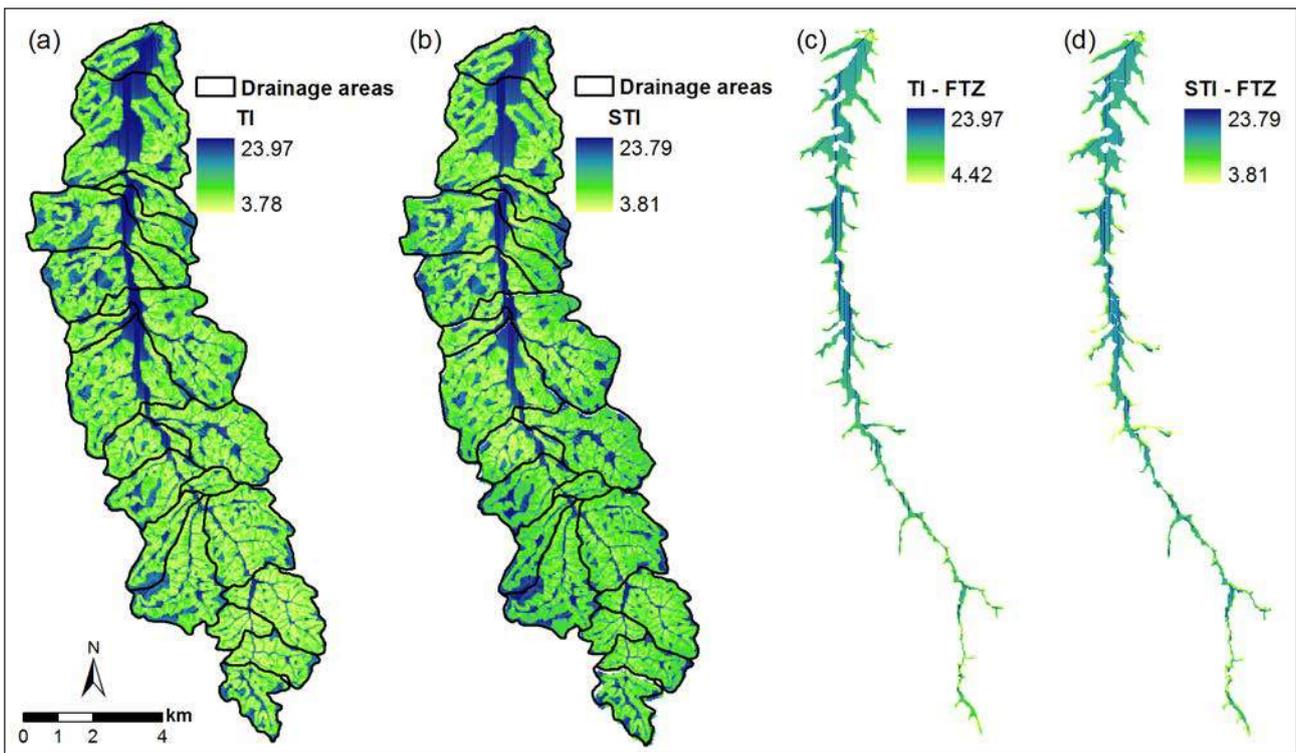


Figure 9. Maps of the indices for the entire BRB and for the FTZ. (a) *TI* for BRB; (b) *STI* for BRB; (c) *TI* for FTZ; and (d) *STI* for FTZ.

Figure 10 shows the changes of *TI*, *STI* and sinuosity of the main river with increasing drainage area. Both indices (*TI* and *STI*) vary similarly along the basin. *TI* increases gradually with the sinuosity from A6 to A20, meanwhile, *STI* remains constant in this region (Figure 10a). It can be thought that from A6 on, *Ks*

increases toward basin outlet (Fig. 7), and the slope effect on increasing *STI* is attenuated. In Figure 10b the *TI* and *STI* changes in the FTZ are presented. It is also noted that *TI* increases more rapidly than *STI* from A6 to A20 (basin outlet). However, in this case, both indices demonstrate similar changes to that of the sinuosity.

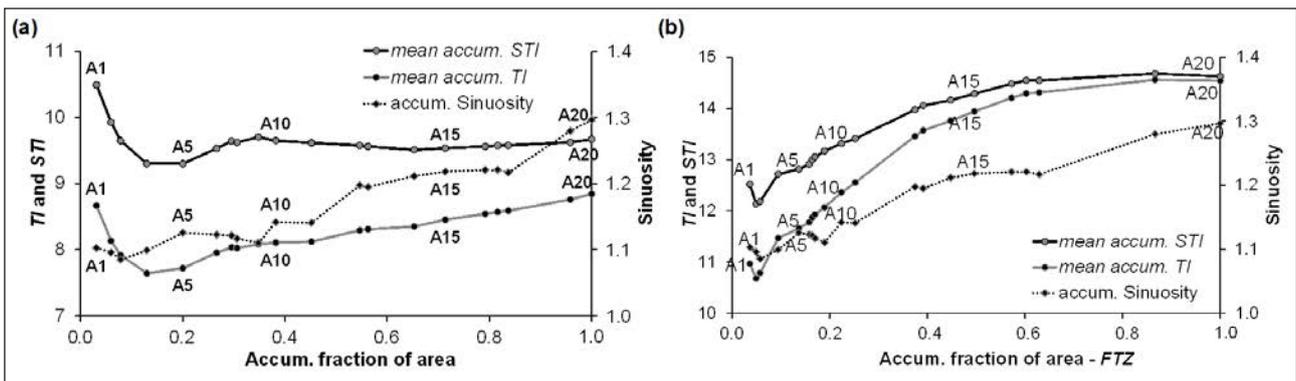


Figure 10. Behavior of the mean accumulated indices (*TI* and *STI*) and sinuosity along the main river: (a) the entire basin; and (b) FTZ

For comparing the changes of *TI*, *STI* and sinuosity more quantitatively, the relationships between the mean accumulated *TI* and *STI* and accumulated sinuosity of the main river at the whole basin level were statistically analyzed (Figure 11). *TI* and sinuosity have a significant correlation (Fig. 11a). On the other hand, there is no significant correlation between *STI* and sinuosity (Fig. 11b). It means that, when the information of *D* and *Ks* is included, the

tendency of interaction between river sinuosity and hillslope topography does not exist anymore. The values of *TI* and *STI* are strongly influenced by the slope. The upper part of the BRB basically consists of the drainage areas from A1 to A4. Analyzing the mean value of *TI* in these drainage areas, A1 has the higher one, which permits to consider it as an outlier. It can be explained with the fact that the A1 topography is gentler than the other drainage areas located in the headwater of BRB.

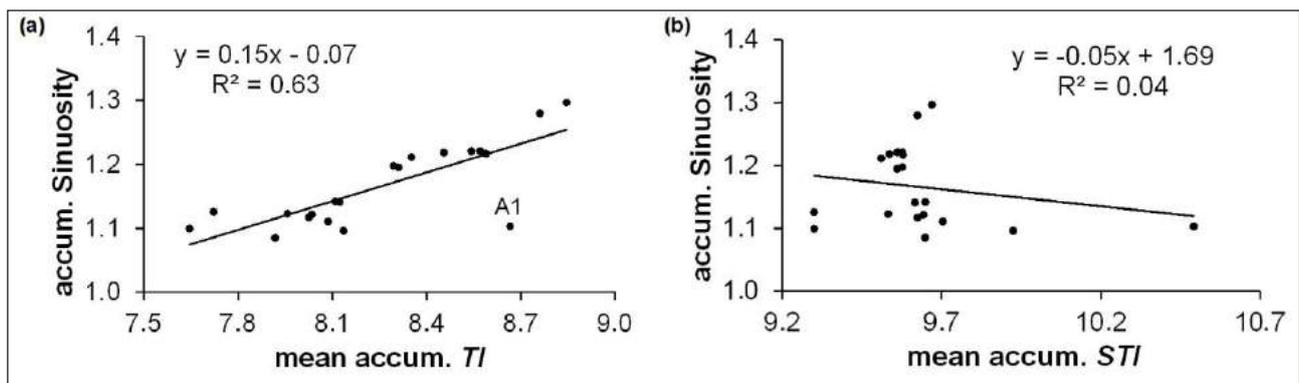


Figure 11. Relationship between the sinuosity of the main river and the mean accumulated indices of the drainage areas. (a) mean accumulated *TI*, and (b) mean accumulated *STI*

A similar analysis of such a relationship between *TI*, *STI* and sinuosity was carried out by considering these indices only in the FTZ (Fig. 9c and 9d). There is a significant correlation between the indices and the sinuosity (Figure 11). This fact may imply the more intense interaction between the topography near the main river channel and the sinuosity. Furthermore,

this result suggests the potential use of the concept of FTZ for future work about river network. The points corresponding to A1, A10 and A20 in both graphs of Figure 12 show the trend of increasing sinuosity and indices toward downstream. This tendency is also seen in Figure 10b.

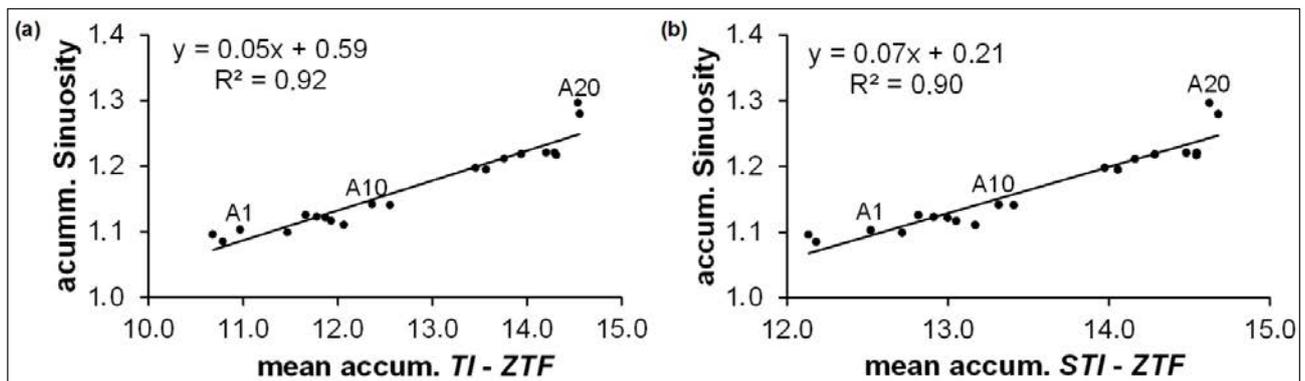


Figure 12. Relationship between the sinuosity of the main river and the mean accumulated indices in the FTZ. (a) mean accumulated *TI*, and (b) mean accumulated *STI*

Based on a Brazilian law (Forest code), the PPA along the main river was delimited and its area was compared with the FTZ (Figure 13). The FTZ and PPA comprise 10% and 3% of the total basin area, respectively. This comparison shows that only in the upper part of the main river the FTZ coincides with the PPA very well and that their difference gradually increases towards the downstream river. In the lower part of the basin, the FTZ width reaches 300 m, while the PPA remains 30-m width. It is worthwhile to note that although the present comparison considered only the areas, the concept of FTZ possesses 3-dimension aspect. Therefore, the more appropriate comparison should be on volumes, which may result in a larger difference between PPA and FTZ.

CONCLUSIONS

The maps of *TI* and *STI* revealed a large variation of these indices in the whole basin. The highest values occurred at cells associated with the channel network and the smaller ones at cells near the top of slopes. *STI* remains almost unchanged even when the slope decreases, because it coincides with areas where *Ks* increases. On the other hand, *TI* increases in downstream direction as the slope decreases.

The analysis of the influence of some soil properties and topography in sinuosity of Bugres river by using *TI* and *STI* showed that these indices can be very useful for understanding the behavior of sinuosity of this river.

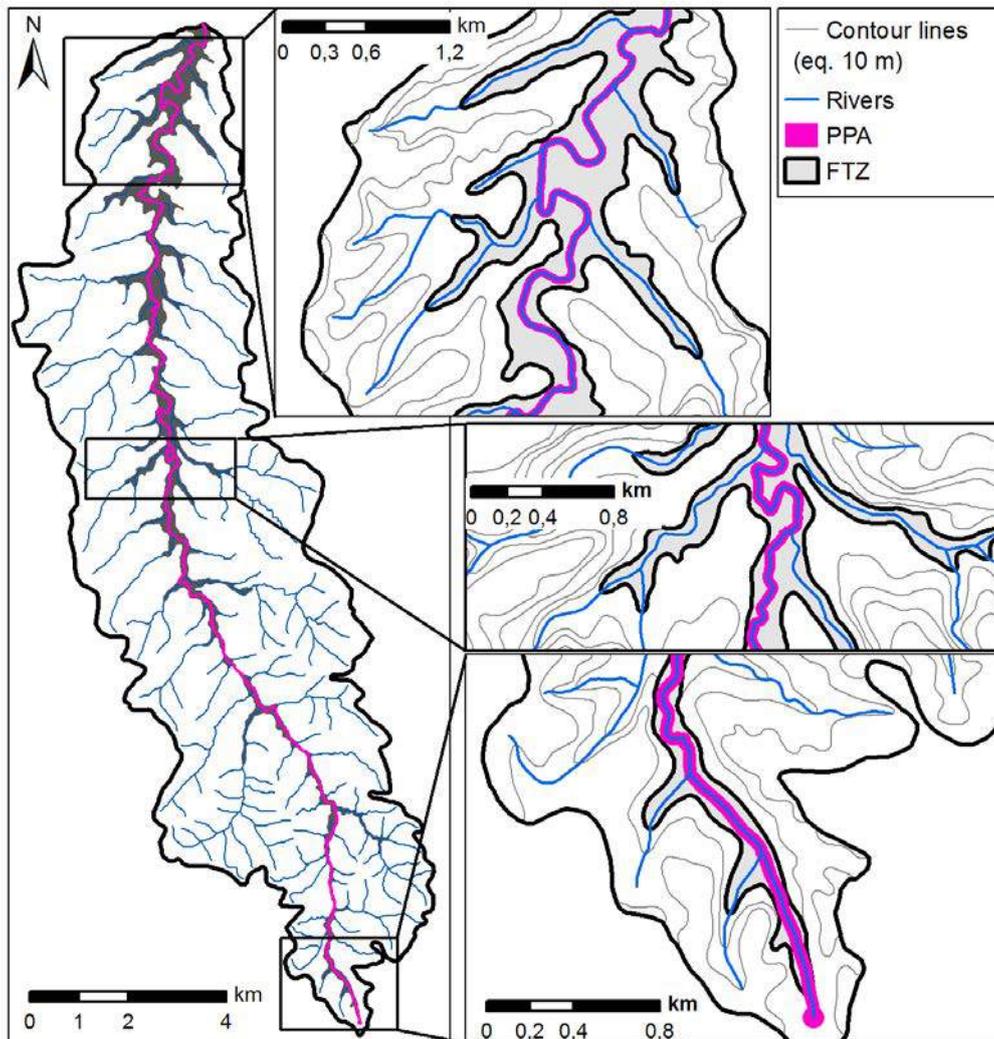


Figure 13. Fluvial Topographic Zone and Permanent Preservation area

The behavior of sinuosity is more strongly influenced by the topography than by soil properties. And this influence becomes more significant only in the FTZ than in the whole basin.

Thus, the FTZ can be defined as the zone along the river where the interaction between fluvial and hillslope processes is more intense. Therefore, it can be thought that the environmental conditions in the FTZ are substantially peculiar and characterized as a mixture of fluvial and hillslope features.

The comparison between FTZ and PPA permits to conclude that the FTZ comprises river meandering dynamics, which is of extreme importance for the preservation of various species of both flora and fauna of the riparian zone. Furthermore, the variable width of the FTZ depending on each river must be considered positive, because it enables capturing rivers' peculiarities.

Furthermore, recently, landscape evolution models have been drawing attention of scientists, both due to technological advances in computer sciences and

geotechnology and due to increasing environmental and territorial problems (Tucker & Hancock, 2010). Each model requires information regarding the mechanisms of meandering, relation between topographical indices and river sinuosity, and so on. Therefore, the results obtained in the present study may contribute to the development of such models.

Kolasa & Zalewski (1995) consider that one of the most important aspects identified in their review on ecotones is the scale-dependence. In this way, it is relevant to note that the procedure of delimitation of FTZ in the present study was tested for the scale 1:50,000. In the future study, it will be necessary to test other scales' maps.

The main characteristic of FTZ is the more intense interaction between fluvial and hillslope processes. In the present work, a method to delineate this zone was proposed, however it can still be modified as the technique is tested with different scales and basins. Nevertheless, the main characteristic of FTZ must be remained.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) (grant n° 574608/2008-7 and n° 479532/2009-5). The first author thanks the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the scholarship grant n° 556409/2009-4. The authors thank those who were or are of the Laboratory of Hydrology at Federal University of Santa Catarina, Florianópolis/SC, Brazil, for various scientific and stimulative discussions. We are also grateful to three anonymous reviewers for valuable comments.

REFERENCES

- Beven, K.J. 1986. Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics, p. 187 – 202 In Abrahams, A.D. (ed.). Hillslope Processes. London: Allen and Unwin.
- Beven, K.J., M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24: 43 - 69.
- Dunne, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes, p. 227 – 293 In Kirkby, M.J. (ed.). Hillslope Hydrology. New York: John Wiley and Sons.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1998. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: RJ. Boletim de Pesquisa; n.6.
- EPAGRI/CIRAM. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. Zoneamento Agroecológico. Visited on 29/11/2008. <http://ciram.epagri.rctsc.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/agricultura/zoneAgroecologico.jsp&tipo=agricultura>.
- Holland, M.M. 1988. SCOPE/MAB technical consultations on landscape boundaries; Report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones, p. 47-106. In: di Castri A.F.; A.J. Hansen & M.M. Holland (eds.). A new look at ecotones: emerging international projects on landscape boundaries. Paris, Biology International.
- Kirkby, M., L. Bracken, S. Reaney. 2002. The influence of land use, soils and topography on the delivery of hillslope runoff to channels in SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 27:1459 – 1473.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms and Processes: a new perspective*. Hodder Arnold, London, 383 p.
- Kolasa, J., M. Zalewski. 1995. Notes on ecotone attributes and functions. *Hydrobiologia* 303: 1 – 7.
- Poole, G.C. 2010. Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society* 29(1):12 - 25. DOI: 10.1899/08-070.1
- Ratzlaff, J. 1991. Sinuosity components of the Upper Saline River Valley, Western Kansas. *Transactions of the Kansas Academy of Science* 94: 46 - 57.
- Saulnier, G-M., K. Beven, C. Obled. 1997. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology* 202: 158 - 172.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, M.Th. van Genuchten. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *Journal Hydrology* 251: 163 - 176. DOI:10.1016/S0022-1694(01)00466-8
- Schreiber, P., S. Demuth. 1997. Regionalization of low flows in southwest Germany. *Hydrological Sciences Journal* 42: 845 – 858.
- Schumm, S.A. 1963. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin* 74: 1089 - 1100.
- Smith, T.B., R.K. Wayne, D.J. Girman, M.W. Bruford. 1997. A role for ecotones in generating rainforest biodiversity. *Science* 276: 1855 – 1857. DOI: 10.1126/science.276.5320.1855.
- Sørensen, R., J. Seibert. 2007. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology* 347: 79-89.
- Tarolli, P. 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216: 295 – 312.
- Tucker, G.E., G.R. Hancock. 2010. Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 35: 28 - 50.
- Vaze, J., J. Teng, G. Spencer. 2010. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software* 25: 1086-1098.
- Wood, E.F., M. Sivapalan, K. Beven, L. Band. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* 102: 29 – 47.

VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN DE LA CIUDAD DE PLATA (ARGENTINA) A PRECIPITACIONES EXTRAORDINARIAS

VULNERABILITY OF THE POPULATION OF THE CITY OF LA PLATA (ARGENTINA) TO EXTRAORDINARY RAINFALLS

Marcos Cipponeri¹, Mónica Laura Salvioli¹, Guillermo Larrivey¹,
Andrea Vanina Afranchi¹, Gustavo Adrián Colli¹

Resumen:

Las precipitaciones extraordinarias en cuencas urbanas en el Área Metropolitana del Gran Buenos Aires (AMBA) son un fenómeno meteorológico que se percibe año a año con mayor frecuencia, aunque ello es material de estudio en el marco de las consecuencias del cambio climático. En la Región Capital (Municipios de La Plata, Berisso y Ensenada, incluida en el AMBA) se han producido precipitaciones de este tipo en los últimos diez años y se han inundado, como consecuencia de ello, vastas áreas de los municipios mencionados; entre las más importantes se destacan las inundaciones de los años 2002, 2008 y 2013.

Debe considerarse que las cuencas estudiadas son pequeñas (suman alrededor de 15.000 has), de baja pendiente (entre 1,5 y 2,5/100) (Hurtado *et al*, 2006), con un tiempo de concentración reducido (menos de 2 horas) y un alto grado de intervención antrópica, y las precipitaciones consideradas son intensas y distribuidas de manera heterogénea, lo cual da como resultado un escurrimiento superficial que se desarrolla rápidamente y que produce inundaciones de importancia en pocas horas.

Los sistemas pluviales, diseñados para recurrencias de 2 a 5 años, son absolutamente sobrepasados en este tipo de acontecimientos, razón por la cuál es necesario conocer la situación de vulnerabilidad de la población para: a) trabajar de manera preventiva intentando bajar dicha vulnerabilidad, b) poder diseñar planes de alerta temprana y de contingencias, c) identificar qué sectores de la población necesitarán prioritariamente ayuda para recomponerse luego de finalizado el evento.

En este marco se están realizando investigaciones tendientes a determinar la vulnerabilidad de la población a precipitaciones extraordinarias. Para ello se ha analizado la información de base existente en las cuencas del Partido de La Plata, tanto referente al medio natural (clima, geomorfología, hidrología, etc.) como a nivel antrópico (población, vivienda, infraestructura, etc.), para seleccionar variables o indicadores representativos de la mencionada vulnerabilidad. Luego de un exhaustivo análisis de la información disponible se han seleccionado las siguientes variables: geomorfología de las cuencas, indicadora del grado de exposición a la inundación; densidad de población a nivel de radio censal, indicadora de cuantas personas pueden ser afectadas por unidad de superficie en un determinado lugar; calidad de las viviendas a nivel de radio censal, indicadoras tanto del nivel socioeconómico de los habitantes para afrontar el evento y para recuperarse del mismo como de la protección de los mismos habitantes al paso del agua en situación de inundación.

Se han seleccionado cuatro cuencas urbanas adyacentes del Partido de La Plata pertenecientes a la vertiente del río de la Plata, las correspondientes a los arroyos Del Gato, Jardín Zoológico, Circunvalación y Maldonado, se han diseñado mapas de vulnerabilidad asociados a cada una de las variables indicadas con la ayuda de un Sistema de Información Geográfico (SIG), y se ha propuesto un Índice de Vulnerabilidad de la Población a Precipitaciones Extraordinarias (In-VuPPE) que integra los indicadores individuales y se lo muestra a través de un mapa en una escala de cinco grados de vulnerabilidad: muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto.

Para validar los resultados obtenidos a través de la generación del InVuPPE, se ha superpuesto el mapa del mismo con los mapas de: a) la mancha de inundación producida los días 2 y 3 de abril de 2013, y b) ubicación de la mayor parte de las 89 personas fallecidas en la misma inundación. Cabe indicar que dicha inundación es la históricamente más importante registrada en la Región Capital en los 100 años que existen de registro.

Por último se puede mencionar que si bien el mapa que muestra el InVuPPE no es de los denominados "de riesgo hídrico", tiene una alta correlación con los mismos, ya que la geomorfología es una variable determinante en ambos casos, al menos para las cuencas estudiadas.

Palabras Clave: precipitaciones extraordinarias, riesgo hídrico, vulnerabilidad, cuencas urbanas.

1 Unidad de Investigación, Desarrollo y Extensión y Transferencia Gestión Ambiental (UIDET GA), Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Tel: 54 221 4272963, gestión.abiental@ing.unlp.edu.ar; mcipponeri@ing.unlp.edu.ar

Abstract:

The extraordinary rainfalls in urban watersheds in the Greater Metropolitan Area of Buenos Aires (GMABA) are a weather phenomenon that is perceived every year more often, although this is material of study in the context of the consequences of climate change. In the Capital Region (Municipalities of La Plata, Berisso and Ensenada, included in the GMABA) rainfalls of this kind have occurred in the last ten years and large areas of this municipalities, consequently, have flooded; among the most important are the floods of 2002, 2008 and 2013.

It should be considered that the studied watersheds are small (total about 15,000 ha), low slope (between 1,5 y 2,5/100) (Hurtado *et al*, 2006), with a reduced time of concentration (less than 2 hours) and a high degree of human intervention, and considered rainfalls are intense and heterogeneously distributed, which results in a surface flow that develops rapidly and produces significant floods in a few hours.

The urban drainage, designed with recurrences from 2 to 5 years, are absolutely overwhelmed at such events, which is why it is necessary to know the situation of vulnerability of the population to: a) work proactively trying to decrease the vulnerability, b) design early warning and contingency plans, c) identify which sectors of the population will primarily need help to recompose after finished the event.

In this context, we are investigating to determine the vulnerability of the population to extraordinary rainfall. For this, we analyzed the existing information of the Partido de La Plata's watersheds, both relating to the natural environment (climate, geomorphology, hydrology, etc.) as well as anthropic level (population, housing, infrastructure, etc.), to select variables or representative indicators of the mentioned vulnerability. The following variables have been selected after an exhaustive analysis of the available information: geomorphology of the watersheds, indicator of the degree of exposure to the flood; density of population census-radio level, indicator of how many people may be affected by unit area in a certain place; quality of housing census-radio level, both indicator of the socioeconomic status of the population to face the event and to recover from it, and the protection of the same people to the passage of water in flood situation.

We have selected four adjacent urban watersheds of the Partido de La Plata, belonging to the watershed of the Río de La Plata, corresponding to the streams El Gato, Jardín Zoológico, Circunvalación and Maldonado. Vulnerability maps associated to each of the variables indicated have been designed with the help of a Geographical Information System (GIS), and a Vulnerability Index of Population to Extraordinary Rainfall (VIPER) which integrates individual indicators and displayed it through a map on a scale of five degrees of vulnerability (very low, low, medium, high, very high) has been proposed.

To validate the results obtained through the generation of the VIPER, we superposed the map with the maps of: a) the flood stain produced on 2nd and 3rd of April 2013, and b) the location of most of the 89 dead people in the same flood. It should be noted that this flooding is the most historically important registered in the Capital Region in 100 years that there are registered.

Finally, it may be mentioned that although the map showing the VIPER is not one of the called "water risk", it has a high correlation with them, since geomorphology is a determining variable in both cases, at least for the studied watersheds.

Key words: extraordinary rainfalls, water risk, vulnerability, urban watershed.

INTRODUCCIÓN

Conceptos introductorios vinculados a Desastres Socio-ambientales

En términos genéricos se puede indicar que el riesgo de que se produzca un desastre socio-ambiental aumenta con la probabilidad de ocurrencia e intensidad de una amenaza (causa) y con la vulnerabilidad de una comunidad pasible de ser afectada por dicha amenaza. La fórmula que los vincula es ampliamente conocida:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad} \quad \text{Fórmula 1}$$

Un desastre es una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (2009, UN).

Una forma de medir los desastres locales (Cardona, 2007) es a través de un indicador compuesto que considera las muertes, las personas afectadas y las pérdidas materiales y económicas.

Las amenazas pueden ser de origen natural o de origen antrópico o una combinación de ambos orígenes, las precipitaciones y sus consecuentes inundaciones están incluidas dentro de los denominados eventos hidro-meteorológicos, definidos como *un proceso o fenómeno de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales* (2009, UN).

En la Argentina los desastres más predominantes, tanto por los daños que ocasionan como por sus recurrencias, son aquellos vinculados a amenazas de origen hidro-meteorológico, y en particular, las inundaciones (2009, Celis *et al*). Asimismo, el

creciente impacto de determinados eventos a lo largo del tiempo, especialmente aquellos de origen hidrometeorológico, no puede explicarse a través de un aumento de las amenazas. Estas constituyen una condición necesaria para la ocurrencia del desastre pero operan como detonadoras y no como sus causas básicas, que deben asociarse a procesos de construcción de vulnerabilidades (2009, Celiz et al).

En el caso de estudio la amenaza es el producto del proceso de transformación lluvia – escurrimiento superficial en cuencas urbanas de pequeña extensión y con un alto grado ocupación. El orden de magnitud de las precipitaciones extraordinarias es un porcentaje importante de las precipitaciones anuales en la región (1040 mm/año) (Hurtado Martin et al, 2006), y se puede observar en la siguiente figura:

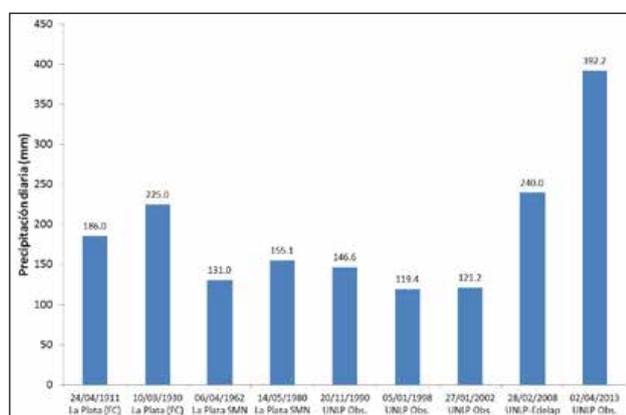


Figura 1: Registro de las mayores precipitaciones en el Partido de La Plata en el último siglo.

Fuente: Estudio sobre la inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de La Plata, Berisso y Ensenada (Liscia et al, 2013)

Denominamos como vulnerabilidad a la susceptibilidad de la población, y los recursos asociados a la misma (que permiten el desarrollo de sus actividades económicas, culturales y sociales), de ser afectada por una amenaza natural o antrópica. Naciones Unidas (2009) la define como “*las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.*”.

La vulnerabilidad no es intrínseca en sí misma, sino que en general está asociada a distintos tipos de amenazas, según Gallopin (2003) *un sistema se muestra vulnerable frente a ciertas perturbaciones pero robusto frente a otras. Sin embargo, algunos sistemas son tan frágiles que exhiben vulnerabilidad frente a muchos tipos de perturbaciones, y en ese sentido se les podría atribuir una “vulnerabilidad genérica”.*

En el caso de estudio la vulnerabilidad analizada está vinculada a un fenómeno específico, que es una precipitación extraordinaria, de modo que los

resultados de este estudio no son generalizables a otras amenazas.

Hay fórmulas que desagregan la vulnerabilidad incluyendo otros conceptos o variables como los de exposición, susceptibilidad y resiliencia, como la que muestra el CIIFEN (2013)¹, definiendo a esta última como:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Susceptibilidad} / \text{Resiliencia}$$

Fórmula 2

Donde:

Grado de Exposición: la población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas y, por consiguiente, están expuestos a experimentar pérdidas potenciales (2009, UN). Las medidas del grado de exposición pueden incluir la cantidad de personas o los tipos de bienes en una zona (2009, UN).

Susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso. (2013, CIIFEN).

Resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas. (2009, UN).

Algunos autores presentan a la resiliencia como la inversa de la vulnerabilidad (2009, Torres Mora Oscar): *lo contrario a la resiliencia, es entonces, la vulnerabilidad, característica que se presenta cuando un sistema social pierde la capacidad de absorber un desastre y los daños que éste genera son devastadores.*

Las variables seleccionadas en nuestro caso para medir la vulnerabilidad apuntan a contemplar la definición de Naciones Universidad (2009) pero también abordan, de alguna forma, los conceptos incluidos en la Fórmula 2.

Se puede afirmar entonces que el riesgo de que ocurra un desastre está vinculado básicamente a la probabilidad de que la amenaza se efectivice y a la existencia de una población (y recursos asociados) vulnerable, y que la magnitud del desastre socio-ambiental está asociada a la intensidad con que se desarrolle el evento y a la vulnerabilidad de la población o del área susceptibles de ser afectadas.

Con la ayuda de un Sistema de Información Geográfico (SIG) y con una base de datos consistente y pertinente, se pueden elaborar mapas que ayuden a identificar aquellas áreas de una región o de una cuenca que sean más o menos susceptibles (vulnerables) de ser afectadas por determinados eventos.

¹ Centro Internacional para la Investigación del fenómeno del Niño.

Vulnerabilidad a las Precipitaciones

Como se dijo anteriormente, la vulnerabilidad de una población está asociada al tipo de evento o amenaza que se estudia, en este caso se trata de un evento hidro-meteorológico como lo es una precipitación que, dependiendo de la recurrencia, se puede decir que es una precipitación ordinaria (baja recurrencia) o extraordinaria (alta recurrencia).

Definiremos como:

- Precipitación ordinaria: aquellas precipitaciones cuya recurrencia está en el orden de magnitud de la recurrencia de diseño del sistema de desagües pluviales.
- Precipitación extraordinaria: aquellas precipitaciones cuya recurrencia es mayor que la recurrencia para la que fueron diseñados los desagües pluviales de una ciudad.

En el caso de las precipitaciones ordinarias la vulnerabilidad de la población es baja ya que, con un adecuado mantenimiento del sistema de desagües pluviales, la amenaza estará controlada y los excedentes hídricos serán conducidos por los mencionados desagües.

Los sistemas pluviales tienen una incidencia significativa cuando se trata de precipitaciones ordinarias, ya que el escurrimiento superficial se deriva a través de dichos sistemas en caso que se produzcan esos eventos; a medida que la recurrencia de la precipitación aumenta, los desagües pluviales son superados en su capacidad de conducción, su efecto mitigador disminuye y comienzan a tener preponderancia las características geomorfológicas de la cuenca en la forma en que se desarrolla el escurrimiento superficial de las aguas.

Para las precipitaciones extraordinarias será necesario definir o trabajar sobre la vulnerabilidad de la población, ya que el sistema de desagües pluviales se verá sobrepasado y los excedentes escurrirán por calles, avenidas y por las mismas manzanas atravesando viviendas, escuelas, hospitales, edificios públicos, industrias y demás infraestructura urbana.

En este último caso, y para las cuencas estudiadas, serán determinantes en la vulnerabilidad de la población: a) aspectos del medio natural tales como la geomorfología de las cuencas, b) características de la población como densidad, nivel socioeconómico y distribución etárea, c) características de las viviendas como su calidad y número de niveles, entre los principales aspectos.

En definitiva se ha buscado un modelo que represente adecuadamente la realidad (aunque lógicamente la

simplifique) y para el mismo se han seleccionado las siguientes variables:

- ubicación relativa en la cuenca o sub-cuenca (área más o menos baja, distancia al cauce), representativa de la exposición de la población,
- densidad poblacional, representativo de la susceptibilidad, ya que a mayor densidad poblacional más se afectará a la comunidad,
- características constructivas de las viviendas, representativas de:
 - a) la resiliencia: porque es un indicador del nivel socioeconómico de la población y de su capacidad de recuperarse del evento y
 - b) de la susceptibilidad: ya que las viviendas y su capacidad de resistir el evento son una medida de la posible afectación de sus habitantes y sus bienes.

Los factores identificados no son los únicos que influyen en la vulnerabilidad, sino que son algunos de los que más significativamente influyen en la misma, y de los que se dispone información.

METODOLOGÍA

Vulnerabilidad a las Precipitaciones Extraordinarias en el Partido de La Plata

La misma será determinada en función de los factores mencionados anteriormente (posición en cuenca o sub-cuenca, densidad poblacional y características constructivas de las viviendas). A continuación se indica cómo será abordada la temática desde un punto de vista metodológico.

Se generará la información en distintas capas, vinculadas a cada variable seleccionada, en un programa SIG que permita el procesamiento y fácil visualización de los resultados; veamos el origen de los datos en cada caso:

- Ubicación relativa en la cuenca o sub-cuenca: determinada a través de un mapa de geomorfología del Partido de La Plata (2006, Hurtado Martín *et al.*).
- Densidad Poblacional: basada en los datos del CENSO 2010 a nivel de radio censal.
- Características de las viviendas: se define un indicador de precariedad de las viviendas a nivel de radio censal; el mismo se aborda con los datos aportados por el CENSO 2001 (ya que no se pudo disponer de los datos del CENSO 2010)². El tipo de vivienda es definido por el INDEC por un indicador sintético denominado CALMAT que se categoriza de

² Hubo dos radios censales en los cuales se cumplían dos condiciones que quitaban fiabilidad al resultado: 1) la población censada en el radio difería notablemente de aquella de la cual se contaba con el CALMAT y 2) el indicador de vulnerabilidad no se ajustaba a las condiciones de contexto. En esos casos se adoptó el indicador de un radio adyacente de similares características según análisis realizado a través de imágenes satelitales. En definitiva para los radios censales N° 4209 y 4251 se adoptaron las vulnerabilidades de los radios 4208 y 2309 respectivamente. Recordar que todo este procesamiento se realizó con datos del CENSO 2001 ya que no se cuenta, en este caso, con los del CENSO 2010.

I a V³ (de mayor a menor calidad) según las características combinadas de sus materiales.

Como se puede observar, la vulnerabilidad será determinada a nivel de radio censal, ya que es la mínima unidad territorial de la que se cuentan con datos confiables. El Índice de Vulnerabilidad de la Población a Precipitaciones Extraordinarias (InVuPPE) quedará determinado por: la densidad poblacional, la calidad de los materiales de las viviendas y por geomorfología de la cuenca o sub-cuenca.

Con el objeto de definir una escala única para los Indicadores de Vulnerabilidad de cada uno de los factores, se adopta la siguiente graduación:

Tabla 1: Escala de Vulnerabilidad

Valor	Grado de Vulnerabilidad
5	Muy Alta
4	Alta
3	Media
2	Baja
1	Muy Baja

como significativas, se indican las vulnerabilidades asociadas a dichas variables:

Vulnerabilidad asociada a la ubicación relativa en la cuenca o sub-cuenca (V.URC):

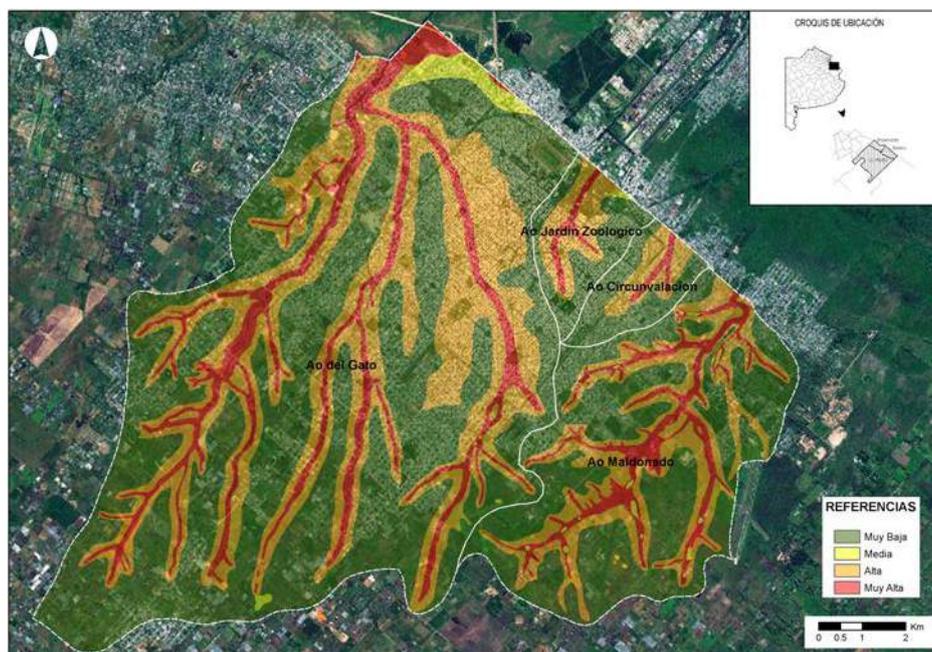
Tabla 2: Vulnerabilidad asociada a la ubicación relativa en la cuenca o sub-cuenca

Ubicación relativa en la cuenca o sub-cuenca	Vulnerabilidad asociada (V.URC)
Planicie de inundación	5
Llanura de fango	5
Área con pendiente adyacente a la planicie de inundación	4
Antiguo estuario interior	4
Antigua franja costera	3
Cubetas de deflación	3
En Interfluvio convexo	1
Interfluvio plano	1

RESULTADOS

Sobre la base de la escala definida más arriba, y considerando cada una de las variables definidas

Los resultados de aplicar la vinculación indicada en la tabla precedente al mapa de geomorfología mencionado más arriba da como resultado el Mapa 1:



Mapa 1: Vulnerabilidad asociada a la ubicación relativa en la cuenca (V.URC). Fuente: adaptación propia del Mapa 5 de geomorfología del Análisis Ambiental del Partido de La Plata (2006, Hurtado Martin *et al*)

³ CALMAT I: La vivienda presenta materiales resistentes en todos los componentes e incorpora todos los elementos de aislación y terminación.
 CALMAT II: La vivienda presenta materiales resistentes en todos los componentes pero le faltan elementos de aislación o terminación al menos en uno de sus componentes pero no en todos.
 CALMAT III: La vivienda presenta materiales resistentes en todos los componentes pero le faltan elementos de aislación o terminación en todos sus componentes, o bien presenta techos de chapa de metal o fibrocemento u otros sin cielorraso; o paredes de chapa de metal o fibrocemento.
 CALMAT IV: La vivienda presenta materiales no resistentes al menos en uno de los componentes pero no en todos.
 CALMAT V: La vivienda presenta materiales no resistentes en todos los componentes.

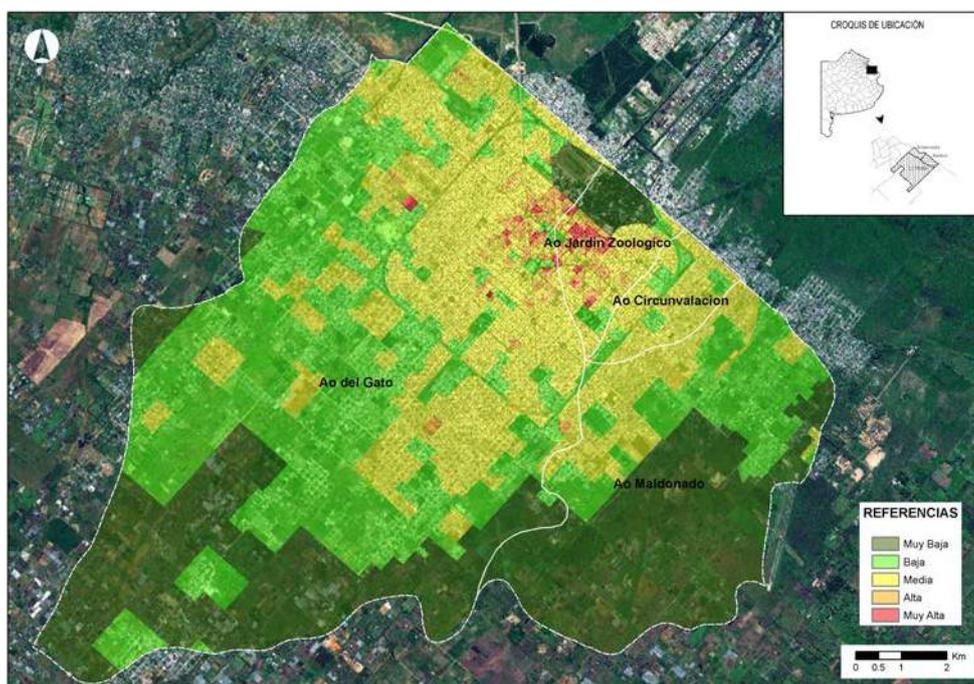
Vulnerabilidad asociada a la densidad poblacional (V.DP):

Se definió la vulnerabilidad de manera creciente con la densidad, a mayor densidad mayor cantidad de personas expuestas a la amenaza: para definir los rangos asociados a la vulnerabilidad se analizaron las densidades poblacionales de los distintos radios censales en el Partido de La Plata y se definieron intervalos de 50 habitantes por hectárea, excepto en los dos primeros intervalos, el primero de 0 a 10 hab/ha que define áreas rurales, el segundo de 10 a 50 hab/ha define áreas suburbanas y el resto de los intervalos (por encima de los 50 hab/ha) definen áreas eminentemente urbanas.

Tabla 3: Vulnerabilidad asociada a la densidad poblacional

Densidad Poblacional (Ver Mapa N°2)	Rango (habitantes/hectárea)	Vulnerabilidad asociada (V.DP)
Muy Alta	+ de 150	5
Alta	e/ 100 y 150	4
Media	e/ 50 y 100	3
Baja	e/ 10 y 50	2
Muy Baja	Menos de 10	1

Los resultados de aplicar las vinculaciones de la tabla precedente a las cuencas estudiadas es el siguiente:



Mapa 2: Vulnerabilidad asociada a la densidad poblacional (V.DP).
Fuente: elaboración propia con datos del Censo 2010 (INDEC)

Vulnerabilidad asociada a la precariedad de las viviendas (V.PV):

se diseñó un indicador de la precariedad de las viviendas representativo a nivel de radio censal. El mismo surge de una suma ponderada en la cual hay cinco variables que son los porcentajes relativos de viviendas, con CALMAT I a V, en el radio censal estudiado, dándosele mayor peso a las viviendas más precarias y ajustando dicha suma ponderada por un factor de ajuste de escala; en definitiva el indicador queda como se indica a continuación:

Tabla 4: Vulnerabilidad asociada a la precariedad de las viviendas

Precariedad de las Viviendas	Rango ⁴	Vulnerabilidad asociada (V.PV)
Muy Alta	3,55 a 4,97	5
Alta	2,85 a 3,55	4
Media	2,25 a 2,84	3
Baja	1,85 a 2,24	2
Muy baja	1,12 a 1,84	1

Indicador de Precariedad de las Viviendas=

$$(1x(\%CALMAT I) + 2x(\%CALMAT II) + 3x(\%CALMAT III) + 4x (\%CALMAT IV) + 5x(\%CALMAT V))/(2,99*100)x5$$

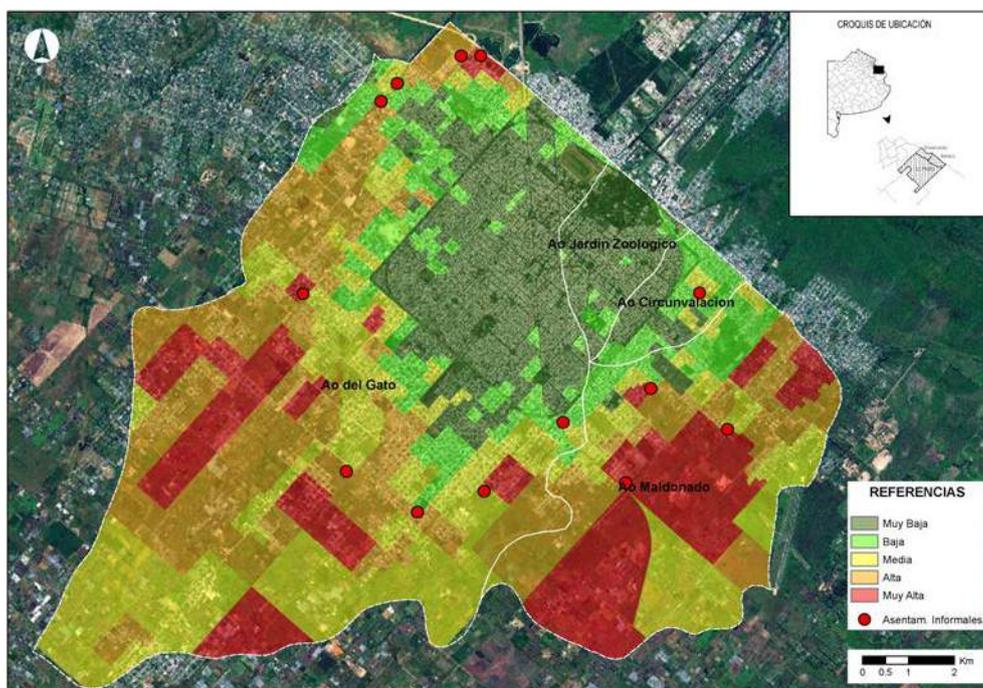
Fórmula 3

⁴ Para definir los intervalos se utilizó el método de intervalos naturales o "natural breaks" (Jenks 1963). Este método de clasificación se encuentra implementado en el software ArcGis e identifica los puntos de corte entre clases mediante el algoritmo de optimización de Jenks. Esta fórmula consiste básicamente en la minimización de la suma de la varianza intracase para obtener la máxima homogeneización (mínima dispersión) dentro de cada intervalo y la máxima dispersión entre intervalos. Los límites entre clases se establecen en donde hay un salto relativamente importante entre los valores.

La Dirección de Estadística de la Provincia de Buenos Aires informa en su página WEB sobre la ubicación de los asentamientos informales al año 2010, dichos asentamientos fueron incluidos en el Mapa 3 y se los considera con una vulnerabilidad muy alta en cuanto a la precariedad de los materiales. La ubicación

de dichos asentamientos fue revisada a través de imágenes satelitales para ajustar el trabajo de la mencionada Dirección de Estadística.

Los resultados de procesar la información en SIG según lo indicado en la tabla precedente se pueden visualizar en el siguiente mapa:



Mapa 3: Vulnerabilidad asociada a la precariedad de las viviendas (V.PV).
Fuente: elaboración propia

Índice de Vulnerabilidad de la Población a Precipitaciones Extraordinarias (InVuPPE):

quedará definido por una combinación de los tres indicadores anteriores. Se propone una suma ponderada de las tres vulnerabilidades, en la cual el mayor peso lo tiene la V.URC ya que la misma es determinante para que haya exposición al evento, y en un segundo escalón de importancia se propone a las potenciadoras de las consecuencias del mismo, que son las V.DP y V.PV, los coeficientes fijados son, de manera correspondiente: 0,6, 0,20 y 0,20.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad cambiando la magnitud de los coeficientes y la variación de los resultados no ha resultado significativa.

De esta forma el InVuPPE quedará determinado por la siguiente fórmula:

$$\text{InVuPPE} = 0,6 \times \text{V.URC} + 0,20 \times \text{V.DP} + 0,20 \times \text{V.PV}$$

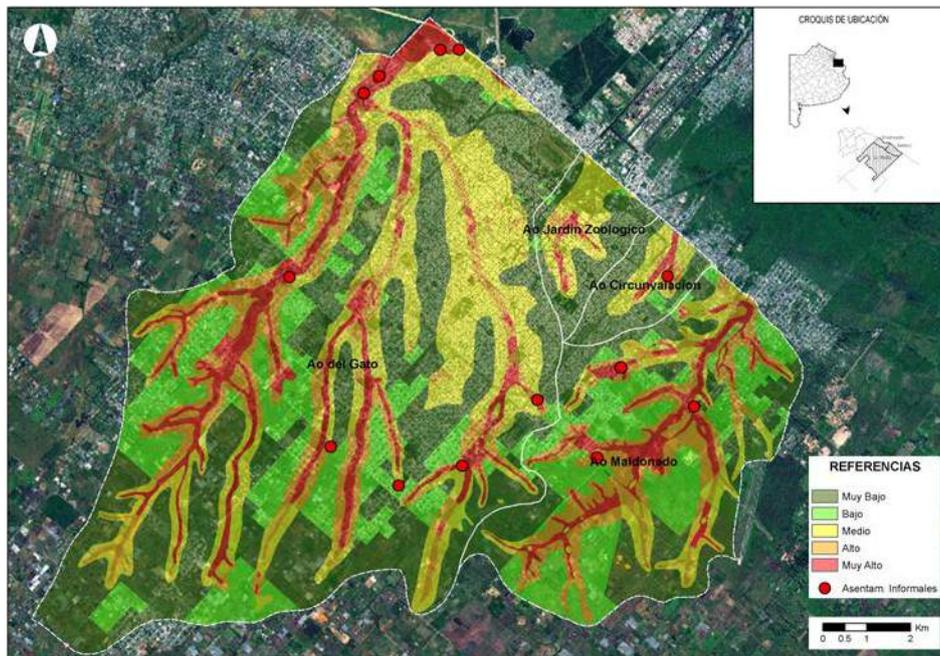
Fórmula 4

Tabla 5: Vulnerabilidad asociada a precipitaciones extraordinarias

Vulnerabilidad de la Población por Precipitaciones Extraordinarias	Rango ⁵	(InVuPPE)
Muy Alta	3,80 a 4,60	5
Alta	3,40 a 3,80	4
Media	2,40 a 3,40	3
Baja	1,60 a 2,40	2
Muy Baja	1 a 1,60	1

Los resultados de procesar la información en SIG según lo indicado en la tabla precedente se pueden visualizar en el siguiente mapa:

⁵ Para definir los intervalos se utilizó el método de intervalos naturales o "natural breaks" (Jenks 1963).

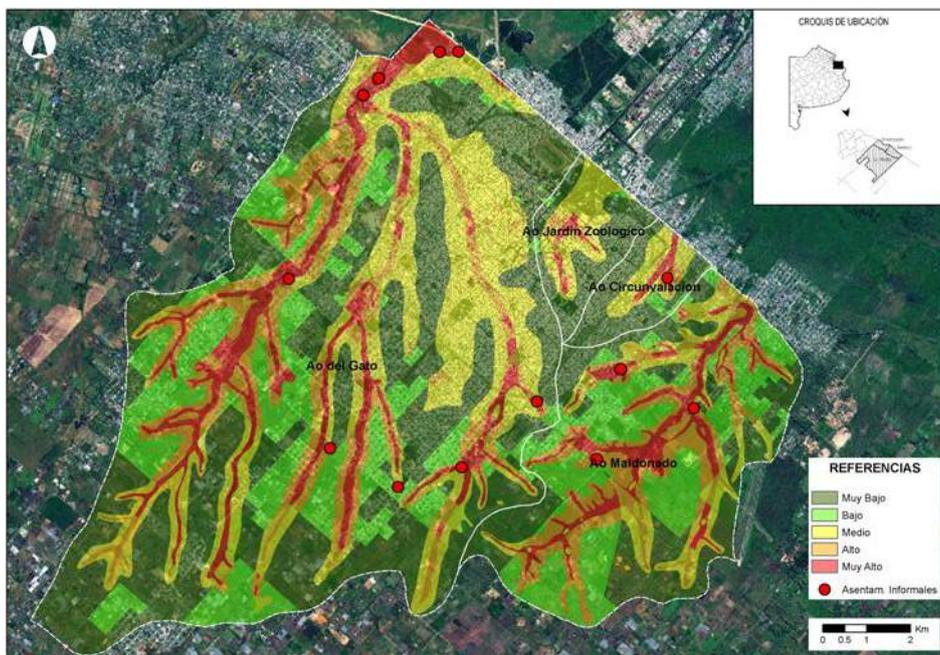


Mapa 4: Índice de Vulnerabilidad de la Población por Precipitaciones Extraordinarias (InVuPPE). Fuente: elaboración propia.

Cabe indicar que el Mapa 4 indica valores relativos de vulnerabilidad, siendo la escala numérica propuesta una escala arbitraria, y los distintos rangos deben interpretarse de manera también relativa, para conocer a qué áreas se debe prestar atención de manera prioritaria.

Como validación de la metodología propuesta para la determinación del InVuPPE se analizaron las

consecuencias de la inundación producida en el año 2013 en relación a dicho indicador, para ello se superpusieron en un mismo mapa: a) mapa 4 de este estudio (InVuPEE), b) el mapa del área inundada en el evento extraordinario de los días 2 y 3 de abril de 2013⁶ y c) la ubicación donde se produjeron la mayor parte de las muertes consecuencia de la mencionada inundación⁷.



Mapa 5: Superposición de InVuPEE, Área Inundada, y Muertes. Fuente: elaboración propia

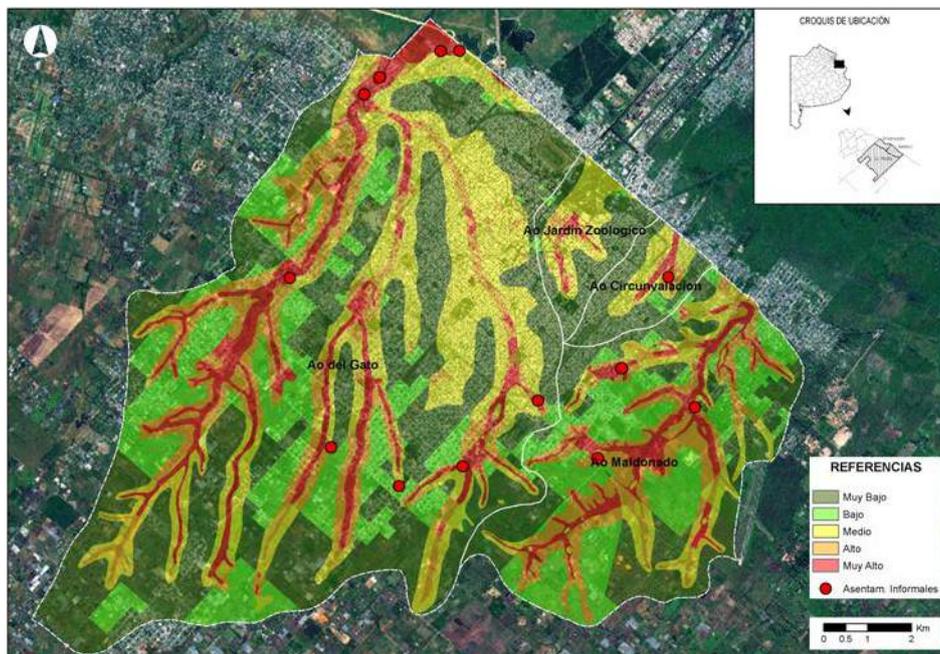
⁶ Producto de procesar datos de los mapas generados en el Informe sobre la Inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 (2013, Liscia et al). Las líneas negras que limitan la mancha de inundación indican los límites de aplicación de la modelación, no los de la mancha real. Le mencionada modelación fue ajustada con datos de campo, los detalles se pueden visualizar en el mencionado informe.

⁷ Elaboración propia sobre la base de datos aportados por medios de comunicación

Como se puede observar las áreas inundadas tienen un alto grado de coincidencia con áreas con InVuPEE medio, alto o muy alto, y por otro lado la ubicación donde se produjeron la mayor cantidad de muertes es en lugares donde el InVuPEE es alto o muy alto. Lo indicado muestra que el InVuPEE, si bien es

mejorable, es una buena aproximación de la realidad y facilita las tareas de prevención y contingencia.

Para facilitar el análisis de las conclusiones y la discusión se presenta el InVuPEE de la cuenca del arroyo Maldonado en el Mapa 6, la cual tiene una heterogeneidad mayor que las otras cuencas incluidas en el estudio.



Mapa 6: InVuPEE cuenca arroyo Maldonado. Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

En los Mapas 4 y 6 se puede observar:

- Que las áreas más vulnerables son aquellas que se encuentran sobre actuales y antiguos cauces de arroyos y que, en algunos casos, la misma se ve atemperada por la calidad de las viviendas, en particular en la cuenca del Arroyo del Gato. De cualquier modo, la vulnerabilidad sobre los cauces siempre está en el rango de alta a muy alta.
- Que los asentamientos informales se hayan sistemáticamente ubicados en áreas de vulnerabilidad alta o muy alta,
- Hay áreas con un alto grado de vulnerabilidad que, o tienen baja densidad poblacional o se hayan despobladas. Este aspecto debería considerarse en la planificación del uso del suelo y en la ocupación efectiva del territorio (muchas veces *de facto*),
- Los mapas permiten identificar corredores y áreas menos vulnerables a considerar para el diseño los planes de contingencia.

DISCUSIÓN:

Si bien los mapas elaborados no son de los llamados de riesgo hídrico, tienen una alta relación con los mismos, ya que uno de los factores determinantes

de la vulnerabilidad, la geomorfología, también es determinante en la forma en que se produce el escurrimiento superficial en situaciones de precipitaciones extraordinarias. La modelación del escurrimiento superficial en situaciones de precipitaciones extraordinarias considerando, además de la geomorfología, las grandes obras de infraestructura que la modifican, facilitará acercarse con mayor precisión a los mapas de riesgo hídrico, ya que permitirán determinar: manchas, alturas y permanencia de inundación y velocidad del escurrimiento de las aguas.

AGRADECIMIENTOS

Sergio Oscar Liscia, Mirta Cabral, Martín Hurtado, Juan Carlos Etulain, Laura Mordasini y Jessica Biagoni, quienes de una u otra forma facilitaron la concreción de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

Cardona Omar Darío. 2007. Indicadores de Riesgo de Desastres y de Gestión del Riesgo. División de Medio Ambiente, Departamento de Desarrollo Sostenible, Banco Interamericano de Desarrollo. p 9. http://www.iadb.org/exr/disaster/IDEA_IndicatorsReport_sp.pdf (29/07/14)

Celis et al. 2009. Cruz Roja. Riesgo de Desastre en Argentina. Federación Internacional de la Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. p 34. http://ec.europa.eu/echo/files/funding/opportunities/interest_dipecho6_argentina.pdf (29/07/14)

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR). 2009. Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres. Naciones Unidas. Ginebra, Suiza. p 2, 3, 13, 17, 28, http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf (29/07/14)

Hurtado Martín et al. 2006. *Análisis Ambiental del Partido de La Plata*. Instituto de Geomorfología y Suelos del CISAUA (UNLP). Consejo Federal de Inversiones. La Plata, Buenos Aires, Argentina. p 7, 9, 10. p 5 Anexo. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27046> (29/07/14)

Instituto Nacional de Estadística y Censos. Censos de Población y Viviendas 2001 y 2010. <http://www.indec.mecon.ar/> (29/07/14)

Liscia S.O et al. 2013. *Estudio sobre la inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de La Plata, Berisso y Ensenada*. Departamento e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

La Plata, Buenos Aires, Argentina. p 3. p 15 a 26 del Anexo. <http://hdl.handle.net/10915/27334> (29/07/14)

Torres Mora Oscar. 2011. La Cultura Preventiva como factor de Resiliencia frente a los Desastres. Conferencia Virtual Iberoamericana. Dirección General de Protección Civil y Emergencias – Ministerio del Interior. España. p 28. http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sinae.gub.uy%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D42%26Itemid%3D36&ei=Z47bU96gJOTisATzo4GYDQ&usg=AFQjCNGDOCh_iGCvG_YXcrqqbs9dmgZ1AQ&bvm=bv.72197243,d.cWc (29/07/14)

Zapata Martí Ricardo y Gallopin Gilberto et al. 2007. Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los Desastres. CEPAL. p 3. http://www.cepal.org/publicaciones/xml/7/12707/lcmexg5e_TOMO_la.pdf (29/07/14)

Páginas WEB

Centro Internacional para la Investigación del fenómeno del Niño. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&id=84&layout=blog&Itemid=111&lang=es (29/07/2014)

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN, USANDO EL MODELO WATER EVALUATION AND PLANNING (WEAP), EN LA CUENCA DE LA REGIÓN YAQUE DEL NORTE DE LA REPÚBLICA DOMINICANA

SIMULATION OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES AND ADAPTATION STRATEGIES, USING THE WATER EVALUATION AND PLANNING MODEL (WEAP), IN THE YAQUE DEL NORTE RIVER BASIN IN THE DOMINICAN REPUBLIC

J. F. Febrillet Huertas¹, S. José Clases¹, L. Bello y J. Chalas¹

Resumen:

Esta investigación presenta los resultados de los supuestos simulados utilizando el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), desarrollado por un equipo de investigadores del Stockholm Environment Institute (SEI), para la Región Yaque del Norte de la República Dominicana, que incluye tres supuestos: que todo permanezca igual a través del tiempo, hasta el 2050; que se produzca una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua; y de cambio climático a través del efecto del cambio gradual en la precipitación, temperatura y humedad relativa a largo plazo. Para la simulación del cambio climático, se eligió un escenario de clima moderado, que predice una tendencia a disminuir la precipitación anual en un 10% y un aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C, para el 2100. Los resultados del estudio indican que las demandas de agua en el escenario de cambio climático ascienden a unos 3,517 MMC, con un incremento de la demanda de unos 1000 MMC aproximadamente, comparado con el escenario sin cambio climático, lo que muestran que la región Yaque del Norte es sensible a dichos cambios y que deben realizarse medidas de adaptación urgentes para mitigar los cambios que podrían producirse.

Palabras clave: cambio climático, conservación, recursos hídricos, protección, República Dominicana.

Abstract:

This research paper presents the results of creating a model for the Yaque del Norte River Basin in the Dominican Republic using the Water Evaluation and Planning System (WEAP), which was developed by a team of researchers from the Stockholm Environment Institute (SEI). For this study three scenarios were developed: 1) everything stays the same over time until the year 2050; 2) an improvement in irrigation efficiency will take place by gradual use of water saving technologies; and 3) climate change impact through the effects of the gradual change in rainfall, temperature and relative humidity over time. For the simulation of climate change, a scenario of moderate climate, which predicts a decreasing trend of annual precipitation by 10% and an increase in temperature between 1.2 and 2.2 °C, was chosen for the year 2100. The results of the study indicate that water demands in the climate change scenario amount to almost 3,517 MMC, an increase in demand of about 1000 MMC, compared to the scenario without climate change. Thus this shows that the Yaque del Norte River Basin is sensitive to such changes and urgent adaptation measures should be undertaken to mitigate the changes that may occur.

Keywords: climate change, conservation, water management, protection, Dominican Republic.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático presenta una importante amenaza para todas las regiones del mundo y algunos de los efectos mundiales que afectarán a la República Dominicana incluyen el aumento de la temperatura media de 1.1°C a 4.5°C, como ha predicho el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático para el 2100. (IPCC, 2007).

Las modificaciones en los patrones de precipitación, en cantidad e intensidad principalmente, son una realidad evidente en los recursos hídricos disponibles en la República Dominicana, produciéndose con más frecuente lluvias torrenciales y de corta duración. (INDRHI, 2012. Plan Hidrológico Nacional. Santo Domingo, República Dominicana).

¹ Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe
Ave. Jiménez Moya esq. Juan de Dios Ventura Simo, Centro de los Héroes, Santo Domingo, República Dominicana
jfebril@gmail.com

La Región hidrográfica Yaque del Norte es la más importante del país, con un área de 7,053 km², está formada por tres cuencas correspondientes a los ríos: Yaque del Norte que es el principal, Masacre y Chacuey, además incluye una porción de área de la cuenca costera de Monte Cristi. Esta región posee una gran red fluvial integrada por diversos ríos que atraviesan zonas montañosas muy húmedas y una región sumamente árida como la línea Noroeste, cuyo desarrollo depende básicamente del aprovechamiento de sus aguas, Fig. 1. El río Yaque Del Norte constituye el cauce principal de la Cuenca y junto a sus afluentes drena la vertiente norte de la Cordillera Central y la meridional de la Cordillera Septentrional, haciendo un recorrido de 253 Km. hasta su desembocadura en las bahía de Monte Cristi.



Figura 1. Regiones hidrográficas de la República Dominicana.

Fig. 1. Watershed Regions of the Dominican Republic

Por tanto, el cambio climático puede ser considerado como uno de los principales riesgos que la sociedad tiene que abordar en el futuro. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el gobierno dominicano tomó la iniciativa de realizar este proyecto que tuvo por fin de investigar los efectos más relevantes a ocurrir en los próximos 50 años y sugerir diferentes estrategias de adaptación que podrían incluirse en las políticas de tomas de decisiones y propuestas técnicas para la gestión de las infraestructuras físicas de agua como presas, embalses y sistemas de alcantarillado, de la región Yaque del Norte.

MARCO FÍSICO Y SOCIOECONÓMICO

La República Dominicana, con 48,670.82 km², se localiza en la isla Española, la que comparte con la República de Haití, está ubicada en el archipiélago de las Antillas Mayores, conformado además por Cuba, Puerto Rico y Jamaica. Su sistema orográfico es complejo y está formado por cinco sistemas montañosos, orientados noroeste-sureste

preferentemente, con oscilaciones de 46 m.b.n.m., en el Lago Enriquillo, hasta 3,175 m.s.n.m., en el pico Duarte. Las llanuras del país ocupan el 40% del territorio.

Esta situación hace que su clima tropical presente variaciones, con características propias en función de su ubicación y su exposición a los vientos alisios predominantes en la zona. La temperatura media anual es de 25.4°C, con oscilaciones entre 28°C y 33°C para la máxima y entre 16°C y 20°C para la mínima,

La precipitación media anual es de unos 1,500 mm, con oscilaciones desde 313 mm/a en las zonas secas, a más de 2795 mm/a en las zonas húmedas.

PROCEDIMIENTO (METODOLOGÍA)

Para la ejecución del proyecto fue utilizado el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), (<http://www.weap21.org>), desarrollado por un equipo de investigadores del Stockholm Environment Institute (SEI), el cual es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos que proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas.

Para la simulación hidrológica, WEAP incluye una serie actividades básicas que incluyen:

- Delimitación de fronteras temporales y espaciales (ver Fig. 2).
- Análisis de demanda.
- Análisis de información hidrológica y climatológica.
- Recursos hídricos e infraestructura.
- Calibración.
- Evaluación de escenarios-

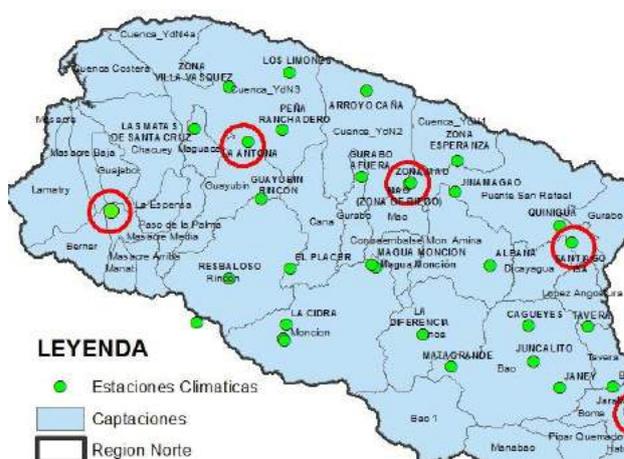


Figura 2. Captaciones y estaciones climáticas, región Yaque del Norte

Fig. 2. Catchments and climatic station, Yaque del Norte region

Durante la ejecución del proyecto se realizaron viajes de investigación a la zona de estudio, para adecuar las informaciones obtenidas de los shapefile, sobre

cobertura y uso del suelo, así como situación actual de las fuentes de agua potable, su procedencia y efectividad.

Además se realizó un levantamiento de la información básica y se establecieron las características climáticas, hidrológicas, de uso de suelo, de demanda de agua de la cuenca y sus infraestructuras. Esto incluye:

- Ubicación cuenca en hoja topográfica, capas SIG (dibujar red, Ver Fig. 3, 4 y 5).
- Definir tiempo de modelaje (período).
- Selección de las estaciones de aforo y sus series a nivel mensual.
- Selección de las estaciones de aforo y sus series a nivel mensual.
- Selección de las estaciones climáticas y las series a nivel mensual de lluvia, ETref.,

temperatura máxima y mínima, humedad relativa, viento, latitud en grados.

- Ciudades, ubicación y población a que año.
- Consumo: demanda en ciudades y rural.
- Tasa crecimiento población.
- Áreas de riego y secano, productos y consumo. (Distribución de la demanda)
- Definir captaciones.
- Uso del suelo (área, coef. cultivo, etc. Datos relacionados)
- Embalses actuales y futuros (nombre, capacidad, etc).
- Hidroeléctrica y su generación (datos) y Centrales de pasada.
- Calidad de agua (si procede) sobre Temp. TSS, Sal, BDO, OD. (información relacionada) y Planta de tratamiento (datos).

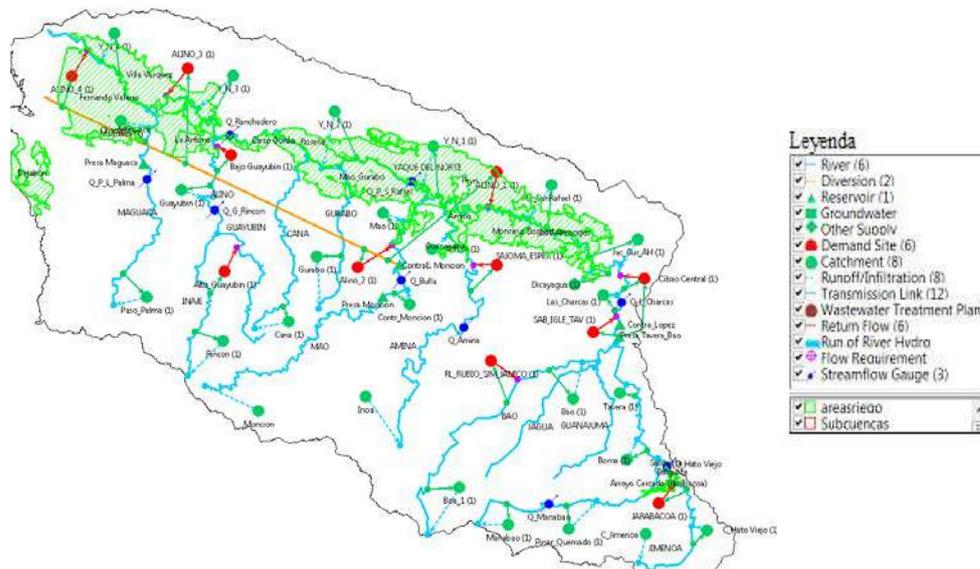


Figura 3. Esquema de la cuenca del Yaque del Norte
Fig. 3. Yaque del Norte basin outline

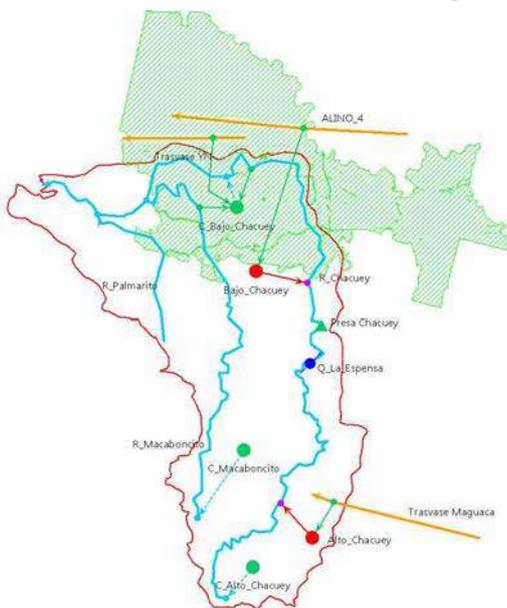


Figura 4. Esquema río Chacuey
Fig. 4. Chacuey river outline

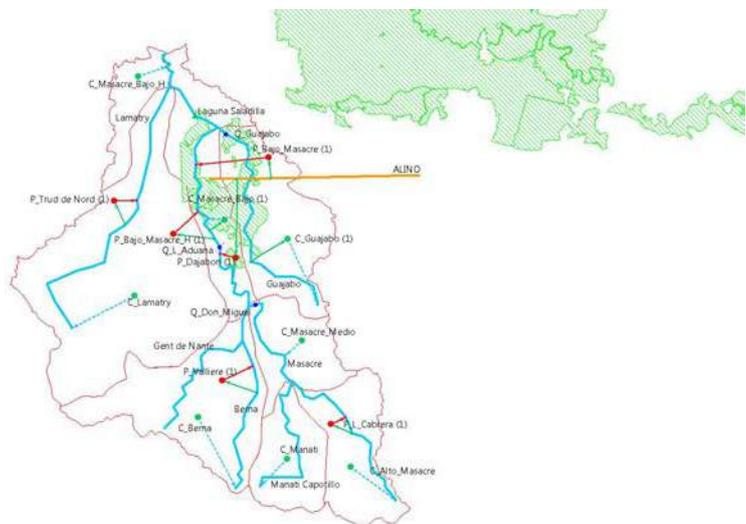


Figura 5. Esquema río Masacre
Fig. 5. Masacre river outline

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES:

Inicialmente se determinan las condiciones actuales y se calibra el modelo antes de la suposición de escenarios.

WEAP modela los siguientes componentes del balance hidrológico: evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. Para ello requiere ser alimentado con las siguientes informaciones climáticas: precipitación, temperatura, humedad relativa, y velocidad de viento. Además, requiere datos de caudales en estaciones de medición de las cuencas para poder validar los resultados modelados y ajustar su calibración.

Para la calibración de la precipitación, de la cuenca Yaque del Norte se utilizó el período 1968 a 1998 de las estaciones climáticas base Jarabacoa, Santiago, Mao, La Antona y Don Miguel (Fig: 2); para la cuenca del Chacuey se utilizó la serie 1974 a 1990 de Don Miguel y para la cuenca del Masacre de 1974 a 1990 de Don Miguel. Estos datos fueron ajustados por un factor de ponderación para cada captación empleando la precipitación anual y la isoyeta ponderada en el centroide de la captación.

Los datos de temperatura fueron obtenidos para cada captación usando los datos de las estaciones base señaladas anteriormente modificado por un delta de temperatura estimado para cada captación considerando un cambio de temperatura adiabático en función de la altura equivalente a 5.5 °C por cada 1000 m de elevación, Fig. 6.

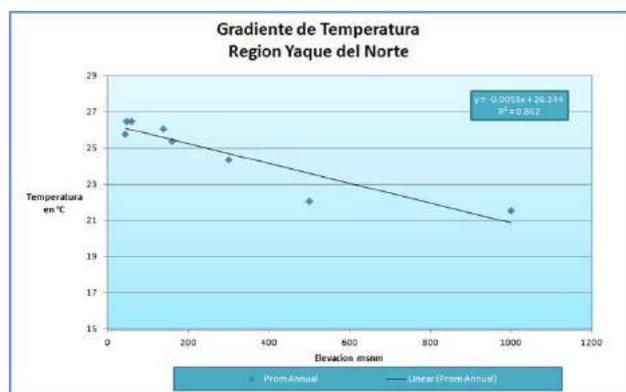


Figura 6. Gradiente temperatura Región Yaque del Norte

Fig. 6. Temperature gradient of Yaque del Norte región

Para la humedad relativa se utilizaron las variaciones medias mensuales de las estaciones base de referencia, al igual que para los datos de viento y evaporación. La latitud promedio de cada captación fue estimada usando ArcMap.

Se desarrolló una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los ríos, recursos y las fuentes para el sistema.

Para definir el uso de los suelos se utilizaron los shape file disponibles (2003) y se corrigieron con las visitas al campo. Para cada captación se definieron las siguientes coberturas vegetales agrupadas de la siguiente manera:

1. Bosque conífero
2. Bosque latifoliado
3. Bosque seco
4. Matorral
5. Pasto natural y sabana
6. Arroz
7. Plátano
8. Café y cacao
9. Caña
10. Cultivos mixtos
11. Cultivos intensivos
12. Palma africana y coco
13. Poblados
14. Agua manglar humedales
15. Escasa vegetación y otros

Y se alimentaron con los parámetros presentados en el Tabla 1.

Los parámetros de población fueron obtenidos del IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, Tabla 2, pero teniendo en cuenta que la tasa de crecimiento de la población en la región fue inferior a la unidad y en algunos casos negativa, decidimos utilizar la tasa media nacional de 1.21.

Para los embalses y su generación se emplearon los parámetros mostrados en la Tabla 3.

Con esta información WEAP traduce la precipitación a escorrentía superficial, flujos inter superficiales y flujos bases (Fig. 7) mediante la entrada de los datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las captaciones.

Desde el almacenamiento superior ocurre la escorrentía como flujo directo, superficial e intermedio, mientras que el flujo base se origina solo desde el almacenamiento inferior. En la figura tenemos que:

P = precipitación

Et = evapotranspiración

Pe = precipitación efectiva

Sw = capacidad de almacenamiento superior (zona de raíces)

Dw = capacidad de almacenamiento inferior (zona profundas)

Z1 = promedio a largo plazo del almacenamiento en la zona de raíces (porcentaje de la capacidad total disponible; % of Sw)

Z2 = promedio a largo plazo del almacenamiento en la zona profunda (porcentaje de la capacidad total disponible; % of Dw)

Tabla 1. Parámetros asociados a los cultivos

Table 1. Farming associated parameters

Tipo Cobertura Vegetal	Kc	Sw	LAI	Riego mensual	Umbral Máximo	Umbral Mínimo
		(mm)				
Bosque conífero	1	750	5	na	na	na
Bosque latifoliado	Jan, 0.7, Feb, 0.8, Mar, 0.9, Apr, 1, May, 1.1, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1, Oct, 0.9, Nov, 0.8, Dec, 0.7	500	5	na	na	na
Bosque seco	Jan, 0.7, Feb, 0.8, Mar, 0.9, Apr, 1, May, 1.1, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1, Oct, 1.0, Nov, 0.9, Dec, 0.8	1000	5	na	na	na
Matorral	1	490	3	na	na	na
Pasto natural y sabana	1	950	3	na	na	na
Arroz	0,9	500	4	100	100	90
Plátano	Jan, 1, Feb, 1.1, Mar, 1.2, Apr, 1.2, May, 1.2, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1.1, Oct, 1.1, Nov, 1.1, Dec, 1.1	450	4	100	90	70
Café y cacao	1,1	500	4	na	na	na
Caña	Jan, 1.3, Feb, 1.3, Mar, 1.3, Apr, 1, May, 0.8, Jun, 0.8, Jul, 0.8, Aug, 0.8, Sep, 0.8, Oct, 0.8, Nov, 0.8, Dec, 1.3	1000	4	100	60	40
Cultivos mixtos	Jan, 0.8, Feb, 0.8, Mar, 0.8, Apr, 0.9, May, 1, Jun, 1, Jul, 1, Aug, 1, Sep, 0.8, Oct, 0.8, Nov, 0.8, Dec, 0.8	700	4	Jan, 0, Feb, 0, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 100, Jul, 100, Aug, 100, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 0	70	50
Cultivos intensivos	Jan, 0.8, Feb, 1.2, Mar, 1.2, Apr, 1.1, May, 1.1, Jun, 0.8, Jul, 0.8, Aug, 0.8, Sep, 0.8, Oct, 1.2, Nov, 1.1, Dec, 1.1	500	4	Jan, 100, Feb, 100, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 100, Jul, 0, Aug, 0, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 100	75	50
Palma africana y coco	1	550	4	100	65	50
Poblados	1	600	2	na	na	na
Agua manglar humedales	1,1	130	5	na	na	na
Escasa vegetación	1	250	1,6	na	na	na

Tabla 2. Tasa de crecimiento media anual por provincia 2002 a 2010

Table 2. Average annual growth rate by province 2002 to 2010

Provincia	Población 2002	Población 2010	Tasa media en %
Santiago	908.250	963.040	0,728
Dajabón	62.046	63.955	0,364
Valverde	158.293	163.030	0,364
La Vega	385.101	394.205	0,288
Monte Cristi	111.014	109.607	-0,157
Santiago Rodríguez	59.629	57.476	-0,452

Tabla 3. Parámetros de embalses y generación

Table 3. Reservoir and electricity generation parameters

Nombre	Tavera-Bao	Monción	Contraembalse M	Lopez-Angostura
Capacidad, Mm3	300	345	7,49	4,4
Vol. Inicial, Mm3	250	250	6	2,5
Curva h-V	0, 260, 1.3, 270, 3.1, 275, 7.2, 280, 15.1, 285, 26.1, 290, 40.6, 295, 59.9, 300, 84.6, 305, 115.4, 310, 153.8, 315, 200.9, 320, 256.8, 325, 287.8, 327.5, 321.2, 330	0, 178, 0.34, 186, 1.08, 192, 3.26, 200, 5.71, 205, 9.32, 210, 14.4, 215, 21.14, 220, 41.77, 230, 74.29, 240, 120.58, 250, 182.53, 260, 262.15, 270, 341.11, 278, 478.12, 290, 615.887, 300	0, 106, 1.521, 115, 2.348, 117, 3.451, 119, 4.83, 121, 6.511, 123, 8.587, 125, 11.052, 127, 13.797, 129, 15.258, 130	0, 208, 0.1, 210.5, 0.2, 212, 0.44, 214, 0.77, 216, 1, 217, 1.26, 218, 1.6, 219, 1.94, 220, 3.05, 222.5, 3.3, 223, 3.84, 224, 4.4, 225, 4.9, 226, 4.9, 226, 5.4, 227
Evaporación. Neta, mm	0.7*Evaporación Tavera	0.7*Evaporación Mao	0.7*Evaporación Mao	0.7 *Evaporación Tavera
Vol. Conservación, Mm3	200	280	6	3
Vol. Amortiguamiento, Mm3	115	150	4	2
Vol. Inactivo, Mm3	26	25	2	1
Coefficiente. Buffer	0,5	0,6	0,8	0,8
Flujo mínimo, m3/s	23,6	24	12,42	20
Flujo máximo, m3/s	62	45,8	24	56,7
Altura de carga, m	110	124	15	51
Factor de planta, %	72,7	89,5	74	66,67
Eficie. Generación, %	100	100	91	94,5
Acueducto, m3/s	5	3,1		1,5

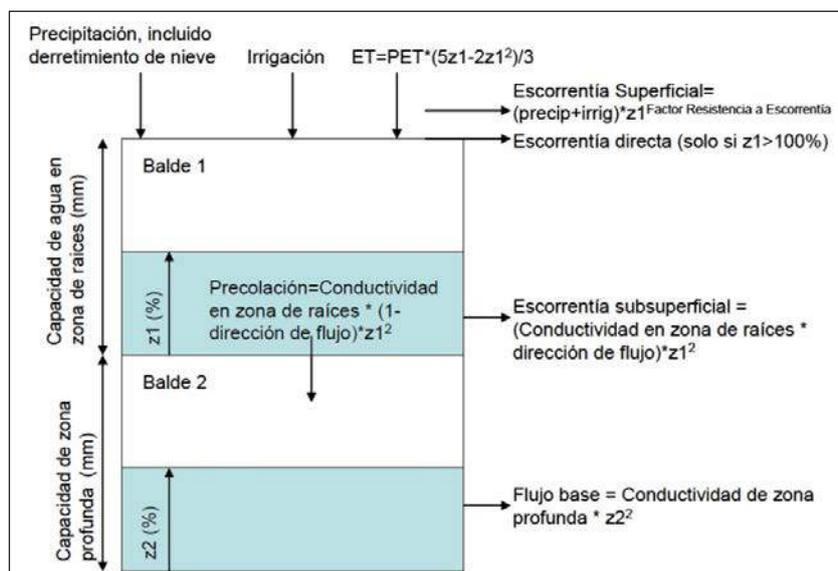


Figura 7. Esquema estilizado de los elementos hidrológicos modelados en WEAP

Fig. 7. WEAP modelled water elements outline

CALIBRACIÓN

Alimentado el modelo con la información actual y requerida por el mismo, se procedió realizar sus corridas y a verificar la bondad de la calibración hidrológica comparando los valores simulados con los reales para las siguientes localidades:

Caudales en las siguientes cuencas aportantes:

- Río Yaque del Norte (Estación Manabao)
- Río Jimenoa (Estación Hato Viejo)
- Río Amina (Estación Amina)
- Río Mao (Estación Bulla)
- Río Guayubín (Estación Rincón)
- Río Maguaca (Estación Las Palmas)

Caudales aguas debajo de embalses y puntos de descarga de agua a canales de regadío

- Río Yaque del Norte (Estación Las Charcas)
- Río Yaque del Norte (Estación Puente San Rafael)
- Río Yaque del Norte (Estación Pena Ranchadero)
- Río Yaque del Norte (Estación Palo Verde)

Nivel de agua almacenado en embalse:

- Tavera-Bao
- Contraembalse López
- Presa de Monción
- Contraembalse de Monción
- Presa Maguaca

El objetivo del proceso de calibración fue optimizar los resultados del modelo para obtener patrones de flujo mensual correctos y los valores de caudal total por año producidos por el modelo lo más cercanos posible a los valores reales de acuerdo con las estaciones de medición de caudales.

RESULTADOS

Resultados de la calibración

Cuenca Río Yaque del Norte

El primer paso, para el proceso de afinamiento requerido para lograr la mejor calibración del modelo posible fue comparar caudales modelados vs. reales en las subcuencas de la cabecera de los ríos.

En la cuenca del río Yaque del Norte se observó que los patrones mensuales de los caudales

En la cuenca del río Yaque del Norte se observó que los patrones mensuales de los caudales seguían el patrón real, Fig. 8 (a título de ejemplo), sin embargo los caudales modelados resultaron ligeramente mayores que los caudales reales reportados en las estaciones de medición Manabao río Yaque del Norte, Hato Viejo río Jimenoa, Amina río Amina, Bulla río Mao, Rincón río Guayubín, Paso Las Palmas río Maguaca. (Tabla 4).

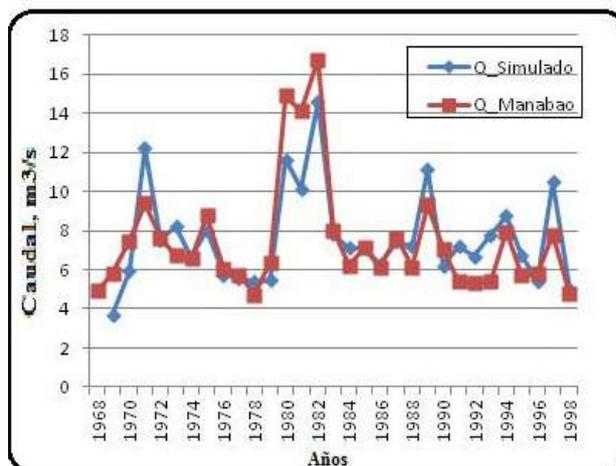


Figura 8. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca alta, río Yaque del Norte

Fig. 8. High basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River

Tabla 4. Comparación caudales medios multianuales, cuenca alta Yaque del Norte (m³/s)

Table 4. Yearly average flow comparison, Yaque del Norte high basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Yaque del Norte	Manabao	7.49	7.44	1.0066
Jimenoa	Hato Viejo	6.84	6.74	1.0147
Amina	Amina	7.45	7.39	1.0097
Mao	Bulla	19.73	19.33	1.0206
Guayubín	Rincón	9.53	9.50	1.0036
Maguaca	P_L_Palma	2.62	2.60	1.0083

Calibrados los caudales de la cabecera, el siguiente paso fue comparar los caudales modelados vs. reales en las subcuencas de la parte media y baja de los ríos, tabla 5. En general los caudales modelados

también siguieron el patrón mensual de los caudales reales, Fig. 9 y 10. En cuanto a la magnitud de los caudales modelados en la porción occidental de la cuenca resultaron menores que los caudales reales.

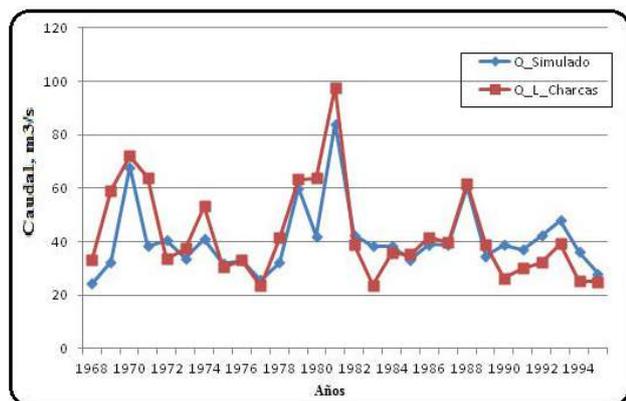


Figura 9. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca media río Yaque del Norte.

Fig. 9. Hig basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River.

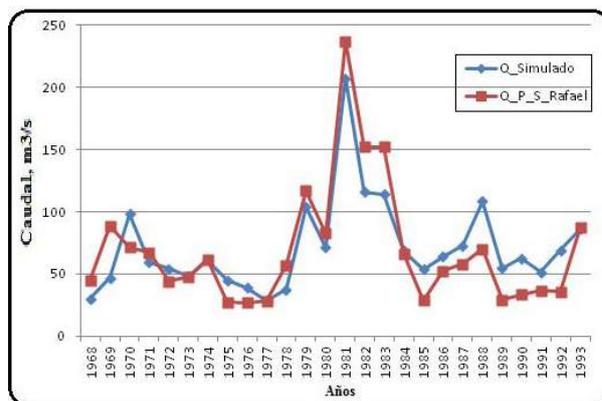


Figura 10. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca baja río Yaque del Norte.

Fig. 10. Low basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River.

Tabla 5. Comparación caudales medios multianuales, cuenca baja Yaque del Norte (m³/s)

Table 5. Yearly average flow comparison, Yaque del Norte low basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Yaque del Norte	Las Charcas	41.65	40.97	1.0165
Yaque del Norte	Puente San Rafael	63.45	61.20	1.0368
Yaque del Norte	Ranchadero	59.17	59.71	0.9909
Yaque del Norte	Palo Verde	64.84	65.19	0.9946

Cuenca Río Chacuey

En la cuenca del río Chacuey solo existe un lugar de control en la estación hidrométrica La Espensa y en el embalse de Chacuey.

Esa estación de medición actualmente no existe y sus datos son dudosos por los numerosos cambios de la sección de medición, sin sección de control ni aforos sistemáticos para corregir la curva de calibración. Por tanto los valores presentados en la Tabla 6, son solamente una guía de lo que sucede en la cuenca.

Tabla 6. Comparación caudales medios multianuales, cuenca río Chacuey (m³/s)

Table 6. Yearly average flow comparison. Chacuey River basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Chacuey	La Espensa	1.32	1.31	1.0076

Cuenca Río Masacre

En la cuenca del río Masacre existe tres lugares de control en las estaciones hidrométricas Don Miguel,

La Aduana y Carbonera, ubicado en el afluente del Masacre, Guajabo.

En general los caudales modelados siguieron el patrón mensual de los caudales reales. En cuanto a la magnitud de los caudales modelados en la cuenca resultaron mayores que los caudales reales. (Tabla 7, Fig. 11 y 12).

Los caudales del Río Guajabo en Carbonera fue generada de forma sintética, con una serie muy pequeña anteriores al período de calibración, mientras que en la captación se generaron valores con datos reales correspondientes al período de calibración, siendo esta la razón por la cual los caudales reales y observados difieren notablemente.

Tabla 7. Comparación caudales medios multianuales, cuenca río Masacre (m³/s)

Table 7. Yearly average flow comparison, Masacre River basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Masacre	Don Miguel	4.2930	4.2654	1.0065
Masacre	La Aduana	8.0574	8.0095	1.0060
Guajabo	Carbonera	0.3891	0.3857	1.0088

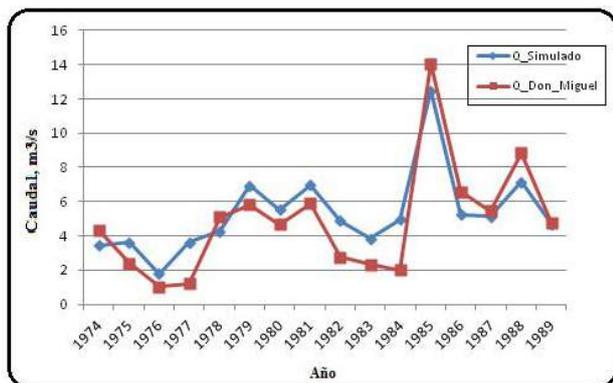


Figura 11. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo), Masacre en Don Miguel

Fig. 11. Real (blue) and modelled (red) monthly flow, Masacre River at Don Miguel

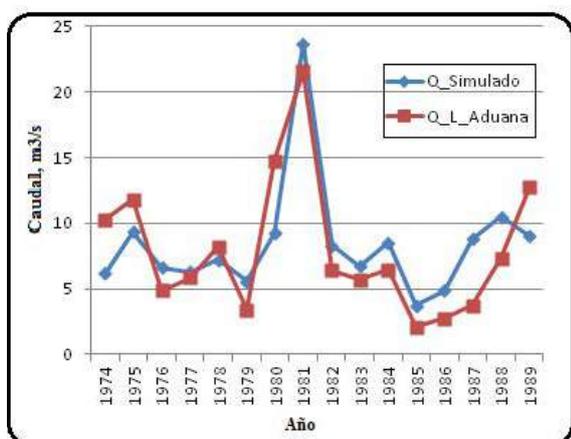


Figura 12. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo), Masacre en La Aduana

Fig. 12. Real (blue) and modelled (red) monthly flow, Masacre River at La Aduana

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Calibrado el modelo para la región completa se procede a realizar una serie de estudios específicos, relacionados con la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros considerados fueron:

- Escenarios de crecimiento a largo plazo.
- Escenarios de uso de suelo.
- Escenarios de cambio climático.

Bases metodológicas escenarios futuros

Escenarios de crecimiento a largo plazo

El primer supuesto es considerar que todo permanece igual a través del tiempo del punto de vista de uso del suelo y se proyecta dicha situación hasta el 2050. Luego se comparan los resultados para determinar los principales problemas que esta situación produce.

Escenarios de uso de suelo

El segundo supuesto es considerar una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua, y se analizan sus resultados proyectados al 2050.

Escenarios de cambio climático

El tercer supuesto son los escenarios de cambio climático y su efecto a largo plazo. Se simularon cambios en la precipitación, temperatura y humedad relativa.

Descripción de los escenarios de cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), en su Artículo 1, define el cambio climático como atribuible directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Se han analizados seis familias de escenarios SRES (Special Reports on Emission Scenarios) y el informe AR4 provee las temperaturas proyectadas y el aumento en los niveles del mar para cada familia de escenarios. Fig. 13.

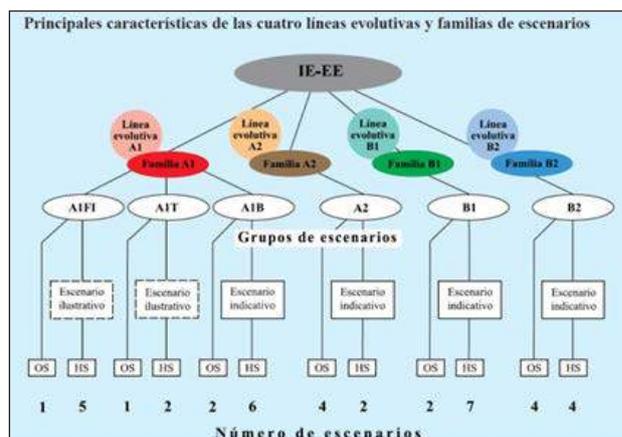


Figura 13. Familias de escenarios de cambio climático

Fig. 13. Weather changes Scenarios

Resumiendo:

Los grupos A, ponen énfasis en la riqueza humana. En A1, globalizado e intensivo, predominan las fuerzas del mercado; en A2, regional e intensivo predomina el golpeo de las civilizaciones.

Los grupos B, ponen énfasis en la sostenibilidad y la equidad. En B1, globalizado y extensivo, predomina el desarrollo sostenible; en B2, regional y extensivo, predomina la bolsa verde, Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de los Escenarios del IPCC

Table 8. IPCC Scenarios summary

Enfoque	Más económico	Más medioambiental
Globalizado (mundo homogéneo)	A1 crecimiento económico rápido (grupos: A1T; A1B; A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 sostenibilidad del medio ambiente mundial 1.1 - 2.9 °C
Regional (mundo heterogeneo)	A2 orientación regional desarrollo económico 2.0 - 5.4 °C	B2 sostenibilidad del medio ambiente local 1.4 - 3.8 °C

Debe tenerse en cuenta que para remover el dióxido de carbono antropogénico del pasado y futuro se requiere más de un milenio, por lo que continúan contribuyendo al calentamiento global.

Para las proyecciones de precipitación y temperatura en la región Yaque del Norte, se utilizaron los escenarios de emisión de gases; A2, en el cual las emisiones continúan aumentando continuamente y B1 en que las emisiones comienzan a disminuir a partir del 2050, basados en los resultados obtenidos por la Dra. Claudia León de Riverside, para dicha región, Fig. 14. Utilizamos el escenario de clima moderado, debido a los resultados presentados por la Dra. Michela Izzo en su trabajo Tendencias climáticas históricas en la República Dominicana y vulnerabilidad del territorio frente al cambio climático, julio 2013, en que demuestra que la temperatura se está incrementando en todo el territorio nacional, aunque la temperatura máxima está creciendo

menos que la mínima. (En el período 1936-2007, $+3.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ para la temperatura mínima y $+1.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$ para la máxima), y las precipitaciones presentan un comportamiento menos uniforme, dependiendo su tendencia de la posición del lugar dentro del país.

Los resultados de la Dra. Claudia León, de Julio 2013, en su trabajo Selección de proyecciones de cambio climático, para la República Dominicana, Fig. 14, fueron:

- Clima seco y cálido. Disminución de la precipitación anual de 30% a 40% y aumento de la temperatura entre 2.6 y 3.7 °C
- Clima moderado. Disminución de la precipitación anual 10% y aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C
- Clima húmedo y cálido. Aumento de la precipitación anual de 8% a 20% y aumento de la temperatura entre 1 y 3 °C

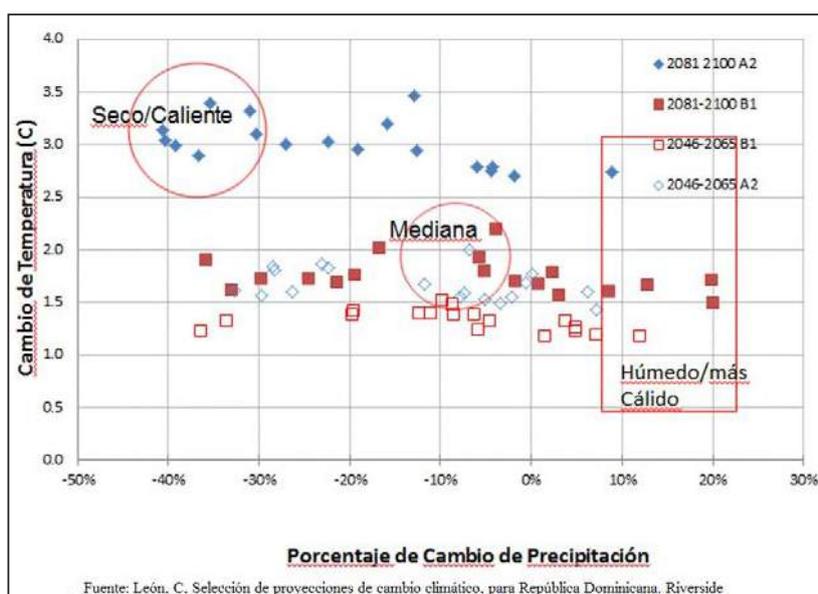


Figura 14. Variabilidad anual temperatura y precipitación

Fig. 14. Yearly temperature and rain variability

En base a los resultados de la Dra. Claudia León de Riverside, en su trabajo "Selección de Proyecciones de Cambio climático, para la República Dominicana", Julio 2013, se ha elegido el escenario de clima moderado, que predice una tendencia a disminuir la precipitación anual en un 10% y un aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C, para el 2100.

La selección utilizada es similar a los resultados presentados en la "Segunda Comunicación Nacional, Proyecto Cambio Climático 2009, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, PNUD, utilizando los ECH98 y PRECIS, que predice un descenso general de la precipitación de un 5% para el 2050 y un incremento de la temperatura entre 0.6 y 0.7°C.

RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS

Presentamos los resultados de los supuestos simulados con el programa del modelo de recursos hídricos en la plataforma WEAP, Water Evaluation And Planning, para la Región Yaque del Norte de la República Dominicana, que incluye tres supuestos: que todo permanezca igual a través del tiempo, hasta el 2050; que se produzca una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua; y de cambio climático a través del efecto del cambio gradual en la precipitación, temperatura y humedad relativa a largo plazo.

Escenario de crecimiento a largo plazo (2015 a 2050)

En este escenario no se contemplan cambios de uso del suelo, debido a una falta de política estatal que defina y especifique un real cambio de uso del suelo. Por lo que haber realizado estas asunciones se arrojarían resultados erróneos ya que se basarían en hipótesis irreales.

El suministro a los acueductos resultó ser adecuado, para el riego se observan algunas áreas con problemas, con déficit medio mensual de 56 MMC para el Yaque del Norte, 0.24 MMC para la cuenca del Chacuey y 0.78 MMC para la cuenca del Masacre.

Escenario mejoramiento del riego

El principal usuario del agua en la región Yaque del Norte es la agricultura y por tanto para mejorar el uso del agua en la cuenca debemos realizar actividades que optimicen el uso del recurso en este usuario, ya que se necesita expandir la producción agrícola, para sostener el desarrollo, y para ello se necesitan nuevas áreas de producción y como consecuencia, una presión mayor sobre el recurso. La información básica de este punto fue obtenida de

los resultados del Plan Hidrológico Nacional, debido a la confiabilidad de las mismas, (INDRHI, 2012).

Del Plan Hidrológico Nacional tenemos las áreas potenciales a ser incorporadas al riego de la región, que ascienden a unas 5,318 hectáreas, adicionales para el 2050.

Para realizar esta expansión es necesario mejorar la eficiencia del uso del recurso en dichas áreas, teniendo en cuenta que las pérdidas en los sistemas de conducción se deben a filtraciones y evaporación; que las pérdidas en la aplicación del riego en las parcelas, se deben al viento, a la evaporación y al drenado; y que las pérdidas en el suelo, al agua en exceso que el cultivo no puede aprovechar.

Por tanto es necesario reducir dichas pérdidas, incrementando la eficiencia de riego. El incremento de la eficiencia en los sistemas de riego incide positivamente en el ahorro de los volúmenes de agua aplicados a las parcelas, lo que produce una disminución de la recarga al nivel freático, con los resultados favorables que esto significa de evitar la degradación de los suelos por problemas de drenaje y salinidad.

Para simular los cambios en la eficiencia con el modelo WEAP se usó 21 % como línea base de eficiencia global de riego promedio en los sistemas de riego ubicados en las cuencas Yaque del Norte, Chacuey y Masacre. Este valor inicial fue obtenido en base a evaluaciones previas realizadas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) en el 2010, como parte de sus funciones del manejo del agua de riego a nivel nacional. Partiendo de esta premisa y considerando los trabajos de mejoramiento de la infraestructura física que realiza el INDRHI en estos sistemas de riego, a través del proyecto de Recuperación de Emergencia y Gestión de Riesgo por Desastres Naturales, préstamo BIRF-7546-DO, con fondos del Banco Mundial, se estima que se producirá una mejoría en la eficiencia global promedio de riego de un 25 %, lo que arroja una eficiencia mejorada ascendente a 46 %. Esto además, será favorecido por actividades continuas de capacitación de los agricultores a los fines de mejorar los umbrales de aplicación del agua de riego a las parcelas. Es importante destacar que no se vislumbra políticas públicas estatales en el sub sector riego tendente a cambiar áreas significativas de riego por superficie a riego presurizado.

Por lo que para simular estos cambios en la eficiencia, en el modelo WEAP, se procedió a cambiar las pérdidas de conducción a nivel de canales principales y red de distribución, y los umbrales de riego aplicados, observándose una reducción en los volúmenes derivados para satisfacer la demanda agrícola de riego de 3,493.22 MMC a 2,624.28 MMC, lo que representa una economía del orden de 869 MMC.

Escenario de cambio climático

Para las corridas correspondientes al cambio climático, se analizaron los tres (3) escenarios modelados por la Dra. Claudia de León, Julio 2013, y se seleccionó el correspondiente a clima moderado, por ser el más adecuado a suceder en virtud a la posición de la isla y visto también los estudios realizados en el país por la Dra. Michella Izzo en su trabajo "Tendencias Climáticas Históricas en la República Dominicana y Vulnerabilidad del Territorio frente al Cambio Climático, Julio 2013, el modelo WEAP fue ajustado introduciendo el incremento de la temperatura en 1.2°C, la reducción de la precipitación y la humedad relativa en 10%, generándose las series correspondientes. Posteriormente fueron ajustados dentro de WEAP, de acuerdo a los mismos factores de ajuste para cada captación empleada en el escenario de línea base.

Para la cuenca del Yaque del Norte, en los resultados de la demanda no satisfecha, la cobertura del servicio, la confiabilidad de la oferta se observa un déficit de la demanda media anual de 82.76 MMC, y una reducción de la cobertura considerable al compararla con la del escenario de que todo siga igual.

En el análisis de la demanda se observa un incremento, entre los escenarios con cambio climático y sin cambio climático, de 1092.70 MMC, al 2050. De los cuales 266.62 MMC corresponden al agua potable que incluye el industrial y 826.08 MMC al sector riego.

Los resultados obtenidos de la generación hidroeléctrica, el flujo turbinado, los niveles de elevación de los embalses y los volúmenes observados, en el escenario de cambio climático, muestran que la generación hidroeléctrica disminuirá en 3.5% equivalente a 150 Tera Joules.

Para la cuenca del Chacuey, las demandas no satisfechas y las coberturas de la demanda en el período 1977 a 2050, presentan un déficit de 0.32 MMC y un incremento en la reducción de la cobertura del servicio. Mientras que el efecto del cambio climático en el incremento de la demanda de agua en la cuenca del río Chacuey, asciende a unos dos millones de metros cúbicos.

La cuenca del Masacre es más sensible a los cambios en la precipitación, humedad relativa y temperatura del aire, presentándose una marcada tendencia a la disminución de los caudales. La demanda no satisfecha presenta un déficit de 0.87 MMC, en la zona del Guajabo, ascendiendo los requerimientos de agua para los cultivos de la zona a unos 42 MMC como media anual, y la confiabilidad del suministro del recurso presenta pocos cambios entre ambos escenarios. El incremento de la demanda de agua

en la cuenca del río Masacre, asciende a unos 7 millones de metros cúbicos. De incorporar 90 ha adicionales, 65 entre Loma Cabrera y Dajabón y el resto en área de Dajabón, la demanda ascendería a 193 MMC con déficit de unos 150 MMC.

CONCLUSIONES Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

Mientras no se produzcan cambios significativos en el flujo de los vientos alisios, como consecuencia del cambio climático, la Región Yaque del Norte continuará teniendo, más o menos, la misma disponibilidad del recurso agua, con las oscilaciones normales del ciclo de los once años de las precipitaciones.

Como el recurso agua es un recurso finito y la demanda del mismo continuará creciendo como consecuencia del incremento de la población y la demanda agrícola e industrial, se impone el reducir las cuantiosas pérdidas del recurso en las fugas de agua, baja eficiencia en el uso del agua en la agricultura y el derroche en su uso industrial.

Establecer un plan de mejoramiento de las eficiencias de riego, de acueductos e industrias, es complejo y costoso, pero sin lugar a dudas, necesario para preservar los recursos que van a necesitar las próximas generaciones y adicionalmente se crearían innumerables fuentes de trabajo con sus efectos multiplicadores sobre la estabilidad de la región.

No deben subestimarse los consumidores comerciales no industriales como lavaderos de vehículos, lavanderías, hoteles, restaurantes, los cuales ameritan ser reeducados en el ahorro del agua.

Estrategia para aumentar el volumen de agua regulada

Los requerimientos de agua para la región Yaque del Norte en los años 2007 y 2008 fueron, respectivamente, 2,348.04 MMC y 2,376.43 MMC. Las demandas de agua en el escenario de cambio climático ascienden a unos 3,517 MMC, con un incremento de la demanda de unos 1000 MMC aproximadamente, similar a la comparación del escenario sin cambio climático. Para aumentar el volumen regulado se sugiere implementar los proyectos recomendados por el Plan Hidrológico Nacional (INDRHI, 2012), en armonía con la gestión sostenible del medio ambiente, cuyo listado se presenta en el Tabla 9, con los que se aumentaría la capacidad embalsada en unos 500 MMC, lo que reduciría significativamente el déficit de la región al 2050.

Tabla 9. Presas propuestas Región Yaque del Norte, adaptado

Table 9. Yaque del Norte region proposed dams, adapted

Río	Proyecto	Comentarios	Costo (en MM de US\$)
Amina	Presa de Amina Embalse de 347.00 MMC	Eliminar el déficit de agua potable y reducir deficiencias de riego en la zona, también aportará 59.00 GW/HR/AÑO	180.00
Bao	Presa Las Placetas Embalse de 19.60 MMC	Aportar 331.00 GW/HR/AÑO al sistema eléctrico	285.00
Guayubín	Presa San José Embalse de 70.00 MMC	Eliminar el déficit de agua potable y reducir deficiencias de riego en la zona.	60.00
Yaque del Norte	Manabao-Bejucal Embalse de 45.00 MMC	Aportar 290.00 GW/HR/AÑO al sistema eléctrico	200.00
Masacre	Presa Los Jobos Embalse de 0.86 MMC	Reducir el déficit de agua para riego	15.00
Masacre	Presa Don Miguel Embalse de 29.30 MMC	Reducir déficit de agua para riego	30.00
Masacre	Presa de Capotillo Embalse de 23.80 MMC	Reducir déficit de agua para riego	24.00
Masacre	Presa de Manatí Embalse de 1.80 MMC	Reducir el déficit de agua para riego	N/D
Masacre	Presa de Loma de Cabrera Embalse de 8.90 MMC	Reducir déficit de agua para riego	20.00
Total	546.26 MMC		810.00

El resto del déficit del recurso se obtendría del control de las fugas en los acueductos, la mejora de la eficiencia de los sistemas de riego y el almacenamiento en embalses distribuidos en toda la cuenca que aprovecharían las aguas no utilizadas en el riego durante las noches y mediante trasvase de ríos cercanos, entre otras se tienen elegidos las nuevas pequeñas presas pre-aprobadas de Don Armando en Guatapanal, Samba en cañada Samba y Los Caimonies en arroyo Bellaco, alimentados del río Caña; Guanito, Antón Sape; Los Juberos, El Capei y Agua de Luis por Villa Vásquez.

Entre otras posibles presas de interés en la zona se encuentran Laguna Saladilla, Apargatales y los Corbanos, Los Limones y El Cayal.

Estrategia para mejorar la eficiencia del sector riego

Como se observa en la Tabla 10, se obtiene una reducción en los volúmenes para la demanda agrícola, después de los ajustes en las pérdidas de conducción y los umbrales de aplicación del riego, de 3,493.22 MMC a 2,624.28 MMC, lo que representa una economía del orden de 869 MMC, similar a los 838 MMC de las supuestas pérdidas actuales, por lo que la ampliación de la zona de riego teniendo en cuenta la mejora de la eficiencia, no representa nuevos requerimientos del recurso.

Tabla 10. Resumen demanda escenarios sin y con cambio climático

Table 10. Summary of water demand scenarios with and without weather change

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Suma
Sin cambio climático	252.65	272.97	444.85	317.21	261.59	300.79	343.77	294.48	322.43	213.36	231.04	238.08	3493.22
Con cambio climático	183.17	221.65	349.20	236.95	194.10	228.00	263.33	223.22	233.76	149.78	173.98	177.13	2624.28
Diferencia	69.48	51.32	95.65	80.26	67.49	72.79	80.44	71.26	88.67	63.58	57.06	60.95	868.94

Estrategia para mejorar la eficiencia de los acueductos

Las pérdidas en los acueductos de la región son significativas, para el acueducto Cibao Central las pérdidas son estimadas en 80% y en las demás ciudades son superiores al 40%. De acuerdo con el Ing. Arturo Socias, ex subdirector ejecutivo del INAPA, la dotación per cápita asciende a 907.7 lppd, cuando en Estados Unidos es de 300 lppd. En el proyecto utilizamos un consumo de 80% para el acueducto Cibao Central y 50% para el resto de los acueductos.

Esta situación sugiere que deben implementarse medidas inmediatas de corrección de fugas en todo el sistema de abastecimiento de agua potable. INAPA y CORAASAN deben organizar brigadas de corrección de fugas, que investiguen y reparen las filtraciones en las líneas de conducción y dentro de las casas.

De implementarse un programa de reducción de las pérdidas en los acueductos de la cuenca Yaque del Norte, se obtendría una economía del agua del orden de los 135 MMC.

Tabla 11. Población, consumo y ahorro del agua al 2050, en MMC

Table 11. MMC population, water consumption and water-saving by 2050

Acueductos	Rata l/p/a	Pob. 2010	Pob. 2050	Consumo 2010	Consumo 2050	Perdidas	Mejorar al 0.25	Economía
Cibao Central	164250	700000	1132492	114.975	186.012	148.81	37.20	111.61
JARABACOA	91250	60000	97071	5.475	8.858	3.54	0.89	2.66
SAB_IGLE_TAV	73000	24000	38828	1.752	2.834	1.13	0.28	0.85
RL_RUBIO_SJM_JANICO	73000	40000	64714	2.92	4.724	1.89	0.47	1.42
SAJOMA_ESPER	91250	34000	55007	3.1025	5.019	2.01	0.50	1.51
ALINO_1	91250	86000	139135	7.8475	12.696	5.08	1.27	3.81
Alto_Guayubin	54750	20000	32357	1.095	1.772	0.71	0.18	0.53
Bajo Guayubín	73000	41000	66332	2.993	4.842	1.94	0.48	1.45
Alino_2	91250	166000	268562	15.1475	24.506	9.80	2.45	7.35
ALINO_3	91250	70000	113249	6.3875	10.334	4.13	1.03	3.10
ALINO_4	91250	34000	55007	3.1025	5.019	2.01	0.50	1.51
Suma		1275000	2062753	164.7975	266.617	181.05	45.26	135.79

Estrategia para mejorar la eficiencia del uso del agua en la industria

Las industrias de la región Yaque del Norte, especialmente en el entorno de la ciudad de Santiago, deben introducir plantas depuradoras para el tratamiento de sus aguas residuales que permitan reducir volumen y toxicidad, mediante la remoción de sólidos, arenas, aceites y grasas, metales pesados, arsénico, cadmio, cromo hexavalente, cobre, cianuro, plomo, mercurio, níquel, zinc, control de pH, floculación y coagulación.

Estrategia para mejorar la calidad del agua

La contaminación en la región Yaque del Norte es principalmente de naturaleza antrópica, por falta de redes de alcantarillado y plantas de tratamiento que garanticen un efluente ambientalmente aceptable y por las aguas utilizadas en la agricultura, la industria y el comercio que son devueltas a los cursos de agua, en condiciones de calidad no adecuadas.

Es imprescindible construir sistemas de alcantarillado con sus plantas de tratamiento de las aguas residuales, principalmente en Jarabacoa, Santiago, San José de Las Matas, Mao, Villa Vásquez, Guayubín, Dajabón, entre otras.

Estrategia para proteger las fuentes productoras de agua

El proceso de degradación de las zonas productoras de agua es debido al manejo incorrecto de los suelos, prácticas agrícolas inadecuadas, deforestación, agricultura migratoria, sobre pastoreo y uso inapropiado del agua, lo que impacta negativamente en el medio ambiente,

Por tanto deben fortalecerse los programas de restauración ecológica, reducción de la contaminación por actividades agrícolas, reducción o eliminación de los daños a cauces de los ríos y fortalecimiento del manejo de cuencas.

Estrategia para educar a la población sobre el manejo del recurso

Casi la totalidad de la población no tiene cultura de lo que debe ser el uso racional del agua y con bastante frecuencia este recurso vital se usa con poco criterio para su ahorro y conservación, por lo que se requiere implementar una amplia campaña de educación a todos los niveles, partiendo desde los niveles básicos de la educación hasta abarcar toda la población. Sugerimos implementar el siguiente resumen de actividades de educación en la región Yaque del Norte, apoyados en las sugerencias del Plan Hidrológico Nacional (INDRHI 2012).

- Fortalecer el Programa Cultura del Agua en la Región.
- Incorporar programa de capacitación a los regantes sobre técnicas de uso eficiente del recurso.
- Implementar un programa de educación comunitaria sobre ahorro del agua.
- Integrar a los ayuntamientos, INAPA, CORAASAN e instituciones afines (APEDI, etc) a los programas de uso eficiente del agua.
- Uso de los medios masivos de comunicación, radio, TV, periódicos para la difusión de educación sobre el uso eficiente y ahorro del agua.
- Capacitación a maestros en Liceos y Colegios sobre la importancia del agua, su manejo adecuado y su conservación.

Además se sugiere el involucramiento del personal técnico de alta calificación de los Centros de Gestión de Agronegocios y los Centros Audiovisuales y Bibliotecas (CEGA-CABI) en acciones de capacitación de los agricultores en mejores prácticas de riego y conservación de los recursos naturales.

Agradecimiento

Este proyecto "Simulación de los Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Estrategias de Adaptación en la Cuenca de la Región Yaque del Norte", fue ejecutado con el apoyo económico del Fondo Nacional De Innovación Y Desarrollo Científico Y Tecnológico, FONDOCYT, del Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCYT), a través del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INDRHI, y su Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe (CEHICA), durante los doce meses del año 2013.

REFERENCIAS

León, Claudia, Julio 2013, Selección de proyecciones de cambio climático, para República Dominicana. Riverside.

Izzo, Michela, Julio 2013. Tendencias climáticas históricas en la República Dominicana y vulnerabilidad del territorio frente al cambio climático, Primer Simposio Biodiversidad y Cambio Climático. Santo Domingo, República Dominicana.

INDRHI, 2012. Plan Hidrológico Nacional. Santo Domingo, República Dominicana.

Jabloun, Mohamed and Sahli, Ali, January 2012, WEAP-MABIA Tutorial.

Flores-López, F., et al. (2012). Implementación de estrategias de manejo integral de recursos hídricos en la cuenca hidrológica de Yaque del Sur, Republica Dominicana mediante el uso del modelo WEAP.

Stockholm Environment Institute. May 2011, User Guide, Water Evaluation And Planning, WEAP. [Http://www.weap21.org](http://www.weap21.org).

ONE, IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, Vol.1. Santo Domingo, República Dominicana.

Stockholm Environment Institute. Feb 2009, Tutorial Water Evaluation And Planning, WEAP

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

CATHALAC, 2008. Potential Impacts of Climate Change on Biodiversity, in Central America, Mexico and the Dominican Republic.

Escobar, M., Condom, T., Suarez, W., Purkey, D., Pouget, J.C., Ramos, C. 2008. Construcción del Modelo WEAP del Río Santa. Proyecto: Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montañas: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú. IRD, SEI-US, Banco Mundial

Céleri, R. 2007. Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Belgica.

IPCC, 2007. Informe de síntesis AR4, Cambio climático 2007. OMM-PNUMA.

Grusamar (2007). Plan Hidrológico Nacional Fase I Diagnostico. Santo Domingo, R.D.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith. 2005a. WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. Water International. 30(4):487-500.

INDRHI-EPTISA, 2004. Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana Fase II. Unidad Hidrogeológica de la Cordillera Central y Valle del Cibao. Santo Domingo, República Dominicana.

González, J. A., 2003. Valle del Cibao: Ecología, suelos y degradación. Santo Domingo, República Dominicana.

IPCC, 2000. Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de políticas. OMM-PNUMA.

García, A., Brugal, M. 1995. Aspecto de la calidad del agua en la cuenca degradada del río Yaque del Norte.

Síntesis del seminario-taller sobre Degradación de la cuenca del río Yaque del Norte. Santo Domingo, República Dominicana.

Allen, R.G., Pereira, L.S., et al (1988. Crop Evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements FAO 56, Irrigation and Drainage Paper, Rome.

OPCIONES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A TRAVÉS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA; CASO ESTUDIO DEL TRAMO MEDIO DEL RIO EBRO, ESPAÑA

ECOLOGICAL RESTORATION OPTIONS WITH NUMERICAL SIMULATION: CASE STUDY OF THE MIDDLE EBRO RIVER, SPAIN

Ernesto Veres¹, María González-Sanchis², Javier Murillo³ y Pilar García-Navarro³

Resumen

Durante el siglo pasado, el régimen de flujo del río Ebro se ha visto afectado considerablemente. El riego de las tierras bajas y el abandono de tierras de cultivo en las zonas altas han generado fuertes cambios en la hidrología, en la carga de sedimentos y de las interacciones en las llanuras de inundación. Por otro lado, la fuerte regulación del río debido a la construcción de embalses junto con la colocación de estructuras de protección (terraplenes) ha mermado la actividad geomorfológica de la cuenca. En el caso de las llanuras de inundación, la falta de actividad geomorfológica ha limitado la interacción dinámica entre el agua y la tierra, disminuyendo de esta manera la conectividad hidrológica del sistema. Por ello se ha generado un proceso largo y profundo de degradación de los ecosistemas de las llanuras. El presente trabajo tiene como objetivo principal utilizar la simulación numérica como herramienta útil para entender y predecir la dinámica de inundación y morfológica de la llanura de inundación. La zona de estudio se localiza en la Reserva Natural de Los Galachos, a 12 km aguas abajo de Zaragoza, en el tramo medio del río Ebro. Se ha planteado utilizar la simulación numérica para analizar y proponer algunas alternativas de restauración ecológica basadas en: i) manejo de caudales, y/o ii) modificación del terreno. Para ello se ha definido un modelo hidráulico bidimensional (2-D) de régimen variable que se ha resuelto a través del software GUAD 2D (referencia a www.inclam.com). Los resultados muestran, respecto a la dinámica de flujo, que la mayor parte del área de estudio es inundada con caudales ordinarios. Por otro lado, como indicador de la actividad geomorfológica, se ha determinado el esfuerzo crítico cortante o shear stress a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones (profundidad y velocidad del flujo). Las alternativas propuestas para la restauración no han inducido a cambios geomorfológicos importantes, sin embargo, se ha observado un aumento de los valores del shear stress en la zona restaurada que, a largo plazo, podrían generar cambios morfológicos. Finalmente, se ha demostrado el potencial de la simulación numérica como herramienta para predecir la dinámica de inundación y morfológica de las llanuras de inundación.

Palabras clave: Restauración ecológica, llanura de inundación, esfuerzo crítico cortante, simulación numérica

Abstract:

During the last century, the Ebro river flow regime has been considerably affected. The lowland irrigation and the abandonment of agricultural land in the highlands have caused strong changes in hydrology, the sediment load and floodplain interactions. On the other hand, the strong regulation of the river caused by the construction of dams and structures of protection (embankments) has diminished the basin geomorphological activity. In the case of the floodplain, the geomorphological activity shortage has limited the dynamic interaction between water and land, reducing the hydrological connectivity of the system. Therefore, a long and deep process of degradation of the floodplain ecosystem is generated. The present work presents the numerical simulation as a useful tool to understand and predict the flood and morphological dynamics of the floodplain. The study area is located in the Natural Reserve of "Los Galachos", 12 km downstream from Zaragoza city, in the middle Ebro basin section. We use numerical simulation to analyze and propose some alternatives for ecological restoration based on: i) flow management, and/or ii) terrain modification. We select a two-dimensional (2-D) hydraulic model in a variable regime that it is resolved by the GUAD 2D software (information at www.inclam.com). The results show, regarding flow dynamics, most of the study area is flooded under ordinary flooding events. On the other hand, as an indicator of the geomorphological activity, it is determined the critical shear stress from the results of the simulations (depth and velocity). The alternatives proposed for the restoration do not induce significant geomorphological changes, however it is observed an increasing of the shear stress values in the restored area that, in the longer term future, could generate morphological changes. Finally, it is demonstrated the numerical simulation as a tool capable of predict the flood and morphological dynamics of the floodplain.

Keywords: Ecological restoration, floodplain, shear stress, numerical simulation

¹ Comisión Nacional de Riego (CNR), Gobierno de Chile.

² Universidad Politécnica de Valencia, España.

³ Universidad de Zaragoza (UZ), España.

INTRODUCCIÓN

Las llanuras de inundación son ecotonos entre los ambientes de las zonas de tierra y el cauce del río donde se alterna estados acuáticos y terrestres (Junk et al., 1989). La interacción dinámica entre el agua y la tierra generada por la frecuencia en las inundaciones es el principal proceso que produce y mantiene estos ecosistemas (Bayley et al., 1995). Esta interacción se denomina conectividad hidrológica y constituye el elemento necesario que genera el intercambio lateral de materia y energía a través de flujo superficial (el concepto de pulso de inundación de Junk et al. (1989)) y subterráneo (Heiler et al., 1995).

Como resultado aparecen diferentes hábitats generados a través del paisaje fluvial, donde muchas especies coexisten (Hauer & Lorang, 2004). Las llanuras de inundación están considerados centros de biodiversidad (Tockner & Stanford, 2002). Sin embargo, estos ecosistemas también son los más alterados de la tierra, cuyo ritmo de desaparición continúa creciendo de manera alarmante (Vitousek et al., 1997; Olson & Dinerstein, 1998; Ravenga et al., 2000).

Particularmente, la Cuenca del río Ebro (NE de España) en su tramo medio ha visto limitada su actividad geomorfológica durante la última mitad del s. XX, debido principalmente a la alteración del mismo. Dicha limitación se ha generado a partir de la construcción de estructuras de protección (terraplenes) y a una fuerte regulación del río (Ollero, 2010). Además, el cambio de la dinámica en la agricultura con el riego de las tierras bajas y el abandono de las tierras de cultivo en las zonas altas de la cuenca han generado fuertes cambios en la hidrología, en la carga de sedimentos y en las interacciones en las llanuras de inundación (Ibáñez et al., 1996; Batalla et al., 2004; Frutos et al., 2004; Pinilla, 2006; Ollero, 2007; Cabezas, et al., 2009).

Esta falta de actividad geomorfológica ha limitado la conexión dinámica entre el agua y la tierra, disminuyendo la conectividad hidrológica del sistema. De esta manera se ha generado un proceso acusado de degradación de los ecosistemas de la llanura de inundación. La *Reserva Natural de Los Galachos de La Alfranca, Pastriz, la Cartuja y el Burgo de Ebro*, perteneciente al tramo medio de la cuenca del Ebro y área de estudio del presente trabajo tampoco ha escapado a esta situación (González - Sanchis, et al., 2012).

Diversos autores proponen la alternativa de restauración ecológica para revertir tal situación. Estas estrategias se basan principalmente en el manejo de caudales y modificación del terreno (Buijse et al., 2002; Cabezas et al., 2008).

Las llanuras fluviales son áreas sujetas a inundaciones recurrentes en las que la representación detallada del avance del frente de inundación es de interés indudable. Es importante contar con un modelo que recoja la complejidad de

la topografía y sus consecuencias sobre la dinámica del flujo. Esto invalida aproximaciones simplistas de tipo unidimensional (1D) basadas en secciones transversales. Los modelos bi y tri-dimensionales (2D, 3D) ofrecen una mejor representación de la hidrodinámica. Los modelos 3D proporcionan resultados muy detallados al precio de un coste computacional muy alto que a menudo los vuelve ineficientes. Este coste puede aliviarse usando modelos 2D promediados en la vertical dado que las escalas horizontales y los calados habituales permiten este tipo de aproximación.

La mayor parte de los modelos aplicados para simulaciones medioambientales son de régimen no permanente (Bates et al., 1998; Somes et al., 1999; Horritt, 2000; Beffa & Connell, 2001; Cobby et al., 2003), incluso para simulación de estados permanentes. De entre estos, algunos se basan en simplificaciones que desprecian términos inerciales (Bates et al., 1998; Horritt, 2000; Cobby et al., 2003; Bates and De Roo., 2000). Esto reduce considerablemente el significado físico de la velocidad calculada. Más aun, los basados en la aproximación de onda cinemática son incapaces de recoger efectos de remanso, de gran importancia en las llanuras fluviales (Junk et al., 1989). Los modelos 2D de onda dinámica completos (Murillo et al., 2009) ofrecen por el contrario una información fiable de calado y velocidad del flujo promediado en la vertical de gran importancia en estudios como el presente (González-Sanchis et al., 2012).

Por todo lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es utilizar la simulación numérica en 2D como herramienta útil para entender y predecir la dinámica de inundación y morfológica de la llanura de inundación de la *Reserva Natural de los Galachos*.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

La zona de estudio se localiza dentro de la Reserva Natural de Los Galachos de La Alfranca, Pastriz, la Cartuja y el Burgo de Ebro, perteneciente al tramo medio de la cuenca del río Ebro (41°39' N, 0°52' W) localizada aproximadamente a 12 km aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. La cuenca del Ebro se sitúa en el cuadrante NE de la Península Ibérica ocupando una superficie total de 85.362 km². Es la cuenca hidrográfica más extensa de España (CHE, 2013).

El río Ebro, con una longitud total de 910 km, es el más largo de los ríos de la Península Ibérica que desembocan en el Mediterráneo. Tiene una descarga anual al mar Mediterráneo de 18.138 hm³ y de restos geomorfológicamente activos, a pesar de las 170 presas y embalses situados en el río y en sus afluentes (Cabezas, et al., 2008).

El clima de la cuenca del río Ebro es semiárido caracterizado por la escasez de precipitaciones (400

mm/año) y temperaturas a menudo superiores a 35° C en el periodo estival (González, 2010). El régimen hidrológico del río Ebro es pluvionival y, como la mayoría de los ríos mediterráneos, caracterizado por la alta variabilidad del flujo intra e inter-anual (Ollero, 2010).

En la estación de aforo de Zaragoza la media del caudal mensual registrado es de 230 m³/s (1981–2003) y la cota de la lámina de agua oscila entre

175 a 185 msnm en el cauce del río sobre la base de la vieja terraza del mismo (Cabezas et al., 2008). Los niveles bajos en el caudal (30-50 m³/s) ocurren frecuentemente en el verano (4 a 5 meses), aunque el flujo superficial sigue siendo permanente (González, 2010). Tal como se observa en la figura 1, la zona de estudio es de carácter meandriforme muy característico del tramo medio del río Ebro (Cabezas et al., 2008).

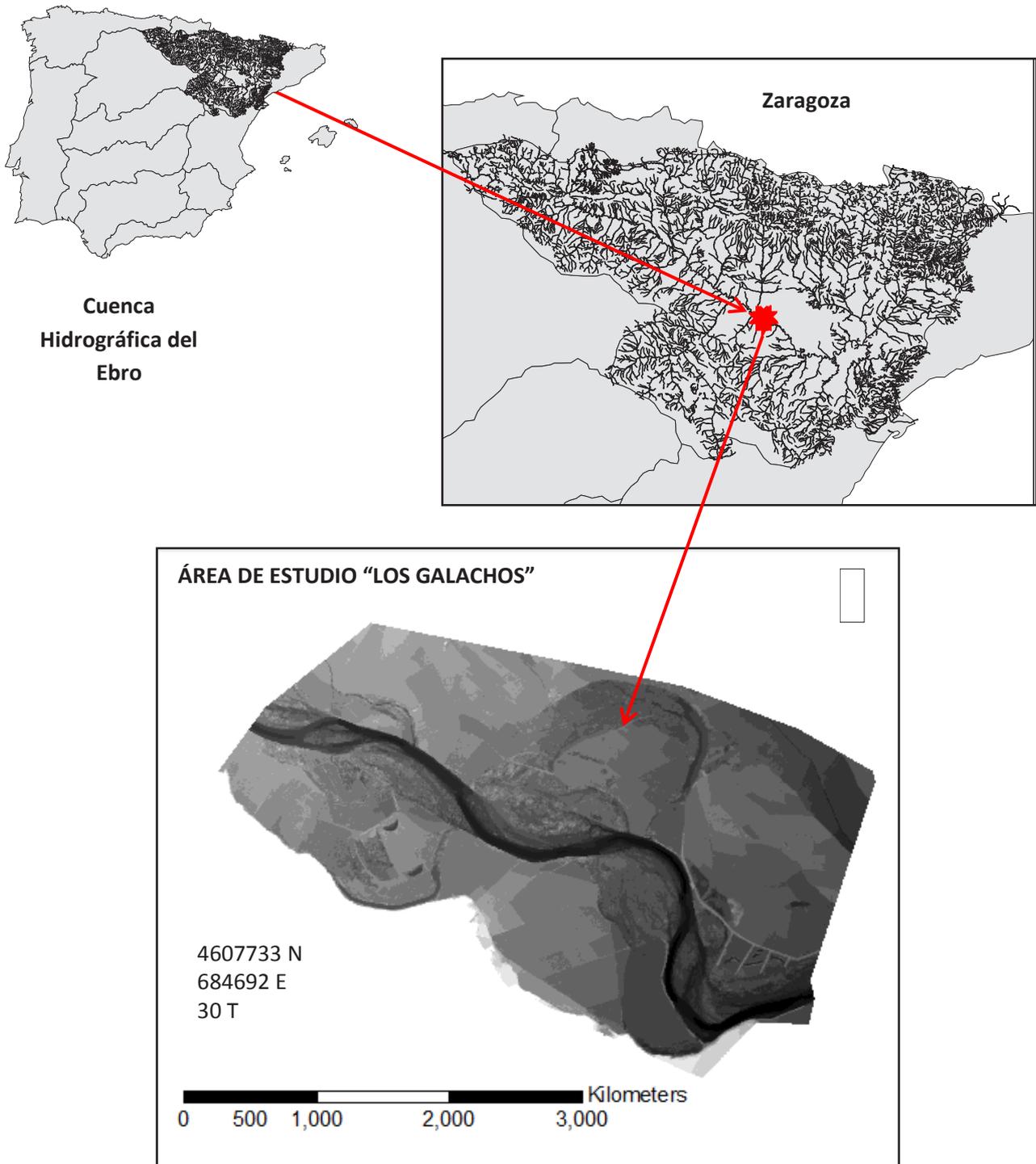


Figura 1. Ubicación área de estudio

La zona estudiada del río está notablemente afectada por estructuras de protección (terraplenes), donde se ha visto limitada la actividad geomorfológica. En esa línea, Cabezas et al. (2008) indica que la fuerte estabilidad morfológica de la llanura inundable está conduciendo a un deterioro de la diversidad del paisaje. Estos y otros estudios han descubierto la necesidad de una estrategia de recuperación de la llanura inundable enfocada a la restauración de la dinámica hidromorfológica (González-Sanchis et al., 2012; González-Sanchis et al., 2014).

Sin embargo en algunos de los estudios, las estimaciones y las propuestas de restauración se han basado en estudios empíricos (Cabezas et al., 2008), que aunque necesarios, implican un elevado coste económico y humano y tienen poca capacidad de extrapolación. Por lo tanto, la simulación numérica puede ser un instrumento adecuado para una selección eficiente de la mejor alternativa de restauración ecológica (González-Sanchis, 2012).

Modelo Hidráulico

Los modelos de régimen variable bidimensionales tienen su principal campo de aplicación en los casos en que la capacidad de laminación representa un factor importante. Se pueden resolver casos como las avenidas que discurren por grandes llanuras de inundación, el estudio de la evolución de avenidas que superan las motas de protección, y otros estudios tales como el funcionamiento de deltas o humedales de poca profundidad.

Desde el punto de vista matemático, las ecuaciones que gobiernan el flujo de superficie libre forman un sistema de ecuaciones no lineales en derivadas parciales de tipo hiperbólico. Son las ecuaciones 2D de Saint Venant o de aguas poco profundas, que resulta el modelo más adecuado para el análisis hidráulico de nuestro caso de estudio (Vreugdenhil, 1994; Wu, 2007):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + g \frac{h^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

donde h representa la profundidad del agua, hu y hv son los caudales unitarios a lo largo de las direcciones coordenadas x , y respectivamente, S_{0x} , S_{0y} reflejan las variaciones del fondo del cauce en forma de pendiente:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y}$$

y S_{fx} , S_{fy} constituyen los términos de fricción del agua con el fondo del cauce (pendiente motriz) en cada una de las direcciones coordenadas:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

En el presente trabajo el sistema de ecuaciones se resolvió a partir del software de cálculo GUAD - 2D, prediciendo con exactitud los detalles de la inundación. El procedimiento de resolución del GUAD - 2D se basa en el método de volúmenes finitos (Murillo et al., 2007) porque tratan de combinar lo mejor de los métodos de elementos finitos, su flexibilidad geométrica, con lo mejor de los métodos en diferencias finitas, su flexibilidad en la definición del flujo discreto (valores discretos de las variables dependientes y sus flujos asociados).

Topografía

El modelo digital del terreno (MDT) utilizado en este trabajo fue facilitado por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Dicho modelo fue obtenido a partir de Laser Induced Direction and Ranging (LIDAR), por medio de un único impulso sensor captura, con 0,15 metros de precisión vertical y 1 m resolución horizontal. El escáner a partir de los sensores LIDAR genera una alta calidad de los datos topográficos, proporcionando una buena información sobre el terreno para integrar de forma bidimensional modelos hidráulicos numéricos (Marks & Bates, 2000).

Sin embargo, las redes triangulares son la mejor representación discreta para representar la información sobre el terreno (Uchida et al., 2002). Por eso, se discretizó el MDT en una red triangular estructurada. Las celdas triangulares computacionales se crearon a partir de un tamaño de celda de 10 m. Como resultado se obtuvo una red malla triangular con 174.923 celdas.

Coefficientes de Manning

La rugosidad de la llanura de inundación fue caracterizada in situ (González-Sanchis et al., 2012), dividiéndola en grupos de hábitats de estructura homogénea. Para tal fin se utilizó un GPS diferencial Topcon ® (0,03 m de precisión). Para determinar el valor del coeficiente de Manning, a cada hábitat se le asignó un valor según las recomendaciones encontradas en la bibliografía especializada (figura 2 y tabla 1).

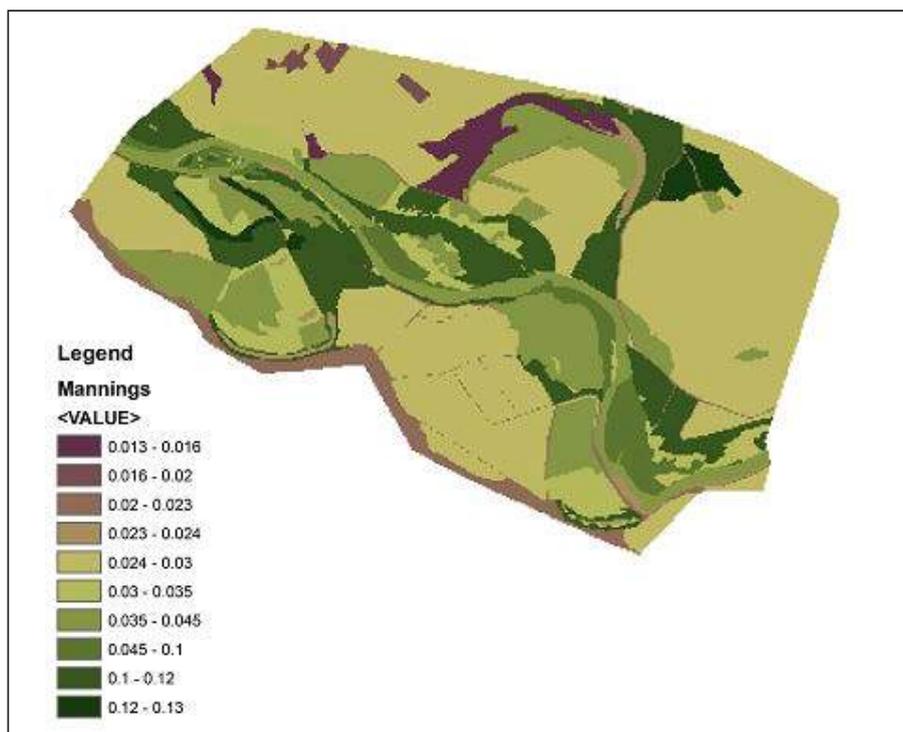


Figura 2. Coeficientes de Manning

Tabla 1. Coeficientes de Manning

Tipo	Valor Manning	Referencia
Cauce Principal	0,035	Acrement & Schenides, 1990
Urbano	0,05	Sande van Der et al., 2003
Cultivos	0,035	Palmeri et al. , 2002
Zona inundada	0,024	Palmeri et al. , 2002
Bosque de Pino	0,124	Poole et al., 2004
Camino de tierra	0,027	Chow, 1959
Pastizal	0,033	Palmeri et al. , 2002
Chopera, alameda	0,05	Martin Vide, 2002
Gravas	0,028	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o sauces 5-10 años en suelo con gravas	0,1	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o predomina sauces 10-15 años en suelo arenoso	0,04	Acrement & Schenides, 1990
Álamos o predomina sauces < 2 m de altura y < 5 cm de diámetro a la base	0,13	Poole et al., 2004
Cañaveral	0,13	Rhee et al., 2008
Pastizal alto con sauces dispersos 1- 5 años	0,124	Acrement & Schenides, 1990
Bosque maduro y arbustos zarzamora	0,12	Poole et al., 2004
Cauce secundario antiguo	0,13	Poole et al., 2004
Álamos dispersos y Tamarix 15 - 20 años en suelo con gravas	0,036	Bedient & Huber, 1988
Escarpe	0,023	Chow, 1959

Condiciones de contorno

Se definieron las siguientes condiciones de contorno (figura 3):

- Entrada: (A) Caudal en función del tiempo: Q (t).
- Salida: (B), (C) y (D) Salida crítica: en los tres casos anteriores se simuló una descarga libre debido a que la serie de caudales de carácter extraordinario inundaba casi por completo toda nuestra área de estudio. Los resultados demostraron que las secciones donde se puso

altura crítica como condición de borde no influyen en el área de estudio restaurada.

- (E) Caudal en función del calado: Q (h). La curva de aforo para determinar Q (h) se obtuvo de forma experimental tomando la cota para diferentes caudales a la salida del dominio mediante un GPS diferencial. Debido a la representación "digital" del terreno, la curva de aforo se ajustó, utilizando para ello información del trabajo de campo (cota y área inundada) (figura 4):

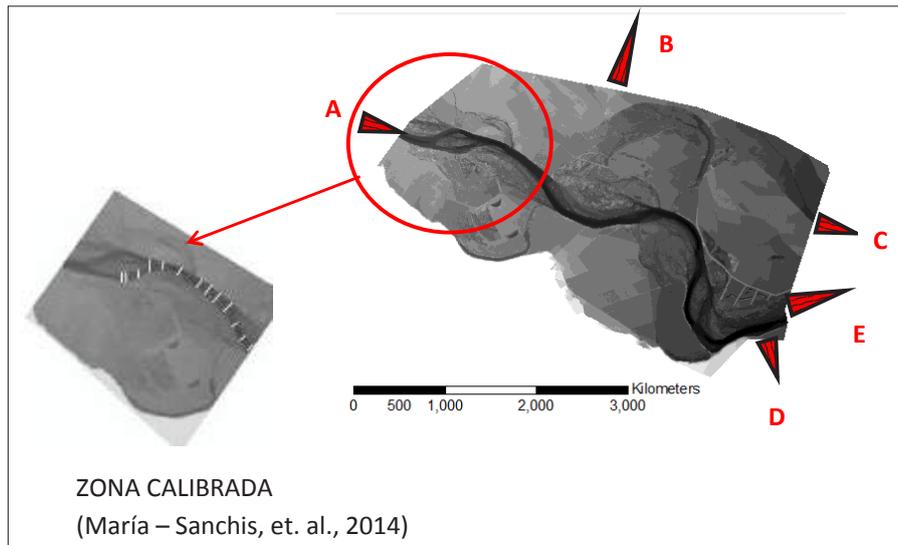


Figura 3. Condiciones de contorno y zona calibrada

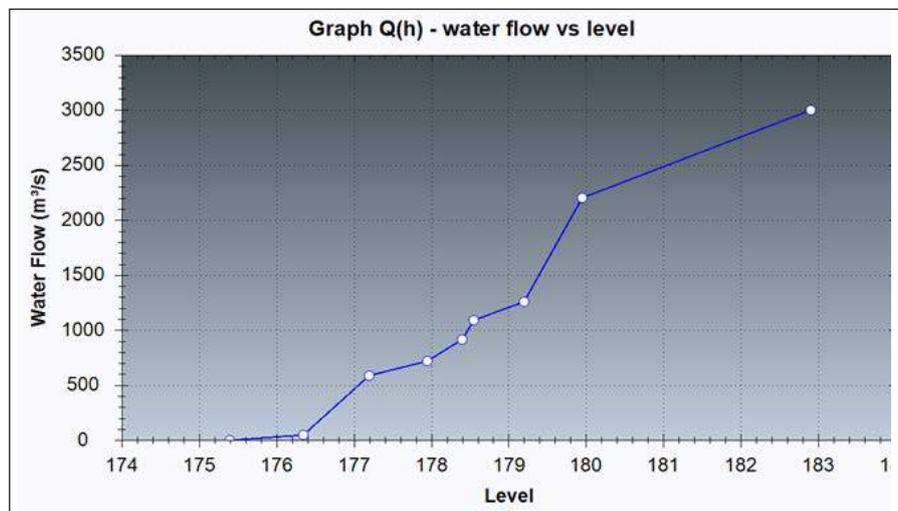


Figura 4. Curva de aforo utilizada como condición de contorno a la salida del cauce

Validación del modelo

El modelo no estaba calibrado para todo el dominio pero sí para parte del mismo (González-Sanchis, et. al., 2012). Se midió en terreno con un GPS diferencial Topcon® (0,03 m de precisión) la extensión del área inundada durante el pico de la inundación de diversos eventos de riada. Posteriormente se realizó

la comparación entre el área inundada calculada y el área inundada medida a partir de la siguiente expresión (Bates & De Roo, 2000):

$$Fit_A(\%) = 100 \frac{(A_o \cap A_c)}{(A_o + A_c) - (A_o \cap A_c)}$$

Donde A_o es el área inundada medida, A_c el área inundada calculada y $A_o \cap A_c$ el área de intersección entre el área calculada y el área medida. Esta calibración ofreció un ajuste medio del área inundada de $79 \pm 13\%$.

Una segunda etapa consistió en el estudio del nivel (calado) de agua. Esta etapa se basó en la comparación de los resultados a partir del área inundada calculada y mediciones puntuales en terreno del nivel de agua. Para las mediciones en terreno se utilizaron sensores de nivel y temperatura Diver ® (0,5 cm de precisión). Finalmente, para estimar la relación entre el nivel de agua medido

y el nivel de agua calculado se utilizó la siguiente expresión:

$$Fit_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |(N_c - N_o)_i|$$

Donde N_o es el nivel de agua medido, N_c el nivel de agua calculado. Esta calibración ofreció un ajuste medio del nivel medido de $0.27 \pm 0.05m$. Debido al buen ajuste del modelo, se asumió que se podía ampliar el dominio (área de estudio) para cumplir el objetivo del presente trabajo (figura 3).

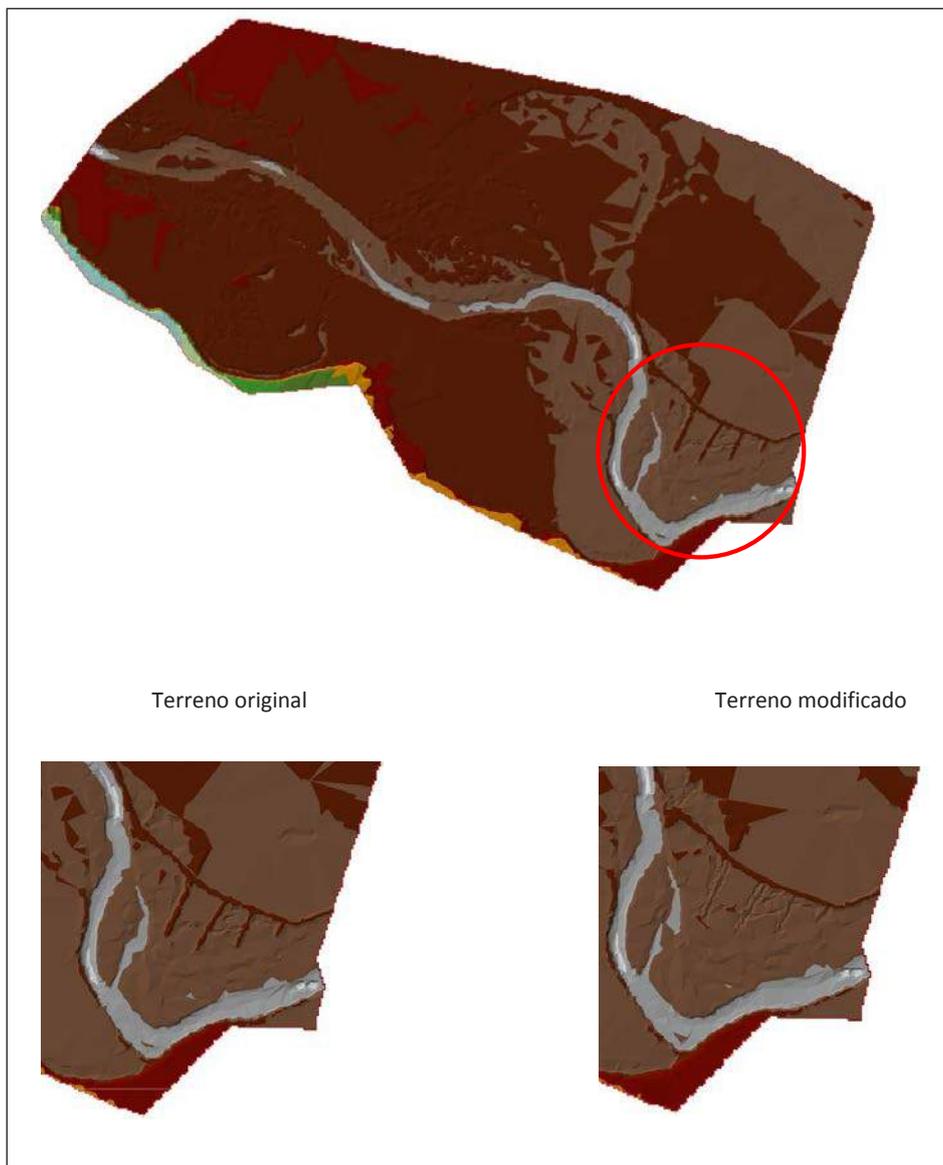


Figura 5. Zona restaurada

Caudales

A partir del análisis hidrológico entre los años 1927 - 2010 realizado por González-Sanchis (2012), se definieron los caudales a utilizar en la simulación. Los caudales 500, 1.000, 1.500, 2.000 y 2.500 m^3/s son caudales ordinarios (tal como se puede observar

a través de los periodos de retorno, son < 10 años) y por lo tanto, se considera que son los que van a generar, teóricamente la mayor parte de la dinámica morfológica del área de estudio. Si estos caudales de mayor probabilidad, no son capaces de dinamizar

morfológicamente el área del presente estudio, significa que el sistema está demasiado estático. El caudal de 3.000 m³/s es de carácter extraordinario (> 10 años). Este caudal debería producir un mayor cambio morfológico, comparado con los anteriores (tabla 2):

Tabla 2. Caudales y sus periodos de retorno

Caudales Q (m ³ /s)	Periodos de retorno T (años)
500	0,09
1.000	0,29
1.500	0,74
2.000	2,25
2.500	5,93
3.000	18,69

Esfuerzo cortante crítico o “shear stress”

Para poder representar la actividad geomorfológica en la llanura inundable es necesario definir un término que estime el flujo potencialmente erosivo. Este término debe expresar la capacidad erosiva del flujo, con la finalidad de representar el estado presente del sistema y sus posibilidades de restauración. La capacidad de erosión puede estimarse a partir del parámetro de Shields (Wu, 2007) o *shear stress* (esfuerzo crítico cortante):

$$\theta = \frac{|\tau_b|}{g(\rho_s - \rho_w)d_m}$$

Donde ρ_s y ρ_w son la densidad del material sólido y la densidad del agua, el diámetro medio de las partículas (en mm). Por otro lado el valor de θ_c , solamente se puede determinar a partir de las características del fluido y sedimentos (Cao et. al, 2006) por medio del número de Reynolds de la partícula:

$$R = \frac{\sqrt{d_m^3(s-1)g}}{\gamma}$$

Donde γ es la viscosidad cinemática.

Para poder evaluar si se produce o no erosión, se utiliza el siguiente parámetro:

$$r_\theta = \frac{\theta}{\theta_c}$$

Cuando $r_\theta > 1$, entonces si se produce erosión.

Sin embargo, el valor de shear stress también puede estimarse a partir del siguiente desarrollo matemático (García – Arias et al., 2011):

La velocidad de corte en el lecho u^* se define como:

$$u^* = (gR_H S_f)^{1/2}$$

Donde R_H es el radio hidráulico, g la gravedad y S_f la pendiente motriz. Además,

$$v = C (R_H S_f)^{1/2}$$

donde v es la velocidad de flujo y C el coeficiente de rugosidad de Chézy. Combinamos ambas expresiones tenemos que:

$$vg^{1/2} = Cu^*$$

Por otro lado, es bien conocida la relación entre el coeficiente de rugosidad de Manning y Chézy:

$$C = 1,49n^{-1}R_H^{1/6}$$

Considerando que para flujos someros el radio hidráulico puede aproximarse al calado $R_H \approx h$, tenemos que la velocidad de corte en el flujo se puede definir también como:

$$u^* = 2,102vnh^{-1/6}$$

Finalmente se obtiene el valor de shear stress:

$$\tau = \rho u^{*2} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Siendo ρ la densidad del agua¹

Debido a la sencillez de la expresión, en este trabajo se optó por utilizarla y deducir las tensiones de corte a partir de los calados y velocidades obtenidas de las simulaciones hidráulicas. A partir del trabajo realizado por Francés (2011), se consideró 100 N/m² como el límite a partir del cual puede generarse erosión en ambientes ribereños característicos de las llanuras de inundación. Por ello, se estableció este valor para determinar si se produce o no erosión y por lo tanto si se genera o no actividad geomorfológica en la llanura de inundación.

1 El río Ebro suele llevar unos 30 mg/l de sólidos en suspensión y en riadas 300 – 400 mg/l. En el presente trabajo se parte como hipótesis que las concentraciones de sólidos habituales son lo suficientemente bajas como para que no sea necesario tener en cuenta un cambio de densidad del agua.

Estrategias de Restauración

Tal como se ha comentado anteriormente, la actividad geomorfológica del área de estudio ha disminuido como consecuencia de la construcción de estructuras de protección (terraplenes) a lo largo del cauce. Una opción de restauración ecológica consiste en la eliminación de algunas de éstas estructuras. Por ello, a partir del programa Arc Map 9.3 se seleccionaron cinco estructuras de protección (terraplenes) en el MDT cuya altura se redujo 2 metros. De esta manera se disminuyó su altura y por lo tanto su capacidad de protección generando una mayor conectividad hidrológica entre las zonas de tierra y el cauce. Con estas actuaciones puede esperarse una mayor actividad geomorfológica en la zona.

Una segunda opción de restauración ecológica consistió en incrementar el caudal circulante (gestión de caudales), de forma que fuese capaz de generar un cambio geomorfológico. Para ello se seleccionó el caudal de 3.000 m³/s, que correspondía a un periodo de retorno de 18,7 años (de carácter extraordinario).

Escenarios

Se estudió el comportamiento de la dinámica fluvial de la llanura de inundación y su actividad geomorfológica bajo cuatro escenarios mediante GUAD 2D:

1. Con el terreno original y caudales ordinarios (500 m³/s, 1.000 m³/s, 1.500 m³/s, 2.000 m³/s y 2.500 m³/s).
2. Con la eliminación de cinco motas y caudales ordinarios (500 m³/s, 1.000 m³/s, 1.500 m³/s, 2.000 m³/s y 2.500 m³/s).
3. Con el terreno original y un caudal extraordinario de 3.000 m³/s.
4. Con la eliminación de cinco motas y un caudal extraordinario de 3.000 m³/s.

Respecto a la actividad geomorfológica, a partir de los resultados generados en el GUAD – 2D (velocidad y profundidad) junto con la rugosidad (Manning) se obtuvo el shear stress. De esta manera se pudo estudiar el flujo potencialmente erosivo formado. Para cada simulación generada, se partió de la simulación anterior para crear las condiciones iniciales. Es decir, para la simulación en el terreno original y un caudal de 1.500 m³/s se definieron las condiciones iniciales el resultado generado para un caudal de 1.000 m³/s. Las simulaciones acabaron una vez que se alcanzó el régimen estacionario en todo el dominio ($Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$). En algunos casos, GUAD – 2D se demoró casi 8 horas para simular 30 horas del evento real para alcanzar el estacionario.

RESULTADOS

1) Con el terreno original y caudales ordinarios:

Tal como se puede observar en la tabla 3, a medida que aumentaron los caudales, se incrementó el área inundada llegando incluso a un porcentaje del área total inundada de 83%. Por tanto, con caudales ordinarios se generó suficiente conectividad en todo el área de estudio. Sin embargo, los caudales ordinarios fueron incapaces de incrementar potencialmente la capacidad erosiva del flujo (shear stress > 100 N/m²). Un caudal de 2.500 m³/s solamente generó un 0,03% de área potencialmente erosionada. Así pues, en este caso los caudales ordinarios no dinamizaron la geomorfología de la llanura de inundación.

Tabla 3. Resultados escenario 1

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m ²	%	m ²	%
500	1.048.012	10,13	0	0,00
1.000	3.162.000	30,57	392	0,00
1.500	6.281.600	60,73	392	0,00
2.000	7.870.700	76,10	1.372	0,01
2.500	8.566.900	82,83	3.528	0,03

2) Con la eliminación de cinco motas y caudales ordinarios:

En este caso (ver tabla 4), los valores fueron muy similares a los anteriores tanto para el área inundada como para el área erosionada. Solamente en el caso de 1.000 m³/s donde el área inundada fue alrededor de un 5% mayor debido a la actuación realizada sobre las 5 motas. Por otra parte los valores máximos del shear stress fueron prácticamente iguales que en el primer escenario. La actuación realizada en las motas no generó cambios significativos ni en la conectividad del sistema ni en la geomorfología de la llanura (figura 6).

Tabla 4. Resultados escenario 2

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m ²	%	m ²	%
500	1.095.400	10,59	0	0,00
1.000	3.763.900	36,39	0	0,00
1.500	6.389.000	61,77	392	0,00
2.000	7.834.400	75,74	1.176	0,01
2.500	8.542.200	82,59	3.136	0,03

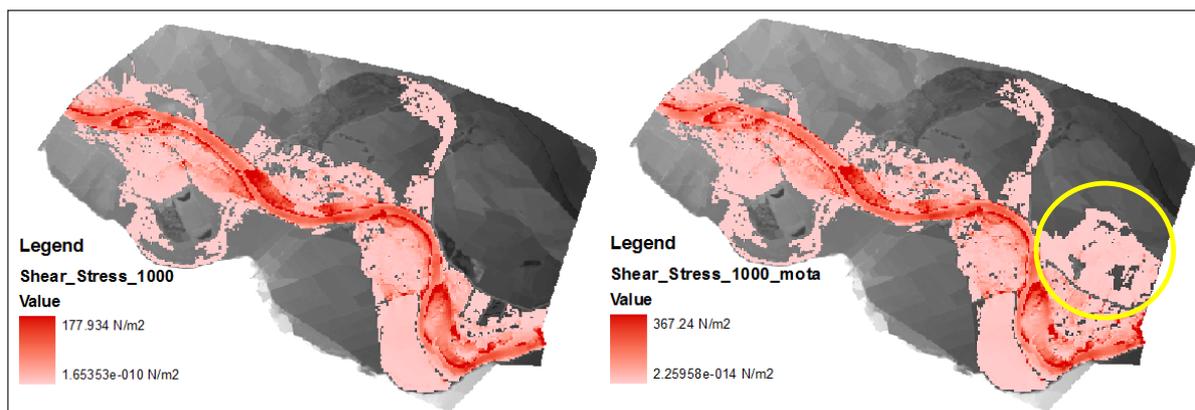


Figura 6. Comparación de los valores *shear stress* y área de inundación con terreno original y modificado para un caudal de 1.000 m³/s

Sin embargo, en la zona de actuación se puede observar que aunque no se ha alcanzado el valor crítico del *shear stress* (> 100 N/m²), sí que

aumentaron esos valores respecto al escenario con el terreno original (figura 7).

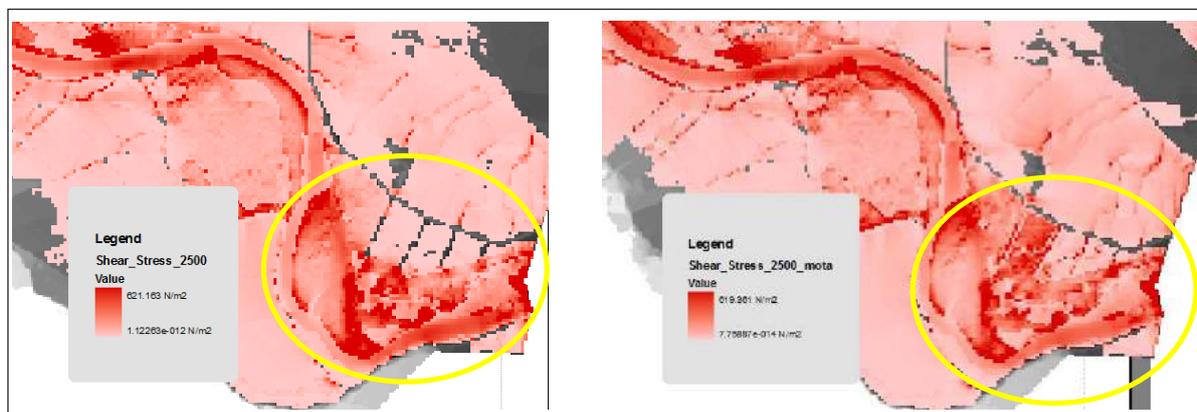


Figura 7. Comparación *shear stress* con terreno original y modificado para un caudal de 2.500 m³/s

3) Con el terreno original y la incorporación de un caudal extraordinario (3.000 m³/s):

En este caso, aumentó ligeramente el área total inundada (tabla 5). Sin embargo, el aumento del área total erosionada resultó casi inapreciable. El caudal extraordinario de 3.000 m³/s no generó cambios en la geomorfología de la llanura de inundación.

Tabla 5. Resultados escenario 3

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m ²	%	m ²	%
3.000	8.924.200	86,28	6.272	0,06

4) Con la eliminación de cinco motas y la incorporación de un caudal extraordinario (3.000 m³/s):

La situación fue prácticamente igual al caso anterior. La acción combinada de un caudal extraordinario (3.000 m³/s) junto con la actuación de disminuir la

altura (2 m) de las cinco defensas no generó cambio alguno en la actividad geomorfológica del área de estudio (tabla 6). El valor máximo alcanzado para el *shear stress* fue prácticamente igual al escenario 3 (aportación del caudal extraordinario de 3.000 m³/s). Pero al igual que en el escenario 2, se observó un aumento de los valores de *shear stress* en la zona de actuación.

Tabla 6. Resultados escenario 4

Q	Área inundada		Área erosionada	
	m ²	%	m ²	%
3.000	8.898.400	86,03	6.076	0.06

DISCUSIÓN

Analizando los resultados anteriores, se observó que con caudales ordinarios se inundó la mayor parte de nuestro dominio. Sin embargo no se generó un cambio geomorfológico significativo (valores de *shear*

stress superiores a 100 N/m^2). A pesar del efecto de un caudal de carácter extraordinario ($3.000 \text{ m}^3/\text{s}$) y la eliminación de altura de las defensas en el río, no se generó un cambio geomorfológico significativo.

Los resultados (porcentaje de área erosionada) coincidieron con los obtenidos en el trabajo de González – Sanchis et al., (2012) en el tramo situado aguas arriba del área de actuación. En dicho estudio se estimó la capacidad de cambio geomorfológico a partir del parámetro de Shields (Wu, 2007). En cambio, en el presente trabajo se utilizó otra expresión que define el valor de 100 N/m^2 como límite de capacidad erosiva. La similitud de los resultados (tabla 7) confirmó que el valor de 100 N/m^2 era adecuado para nuestra área de estudio.

Tabla 7. Resultados estudio González – Sanchis et al., 2012

Q	Flooded area		Eroded area	
	(m^2)	%	(m^2)	%
Escenario 1				
4.000	2.494.575	99	35.425,1	1.4
5.000	2.494.575	99	41.673,2	1.7
Escenario 2				
1.180	934.843	37	4.082	0.16
2.250	2.499.535	99	6.839	0.3
3.000	2.499.940	99	21.198	0.84

Por otro lado, solamente se percibió un aumento de los valores del shear stress (no superiores a 100 N/m^2) en la zona restaurada, capaz de generar cambios morfológicos a más largo plazo. Pero a pesar de ello, las actuaciones propuestas no fueron capaces de permitir que el flujo potencialmente erosivo adentrarse a las zonas adyacentes del cauce y permitiese el intercambio de materia y energía.

Con estos resultados, se confirma que aunque el actual régimen de flujo puede ser lo suficientemente alto para mantener el bosque ribereño (González et al., 2010), su potencial erosivo es muy limitado y por lo tanto, la capacidad erosiva esperada no es significativa bajo el actual régimen de flujo y topografía. Por ello, se debería evaluar la alternativa más agresiva que consiste en la restauración de los antiguos canales de agua superficiales (los denominados galachos). Ya que las alternativas basadas en el manejo de caudal y modificación de las estructuras de defensas no generó cambio geomorfológico alguno (González - Sanchis, 2012; Buijse et al., 2002).

CONCLUSIONES

A continuación se resumen las conclusiones de los resultados obtenidos:

1. Se han propuesto, simulado y analizado cuatro escenarios de restauración con el objetivo de incrementar la inundación y el morfodinamismo de la llanura de inundación a partir de un modelo de simulación numérica 2D. Estas actuaciones se han basado en el manejo del caudal y/o de la modificación del terreno.
2. Respecto a la dinámica de flujo, la mayor parte del área de estudio es inundada con caudales ordinarios (periodos de retorno menores de 10 años).
3. A pesar de ello, las actuaciones llevadas a cabo (manejo del caudal y modificación del terreno) no han demostrado ser efectivos en la inducción de cambios geomorfológicos importantes en la llanura de inundación. La falta de actividad geomorfológica está más influenciada por las defensas del río y el uso del territorio que por el régimen de caudales del Ebro.

Finalmente, ha quedado de manifiesto la potencialidad de la simulación numérica como herramienta para predecir la dinámica de inundación y morfológica de las llanuras de inundación, y que permite evaluar distintas estrategias de restauración ecológica basadas en el manejo de caudal y modificación del terreno.

REFERENCIAS

- Acrement G.C. & V.R Schenides, (1990). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Water-Supply Paper No. 2339 (Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, VA).
- Batalla, R. J.; Gómez, C. M. & G. M. Kondolf, (2004). *Reservoir induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)*. Journal of Hydrology, 290: 117–136.
- Bates, P. D. & A. P. J. De Roo, (2000). *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. J. Hydrol. (Amsterdam), 236(1–2), 54–77.
- Bates, P. D.; Horritt, M. S. & J. M. Hervouet, (1998). *Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography*. Hydrological Processes, 12(8), 1257–1277.
- Bayley, P.B., (1995). *Understanding large river-floodplain ecosystems*. Bio- Science, 45:153–158.
- Bedient P.B. & W.C. Huber, (1988). *Hydrology and floodplain analysis*. Addison-Wesley, Reading, Mass. (USA).

- Beffa, C., & R. J. Connell, (2001). *Two-dimensional flood plain flow. I: Model description*. J. Hydrol. Eng., 6(5), 397–402.
- Buijse A.D.; Coops, H; M. Staras, M.; Jans, L.H.; Vangeest, G.J.; Griff, R.E.; Ibelings, B.W.; Oosterberg, W & F.J.M. Roozen, (2002). *Restoration strategies for river floodplains along large lowland rivers in Europe*. Freshwater Biology 47(4): 889-907.
- Cabezas, A.; García, M.; Gallardo, B.; González, E.; González, M & F.A. Comín, (2009). *The effect of anthropogenic disturbance on the hydrochemical characteristics of riparian wetlands at the Middle Ebro River (NE Spain)*. Hydrobiologia, 617:101–116.
- Cabezas, A.; González, E.; Gallardo, B.; García, M.; González – Sanchis, M.; Jiménez, J.J. & F.A. Comín, (2008). *Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for restoration and management*. Aquatic Sciences, 70: 361 – 376.
- Cao, G.; Pender, Z. & J. Meng, (2006). *Explicit formulation of the shields diagram for incipient motion of sediment*. J. Hydraul. Eng., 132(10), 1907 – 1099.
- CHE, (2013). *Descripción de la Cuenca Confederación Hidrográfica del Ebro*. [En Línea]. Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2001&idMenu=2004> [Accesado el día 2 de enero de 2013].
- Chow, V.T., (1959). *Open-Channel Hydraulics*.
- Cobby, D. M.; Mason, D. C.; Horritt, M. S. & P.D. Bates, (2003). *Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry*. Hydrological. Processes 17(10), 1979–2000.
- Francés, F., (2011). “Dynamic modelling of riparian vegetation with RIPFLOW: integrating vegetation into water management” en *Seminario on Environmental Flows: Recent Developments and Applications at Basin Scale*, Valencia 5 – 6 de Septiembre 2011.
- Frutos, L. M.; A. Ollero, A. & M. Sánchez Fabre, (2004). “Characterization of the Ebro river and its catchment and its hydrological fluctuations”. In Gil Oncina, A. (ed.), *Alteración de los regímenes fluviales peninsulares*. Fundación Caja Murcia, Alicante: 223–280 (in Spanish).
- García – Arias, A.; Francés, F.; Andrés - Doménech, I.; Vallés, f.; V. Garófano – Gómez, V & F. Martínez – Capel, (2011). “Modelización dinámica de la vegetación de ribera. Calibración del Modelo RIPFLOW y su aplicación en escenarios de regulación de caudales” en *II Jornadas de Ingeniería del Agua*, Barcelona 5 - 6 de octubre 2011.
- González, E.; M. González–Sanchis, M.; Comín, F.A. & E. Muller, (2010). *Hydrologic thresholds for riparian forest conservation in a regulated large Mediterranean river*. River Research and Applications, Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/rra.1436.
- González-Sanchis, M.; Murillo, J.; Cabezas, A.; Vermaat, J.E.; Comín, F & P. García-Navarro, (2014). *Modeling sediment deposition and phosphorus retention in a river floodplain*. Hydrological Processes. doi: 10.1002/hyp.10152.
- González - Sanchis, M., (2012). *Dinámica de flujo y retención de nutrientes en la llanura de inundación del tramo medio del Ebro: análisis experimental y simulación numérica*. PhD tesis. Instituto Pirenaico de Ecología y Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, Spain.
- González-Sanchis, M; Murillo, J.; Latorre, B.; Comín, F. & P. García-Navarro, (2012). *Transient Two-Dimensional Simulation of Real Flood Events in a Mediterranean Floodplain*. Journal of Hydraulic Engineering, 138, 7: 629-641.
- Hauer, F. R. & M. S. Lorang, (2004). *River regulation, decline of ecological resources, and potential for restoration in a semi-arid lands river in the western USA*. Aquatic Sciences, 66:388 -401.
- Heiler, G.; Hein, T.; Schiemer, F. & G. Bornette, (1995). *Hydrological connectivity and flood pulses as the central aspects for the integrity of a riverfloodplain system*. Regulated Rivers: Research and Management, 11: 351–361.
- Horritt, M.S., (2000). *Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery*. Water Resources Research 36:3279–3291.
- Ibáñez, C., N. Prat & A. Canicio, (1996). *Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary*. Regulated Rivers- Research and Management 12: 51–62.
- Junk, W. J.; Bayley, P. B. & R. E. Sparks, (1989). *The flood pulse concept in river-floodplain systems*. Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences. 106:110–127.
- Marks, K. & P. Bates, (2000). *Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models*. Hydrological Processes, 14: 2109–2122.
- Martin Vide, J. P., (2002). *Ingeniería de Ríos*. Ediciones UPC, Barcelona.
- Murillo, J.; García-Navarro, P. & J. Burguete, (2009). *Conservative numerical simulation of multi-component transport in two-dimensional unsteady shallow water flow*. J. Comput. Phys., 228(15), 5539–5573.
- Murillo, J.; García – Navarro, P.; Burguete, J. & P. Brufau, (2007). *The influence of source terms on stability, accuracy and conservation in two dimensional shallow flow simulation using triangular*

- finite volumes*. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 54:543–590.
- Olson, D.M. & E. Dinerstein, (1998). *The global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecosystems*. Conservation Biology 12: 502–515.
- Ollero, A., (2010). *Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain*. Geomorphology, 117 (3-4):247 – 260.
- Ollero, A., (2007). *Channel adjustments, floodplain changes and riparian ecosystems of the middle Ebro River: Assessment and management*. International Journal of Water Resources Development, 23: 73–90.
- Palmeri F., Silvín, F.; Prieto, I.; Balboni, M. & I. García-Mijangos, (2002). *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. Basque Government, Spain.
- Pinilla, V., (2006). *The development of irrigated agriculture in twentieth-century Spain: a case study of the Ebro basin*. Agricultural History Review, 54: 122–141.
- Poole, G. C.; Stanfor, J.A.; Running, S.W.; Frissell, C.A.; Woessner, W.W. & B.K. Ellis, (2004). *A patch hierarchy approach to modeling surface and subsurface hydrology in complex flood-plain environments*. Earth Surface Processes and Landforms, 10:1259–1274.
- Ravenga, C.; Brunner, J.; Henninger, N.; Kassem, K. & R. Payne, (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Freshwater Systems*. Washington DC, USA: World Resources Institute.
- Rhee, D.S.; Woo, H.; Kwon, B.A. & H.K. Ahn, (2008). *Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows*. River Research and Applications, 24:673–687.
- van Der Sande, C.J.; Jong, S.M. & A.P.J. Roo, (2003). *A segmentation and classification approach of ikonos-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4:217–229.
- Somes, N. L. G.; Bishop, W. A. & T. H. F. Wong, (1999). *Numerical simulation of wetland hydrodynamics*. Environ. Int., 25 (6–7), 773–779.
- Tockner, C & J.A. Stanford, (2002). *Riverine flood plains: present state and future trends*. Environmental Conservation 29 (3): 308–330.
- Uchida, T; Kawahara, Y. & Y. Ito, (2002). “Modeling of inundation flow in urbanized area using a high-resolution method with Cartesian mesh”. *Proc. Congress – IAHR Conf. 32, Vol 1, Int. Association for Hydraulic Research, Madrid*.
- Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; Lubchenco, J. & J.M. Melillo, (1997). *Human domination of earth's ecosystems*. Science 277: 494–499.
- Vreugdenhil, C. B., (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.
- Wu, W., (2007). *Computational river dynamics*, Taylor & Francis, London.

UN MODELO HIDRODINÁMICO 3D DEL HUMEDAL DEL RIO CRUCES: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA UTILIZANDO MOHID.

AN HYDRODYNAMIC MODEL OF RIO CRUCES WETLAND: CALCULATION OF RESIDENCE TIME USING MOHID.

Antonio Tironi-Silva^{1,2}, Víctor H. Marin², , Luisa E. Delgado^{1,2}

Resumen

En el presente trabajo presentamos un modelo hidrodinámico 3D del Humedal del Río Cruces en la Región de Los Ríos, Chile. Este humedal es uno de los más grandes de Chile, está protegido por la Convención Ramsar y soporta una diversidad biológica de importancia continental, sobretodo como sitio de nidificación del Cisne de Cuello Negro (*Cygnus melanocoryphus*). El modelo incluye 3 niveles anidados, con diferentes escalas geográficas y de definición de su grilla, logrando definiciones de la grilla de menos de 100 m. en su nivel más anidado. Sobre este sistema de modelos hidrodinámicos se implementó un módulo lagrangiano para calcular el tiempo de residencia del humedal. Nuestros resultados muestran un tiempo de residencia de 3 días para la zona baja del humedal y de 53 días para la zona alta. Nuestro trabajo muestra la utilidad de este tipo de modelos para conocer la dinámica de los componentes abióticos de este tipo de ecosistemas, la estructura de sus corrientes y la hidrodinámica en general de un sistema. El objetivo al presentar nuestro trabajo es incentivar el uso de este tipo de herramientas informáticas en la toma de decisiones de gestión ambiental de sistemas acuáticos, tanto en el ámbito público como privado, aportando a una visión integrada de este tipo ecosistemas.

Palabras claves: Modelo hidrodinámico - MOHID - Tiempo de residencia - Humedal – Convención de Ramsar

Abstract

Our work describes a 3D hydrodynamic model of the Río Cruces wetland, located in the Los Ríos region in southern Chile. The wetland, one of the biggest in Chile, is protected by the Ramsar Convention and supports a biodiversity of continental relevance, especially as nesting site of the Black-Necked swan (*Cygnus melanocoryphus*). The model has three nesting levels, each level at different geographic scales and grid definition, reaching a grid of less than 100 m. in the smaller model. Over this system of three hydrodynamic models, we implemented a lagrangian module to calculate the residence time of the wetland. Our results shows renewal times of 3 days for the southern part of the wetland and 53 days for the inner, northern area. This paper shows the utility of hydrodynamic models to understand the dynamics of the abiotic components of a coastal ecosystem, the 3D structure of currents and different timings of the tide, among other features of the hydrodynamics of a tidal ecosystem. We hope our work will promote the use of hydrodynamic models as decision-support tools both in public and private environmental management of aquatic ecosystems, supporting an integrative understanding of this kind of natural systems.

Keywords: Hydrodynamic models - MOHID - Residence time - wetland – Ramsar Convention

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos hidrodinámicos constituyen una importante herramienta para apoyar la gestión de ecosistemas acuáticos, tanto marinos como de agua dulce, al integrar la teoría con datos empíricos en un sistema informático que simula la dinámica de un cuerpo de agua en la naturaleza. Estos modelos permiten conocer el funcionamiento general del ecosistema, la dinámica y variabilidad de sus componentes (corrientes, mareas, sólidos en suspensión, etc.). Además, una vez implementados, calibrados y validados, los modelos hidrodinámicos

pueden ser utilizados para simular la respuesta de un ecosistema frente a diferentes opciones de manejo ambiental, el efecto de las perturbaciones (naturales o antrópicas), o el destino de contaminantes en un cuerpo de agua, entre otros usos (Henderson et al, 2001; Moreno Navas *et al.*, 2011). En un mundo cada vez más cambiante, y donde todo indica que el agua se convertirá en un recurso estratégico, herramientas como las que son presentadas en este trabajo pueden apoyar la tarea de los tomadores de decisiones.

¹ Fundación Centro Transdisciplinario de Estudios FES-Sistémicos. Padre Mariano 391, Oficina #704, Providencia, Santiago, Chile. Tel.: +56 (2) 26314141, Antonio Tironi Silva, tironi@gmail.com

² Laboratorio de Modelación Ecológica, Depto. de Ciencias Ecológicas, Fac. Ciencias, U. de Chile. Las Palmeras 3425, Ñuñoa, Santiago, Chile. Tel: +56 (2) 9787319

Un modelo hidrodinámico es una herramienta que permite la simulación virtual de los procesos que tienen lugar en ecosistema acuático, a partir de tres elementos fundamentales: (1) un modelo tridimensional de la geometría del fondo -la batimetría-, (2) ecuaciones de estado que permiten simular el comportamiento de un fluido en los límites físicos que impone la batimetría y (3) una señal de marea, para el caso de aquellos ecosistemas con influencia oceánica, o la descarga de agua dulce (los ríos), para el caso de ecosistemas continentales. Una vez implementada una simulación robusta de la hidrodinámica, se pueden agregar diversos módulos adicionales para simular otros procesos, como por ejemplo aquellos químicos (dispersión de nutrientes), biológicos (dispersión de coliformes fecales) y ecológicos (producción primaria), en función de los objetivos planteados por la investigación.

En general, el desarrollo de modelos tiene dos objetivos: Predecir y/o explicar (Oreskes, 1994). Un modelo con fines predictivos intenta responder preguntas como ¿qué altura de mareas tendremos mañana a la hora x en el punto y ? Estos modelos buscan simular eventos futuros con cierta certeza, para lo cual la validación del modelo consiste en contrastar los resultados con datos obtenidos en tareas de campo. Así, el éxito de este tipo de modelos depende de su capacidad para predecir el comportamiento del ecosistema. Dependiendo del componente simulado, se puede lograr una alta capacidad de predicción (p. ej.: > 85% en mareas).

El desarrollo de modelos exploratorios, por otra parte, busca conocer el comportamiento general del sistema en estudio. Este tipo de simulaciones intentan responder preguntas más generales, como la dirección neta del flujo de agua en un punto dado, la estructura vertical de la columna de agua, o la extensión de la "cuña" salina en un sistema estuarino. El éxito de este tipo de modelos se mide de varias formas, como por ejemplo por medio de la validación, que puede apoyarse en aspectos generales del ecosistema, en lo que se conoce como una validación "funcional". Incluso se puede considerar validado un modelo en función de los objetivos iniciales con que fue planteado. Adicionalmente, cuando se pretende simular aspectos más complejos del ecosistema, como su productividad primaria, o procesos a gran escala geográfica o temporal como el tiempo de residencia, la validación del modelo debe ser comprendida como un proceso iterativo que involucra más aspectos que la predicción de uno o dos variables de estado.

En este artículo se presenta un modelo hidrodinámico 3D anidado del Humedal del Río Cruces en la Región de Los Ríos, Chile. Este humedal es uno de los más grandes de Chile y se encuentra protegido por la Convención de Ramsar. Cuenta con una diversidad biológica de importancia continental, sobretodo como sitio de nidificación del Cisne de Cuello Negro, *Cygnus melancoryphus*, (Corti & Schlatter, 2002). El modelo incluye 3 niveles de anidación con diferentes

escalas geográficas, logrando definiciones de la grilla < 100 m. en la de mayor resolución. Para los objetivos de este trabajo, se implementó un módulo lagrangiano para calcular el tiempo de residencia del humedal, siguiendo la metodología propuesta por Braunschweig *et al.*, (2003).

El tiempo de residencia de las aguas de un ecosistema acuático es un indicador de la capacidad de renovación natural de un cuerpo de agua, y en términos de su gestión ambiental, una de las tres variables hidrológicas necesarias para caracterizar su hidrología (EPA, 2008). Además, es una medida de su capacidad de autodepuración de contaminantes, nutrientes, u otros elementos antrópicos. Así, el tiempo de residencia puede ser de utilidad para calcular los tiempos de exposición a un contaminante o la retención de nutrientes por parte de la biota de un ecosistema, la biomasa de plancton presente en un cuerpo de agua o su capacidad para ciclar una determinada carga de nutrientes, entre otros usos (Rand, 1995; Muñoz-Caravaca *et al.*, 2011; Josefson & Rasmussen, 2000).

El objetivo de este artículo es dar a conocer, entre la comunidad de gestores, investigadores y usuarios del agua en Latinoamérica, el sistema informático MOHID y su gran potencial como herramienta de gestión del agua, poniendo especial atención en el proceso de implementación del modelo. Se demuestra que con la infraestructura informática actualmente disponible -que ha reducido los costos y el tiempo requerido para implementar este tipo de herramientas en varios ordenes de magnitud-, este tipo de modelos podría apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del agua, en especial en las zonas costeras y adyacentes.

2. METODOLOGÍA

2.1 El sistema integrado de modelación de agua MOHID

MOHID¹ es un sistema informático para la generación de modelos numéricos de sistemas acuáticos desarrollado y mantenido por el Centro de Investigaciones Marina y Tecnología Ambiental (MARETEC), perteneciente al Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa, Portugal. MOHID adopta una filosofía integrada, desarrollada en código FORTRAN con una programación orientada a objetos, lo que permite la simulación modular de una serie de procesos (físicos, químicos y ecológicos) a diferentes escalas. El sistema permite la implementación de modelos anidados y la activación/desactivación de más de 50 módulos según las necesidades del usuario. MOHID además es un software de acceso libre y código abierto. Incorpora herramientas de análisis, como un sistema de información geográfica (MOHID GIS) y una herramienta de post-procesamiento de los resultados del modelo (MOHID Postprocessor).

1 www.mohid.com

Incluye tres herramientas básicas; MOHID Agua, MOHID Tierra y MOHID Suelo, todas enfocadas a simular la dinámica del agua en cuerpos de agua superficiales, subterráneos y el flujo sub-superficial, respectivamente. En este trabajo se muestra una aplicación del sistema MOHID Agua.

Este sistema permite la generación de modelos hidrodinámicos en tres dimensiones, para ser implementado en volúmenes finitos (Braunschweig *et al.*, 2004). El sistema resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, usando como supuesto el equilibrio hidrostático y utilizando la aproximación de Boussinesq y Reynolds. Para una descripción detallada de las ecuaciones de MOHID Agua, ver el artículo de Marin *et al.* (2013).

El modelo implementado para este artículo corresponde a un sistema de 3 niveles anidados. El primer modelo, denominado *Oceánico*, es de gran escala abarcando un área rectangular de 72.600 km², con su vértice inferior ubicado en los 75,5°W

y 41,5°S y una definición de celda de la grilla de 2,2 km. Este nivel tiene como función generar la onda de marea desde el Océano Pacífico hacia el estuario del Río Valdivia.

Anidado dentro de este modelo se encuentra otro modelo de menor tamaño, denominado *Estuario*, que cubre el área del estuario del Río Valdivia hasta la zona alta del humedal, con su vértice inferior en 73,5°W y 40°S, abarcando un área aproximada de 513 km², con una definición de celda de la grilla de 0,3 km (Fig. 1). Finalmente, el tercer nivel de anidamiento corresponde al modelo *Humedal*, desde la confluencia de los ríos Cruces y Calle-Calle por el Sur hasta el Fuerte San Luis del Alba por el Norte, abarcando todo el humedal e incorporando cuatro de sus afluentes, los ríos Cruces, Calle-Calle, Pichoy y Cayumapu (Fig. 1). Este nivel tiene su vértice inferior en 73,28°W y 39,83°S, un tamaño de celda de la grilla de 110 m. y abarca aproximadamente 465 km².

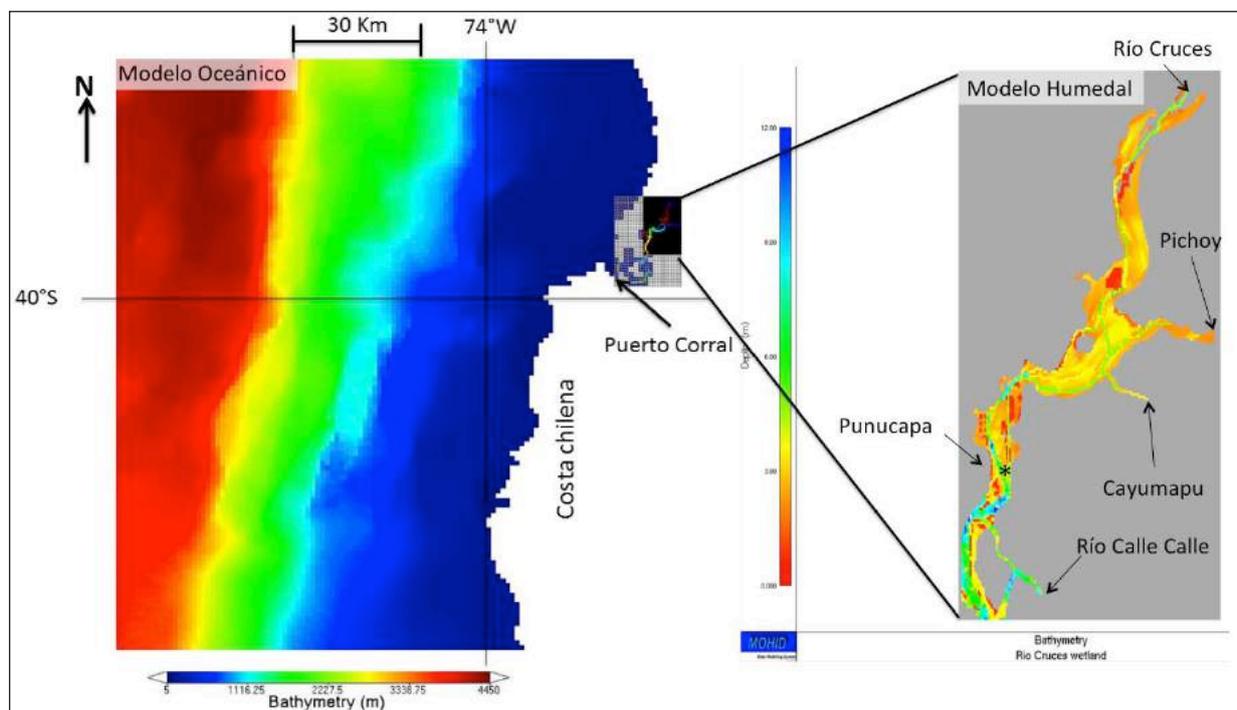


Figura 1. Modelo Hidrodinámico del Humedal del Río Cruces. Se muestran dos de los tres niveles de anidamiento del modelo, el superior (Modelo Oceánico) y el nivel de interés, sobre el cual se realizaron las simulaciones de tiempo de residencia.

2.2 Implementación del modelo: Batimetría, estructura vertical, condiciones iniciales y de borde.

Para implementar un modelo en MOHID, cada nivel de anidamiento requiere cuatro tipos de información: batimetría, una estructura vertical y condiciones iniciales y de borde. La batimetría describe el fondo del cuerpo de agua y consiste generalmente de listas de coordenadas (x, y) asociadas a una profundidad (z). A partir de esta información, MOHID GIS incorpora una herramienta para crear un terreno

digital en base a la triangulación espacial de los datos de profundidad disponibles. Cuando la información es muy dispersa, MOHID permite rellenar esas áreas con deficiencias de información con el promedio de los datos adyacentes en función de un radio definido por el usuario. Para el caso de este modelo, las grillas se generaron con información batimétrica del Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile (SHOA). La estructura vertical de los modelos y el tipo de coordenadas se muestra en la Tabla 1. MOHID permite la utilización de coordenadas sigma o

cartesianas. Experiencias previas de modelación muestran que las capas sigma otorgan una mayor estabilidad cuando son utilizadas en la zona alta de la columna de agua, donde el relieve del fondo genera

celdas triangulares, y coordenadas cartesianas en la zona mas profunda, donde el relieve es mas uniforme y las celdas tienen en su mayoría forma de cuadrado.

Tabla 1: Principales características de la grilla numérica de cada modelo hidrodinámico.

Modelo	Nivel de Anidamiento	Nº Dominio	Tipo de Coordenadas	Nº de Capas	Profundidad
Oceánico	1	1	Sigma	1	0 - 4500 m.
Estuario	2	1	Cartesianas	7	5 - 25 m.
		2	Sigma	5	0 - 5 m.
Humedal	3	1	Cartesianas	4	3 - 14 m.
		2		6	0 - 3 m.

Las condiciones iniciales de los modelos dependen de su escala espacial y los objetivos de la simulación, y cada nivel tiene diferentes requerimientos iniciales. Las condiciones iniciales de los tres niveles de anidamiento se describen a continuación.

Modelo Oceánico: Este nivel requiere la marea como condición de borde, la que es obtenida a partir de un modelo global (FES 2004; Lyard *et al.*, 2006). Las estaciones de muestreo para construir las condiciones de borde, es decir los lugares donde el modelo FES 2004 fue muestreado, se muestran en la Figura 1. El modelo *Oceánico* es barotrópico con una sola capa vertical (Tabla 1).

Modelo Estuario: Este modelo baroclínico obtiene la marea desde el modelo *Oceánico*. Los valores iniciales de salinidad y temperatura fueron de 30 PSU (agua de mar) y 10 °C respectivamente. Se incorporó la influencia de cuatro descargas de agua dulce de la zona cercana al humedal, los ríos Calle-Calle, Cruces, Pichoy y Cayumapu. Los caudales de estos ríos se muestran en la Tabla 2. La salinidad y temperatura de todos los ríos fue fijada en 0 PSU (agua dulce) y 15°C.

Tabla 2: Caudales de los ríos para el modelo *Estuario*

Río	Valor Inicial
Cruces	80 m/s
Calle-Calle	132 ms
Pichoy	81 ms
Cayumapu	46 m/s

Modelo Humedal: Este modelo, también baroclínico, obtiene la marea, salinidad y temperatura desde el modelo *Estuario*. Los ríos Calle-Calle, Cayumapu y Pichoy están inicializados según los valores promedios de caudal, temperatura y salinidad obtenidos en la campañas de terreno (Marín *et al.*, 2014). El Río Cruces tiene un caudal variable mensual obtenido de

las bases de datos de la Dirección General de Agua² del Ministerio de Obras Públicas del Estado de Chile.

2.3 Estrategia de modelación y calibración.

La inicialización de un modelo hidrodinámico anidado es un proceso delicado, sobretodo si se quiere evitar errores de inicio del modelo. Debe hacerse en varias etapas y con el tiempo de simulación suficiente para evitar la etapa más inestable de cualquier modelo hidrodinámico, su inicio. En el caso de este modelo, el primer paso fue inicializar el modelo *Oceánico* por dos meses, sólo, sin anidamiento. Luego fue activado el segundo nivel de anidamiento, el modelo *Estuario*, y este también fue inicializado por dos meses. Es decir, en este punto, el modelo *Oceánico* llevaba cuatro meses de simulación y *Estuario* dos. Luego fue activado el tercer nivel de anidamiento, el modelo *Humedal*, e inicializado por otros dos meses. Todas las inicializaciones se realizan con los módulos hidrodinámicos en modo barotrópico y sin descargas de agua dulce (ríos).

Con los tres modelos anidados inicializados, el siguiente paso es activar la baroclinicidad, o en otras palabras, la influencia de los gradientes de densidad (producto de las diferentes concentraciones de salinidad y temperatura) sobre las corrientes. Esta es otra etapa delicada en la inicialización de modelos hidrodinámicos, ya que grandes diferencias en estas dos propiedades -salinidad y temperatura-, como las observadas en un estuario, donde se encuentra el agua de mar con el agua dulce, pueden generar inestabilidades numéricas. Con esto en mente, la siguiente etapa fue correr el modelo con los tres niveles anidados durante tres meses para activar e inicializar el modo baroclínico del nivel *Estuario*. Así, al final de esta etapa, los diferentes niveles del sistema de modelos hidrodinámicos (*Oceánico*, *Estuario* y *Humedal*) llevaban 9, 7 y 5 meses de simulación, respectivamente. Finalmente, fue

² www.dga.cl

implementado el módulo lagrangiano en el modelo *Humedal* para estimar los tiempos de residencia mediante una simulación de 70 días de duración.

2.4 Cálculo del tiempo de residencia del humedal del Río Cruces.

Los experimentos numéricos de tiempo de residencia del humedal fueron implementados utilizando el módulo Lagrangiano de la plataforma MOHID, siguiendo la metodología propuesta por Braunschweig *et al.* (2003). Esta consiste en dividir la superficie del humedal en “cajas” (Figura 2), cuyo volumen total (V_t) es dividido en una cantidad (x) de partículas, calculadas a partir de la definición por parte del usuario del volumen (v_p) que tendrá cada partícula. El número de partículas se obtiene según la fórmula:

Así, cada caja de agua es subdividida en “partículas” de agua de volumen igual a V_p , y el destino de cada

partícula -que en la práctica es un volumen de agua previamente “marcado” informáticamente- luego es monitoreado en el tiempo. Entonces, una vez definidas las cajas a utilizar y el volumen de cada partícula, se implementó una simulación del modelo de 70 días para calcular el tiempo de residencia de cada caja. Esto se obtuvo gracias a que la plataforma MOHID permite monitorear el volumen de partículas que hay en cada caja para cada instante de tiempo. El tiempo de residencia luego es calculado a partir de la fracción del volumen de partículas que va quedando en cada “caja” respecto del volumen total inicial de cada caja, para cada salto de tiempo. Un punto sensible de la metodología es definir el punto de corte bajo el cual una caja se considerará “vacía”, ya que siempre hay una fracción de partículas que nunca abandona el modelo y no deben ser consideradas para el cálculo de tiempo de residencia. En este trabajo se definió ese corte como el primer momento en que cada serie de tiempo alcanzaba el mínimo valor de los 70 días simulados (Fig. 5, sección resultados)

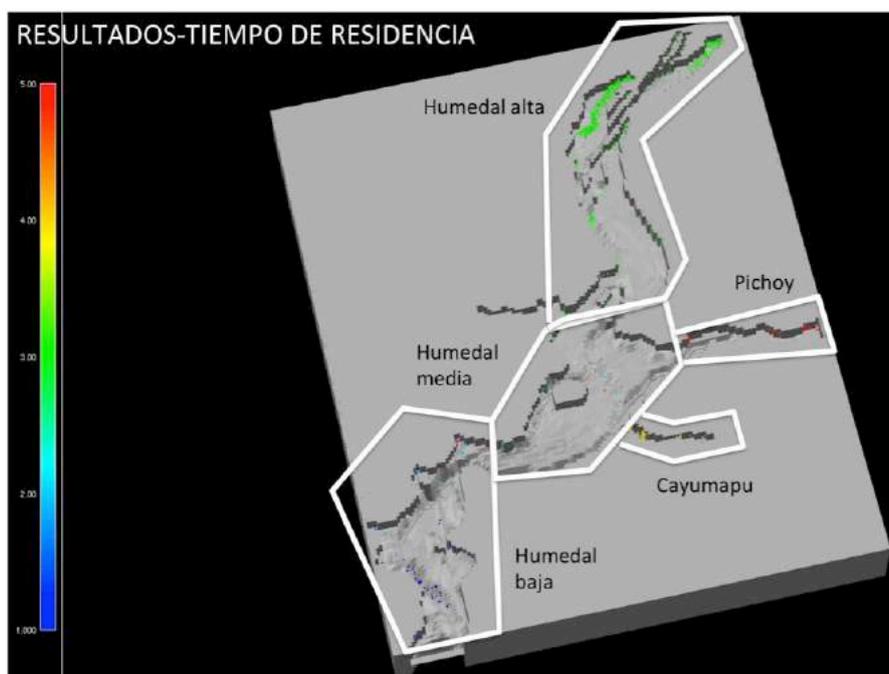


Figura 2. Definición de las secciones del humedal utilizadas para el cálculo del tiempo de residencia. Cada polígono en líneas blancas representa una “caja”.

Finalmente, para calcular el tiempo de residencia total de cada zona del humedal, se suman los tiempos de residencia de cada caja según la trayectoria “ideal” de una partícula para salir del modelo. Los resultados -y la sumatoria efectuada para cada cálculo- se muestran en la Tabla 3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN,

3.1 Calibración del modelo hidrodinámico.

La calibración de un modelo hidrodinámico consiste en modificar los parámetros del mismo de forma que las principales variables de estado (altura del

nivel del mar y velocidad de la corriente) se ajusten a las características del sistema modelado. Las variaciones en el nivel del mar se calibraron usando los datos disponibles de la estación mareográfica del Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile ubicado en Puerto Corral (Fig. 1). Para ello se obtuvieron datos de variaciones de la marea para el mes de Enero del 2004 y se compararon con los resultados entregados por el modelo para el mismo punto geográfico. Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir la marea en Puerto Corral de manera satisfactoria, obteniendo un coeficiente de determinación (r^2) de 0,94 (Fig. 3).

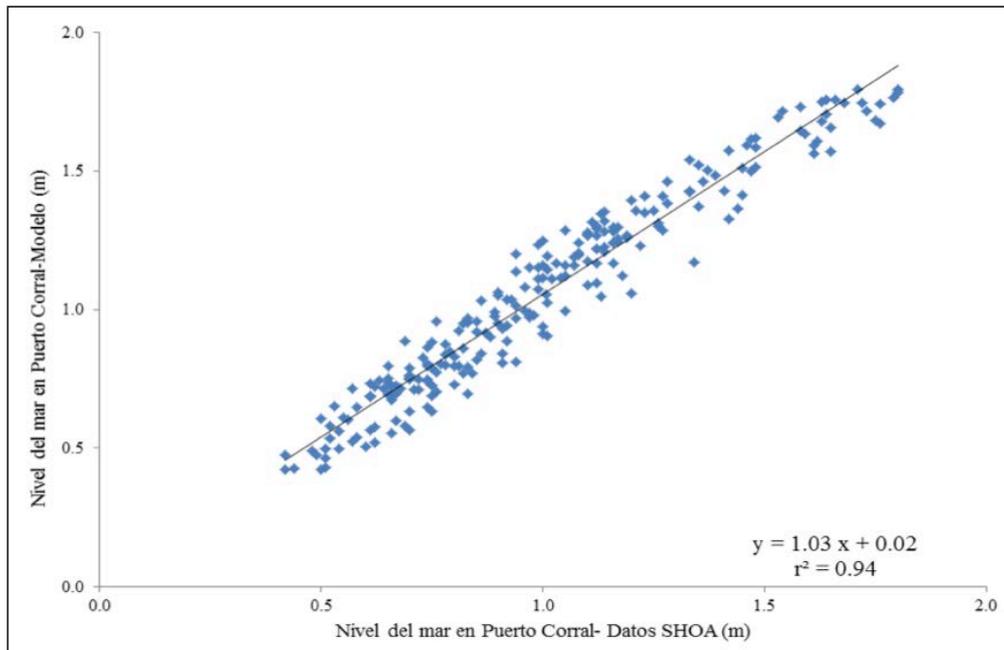


Figura 3. Comparación entre la altura del nivel del mar en Puerto Corral según la información de la estación mareográfica del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y el modelo hidrodinámico para el mes de Enero de 2004.

La calibración de la velocidad de la corriente en el Humedal se hizo en la zona donde el flujo se concentra, que corresponde a la localidad de Punucapa. El módulo de la velocidad se calibró ajustando un conjunto de parámetros hidrodinámicos logrando que el modelo lo replique de buena forma. Los parámetros modificados fueron aquellos de los cuales depende la viscosidad horizontal y vertical

(Módulo Turbulencia). El módulo Turbulencia fue implementado usando la aproximación de Smagorinsky (Marín *et al.*, 2013) en la que se incluye un parámetro adimensional (HORCON) el cual es usado para calibrar el módulo de la velocidad en el modelo. El modelo se consideró calibrado cuando el módulo de la velocidad para la localidad de Punucapa estuvo dentro del rango medido en terreno (Fig. 4).

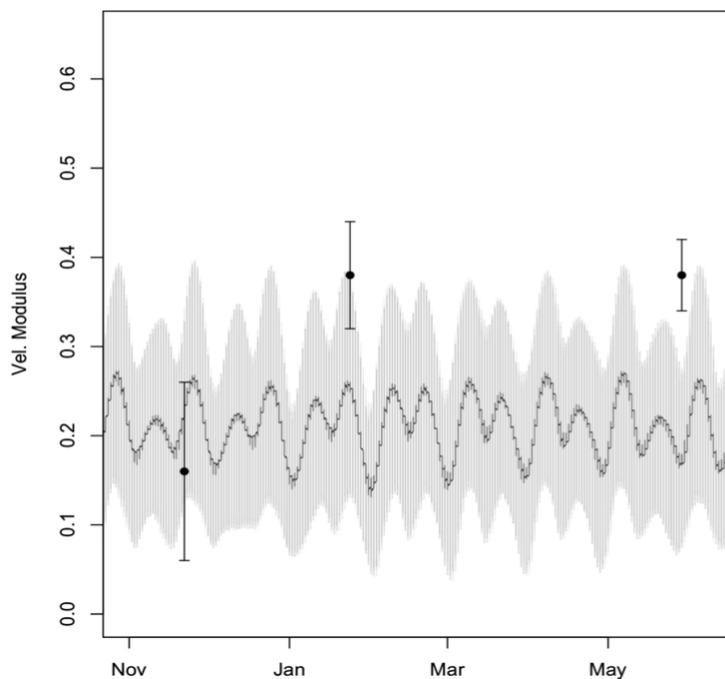


Figura 4. Validación de corrientes del modelo hidrodinámico. La línea negra y el área gris muestran, respectivamente, el promedio móvil y la desviación estándar móvil para una ventana de 72 horas (3 días) de los datos del modelo. Los círculos negros con barras de error muestran los datos tomados en las campañas de terreno, para el mismo punto.

3.2 Resultados del cálculo del tiempo de residencia.

Los resultados de las simulaciones para calcular el tiempo de residencia se muestra en la Figura 6. Donde cada color del gráfico muestra la fracción de partículas de cada caja que aún permanecen en el dominio del modelo. Como se puede observar, en todos los casos, hay una fracción de partículas que nunca abandona el área monitoreada, producto de la influencia de la marea sobre el sistema estuarino. Se establecieron tres líneas de corte para las 5 cajas a los 2,5, 5 y 25 días. Al integrar los resultados, se obtiene que el tiempo de residencia para el Humedal del Río Cruces es de 53 días para la zona alta del

humedal, 27 días para la zona media del humedal y 2,5 días para la zona baja del humedal. Por su parte, las áreas de desembocadura de los ríos tributarios del humedal mostraron tiempos de residencia de 30 días para el Río Pichoy y 33 días para el Río Cayumapu (Tabla 3).

Los resultados muestran una diferencia de más de 20 veces en los tiempos de residencia entre la zona alta y la zona baja del humedal. Esta información podrá ser de suma utilidad para, por ejemplo, determinar la ubicación de futuras fuentes puntuales de descarga, favoreciendo su ubicación en la zona baja del humedal, ya que su capacidad de autodepuración es muy alta, renovando sus aguas en solo 3 días.

Tabla 3. Resultados de los cálculos de tiempo de residencia.

Zona	TR caja (días)	Sumatoria	TR total (días)
Humedal Alta (HA)	25	HA+HM,+HB	52,5
Humedal Media (HM)	25	HM+HB	27,5
Humedal Baja (HB)	2,5	HB	2,5
Pichooy (P)	2,5	P+HM+HB	30,0
Cayumapu (C)	5	C+HM+HB	32,5

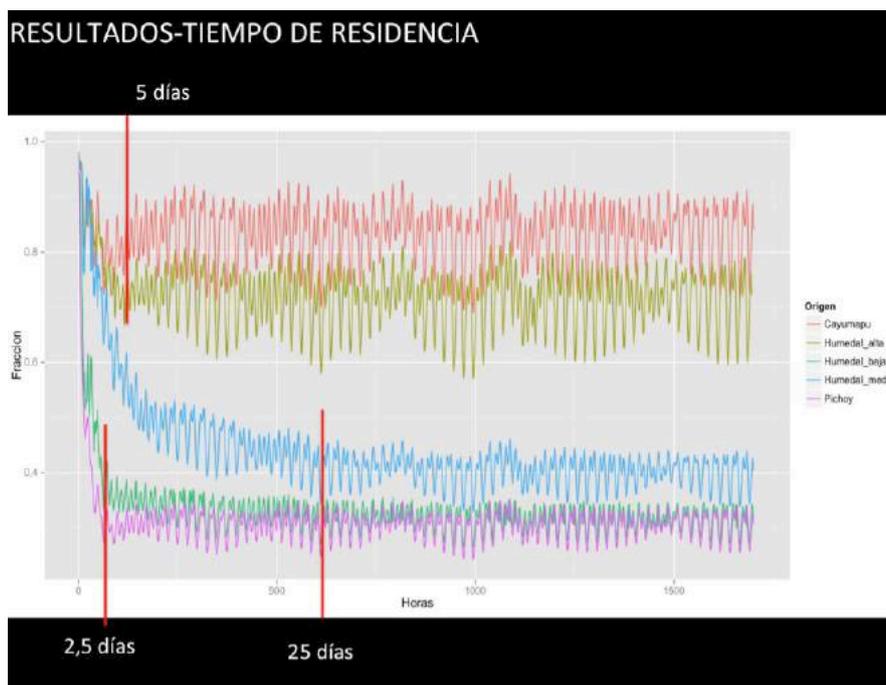


Figura 5. Tiempo de residencia para las diferentes secciones del humedal, calculado a partir de la fracción de agua que va quedando en cada caja respecto del volumen total de cada sección.

4. CONCLUSIONES

La adecuada gestión ambiental de los ecosistemas acuáticos requiere de herramientas que permitan una mirada integrada y sistémica. Los modelos hidrodinámicos implementados con el sistema de modelación MOHID cumplen con ambas características.

Una de sus ventajas es que MOHID es código abierto y se puede descargar gratis desde Internet, posee una pequeña pero activa comunidad de usuarios que contribuyen a esclarecer dudas y hasta la fecha sigue en desarrollo de nuevos módulos y aplicaciones.

Los resultados de este trabajo podrán servir de base para diversas acciones de manejo ambiental, como por ejemplo, la planificación territorial de los alrededores del humedal. El modelo muestra que la zona alta del mismo puede ser sensible a descargas de contaminantes, nutrientes u otros elementos que puedan perjudicar, si son vertidos en exceso, a la biota del ecosistema, debido a su alto tiempo de residencia (casi dos meses). Por otra parte, estos resultados también muestran que la parte baja del humedal sería la más idónea para ubicar nuevas descargas, ya que su gran capacidad para limpiar sus aguas (sólo 2,5 días) permitiría reducir los impactos acumulativos de cualquier elemento contaminante presente en las descargas.

Los recursos informáticos (de procesamiento y cómputo) están cada vez más al alcance de cualquier usuario, y las alternativas de procesamiento remoto y de colaboración a distancia han facilitado enormemente la implementación de este tipo de herramientas numéricas en cualquier país, estando al alcance de oficinas gubernamentales, empresas privadas y ONGs. Este trabajo es una muestra del enorme potencial de este sistema de modelación como herramienta en la gestión ambiental, ya que posee módulos de nutrientes, sólidos en suspensión, derrames de petróleo, simulador de oleaje, productividad primaria, coliformes fecales, entre muchos otros. Nuestra propuesta es que estamos en el momento adecuado para la masificación de su uso en Latinoamérica y el Caribe.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto Fondecyt N° 1110077 adjudicado a V. Marín y L. Delgado. Se agradecen los comentarios efectuados por dos revisores anónimos que mejoraron versiones previas del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Braunschweig, F., Leitao, P. C., Fernandes, L., Pina, P., & Neves, R. J. J. (2004). The object-oriented design of the integrated water modelling system MOHID. *Developments in Water Science*, 55, 1079-1090.

Braunschweig, F., Martins, F., Chambel, P., & Neves, R. (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*, 53(3), 137-145.

Corti, P., & Pablo Schlatter, R. (2002). Feeding ecology of the black-necked swan *Cygnus melancoryphus*

in two wetlands of Southern Chile. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 37(1), 9-14.

Henderson, A., Gamito, S., Karakassis, I., Pederson, P., & Smaal, A. (2001). Use of hydrodynamic and benthic models for managing environmental impacts of marine aquaculture. *Journal of Applied Ichthyology*, 17(4), 163-172.

Josefson, A. B., & Rasmussen, B. (2000). Nutrient retention by benthic macrofaunal biomass of Danish estuaries: importance of nutrient load and residence time. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(2), 205-216.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5-6), 394-415.

Marín, V. H., Delgado, L. E., Vila, I., Tironi, A., Barrera, V., & Ibáñez, C. (2014). Regime shifts of Cruces River wetland ecosystem: current conditions, future uncertainties. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(1), 160-171.

Marín, V. H., Tironi, A., Paredes, M. A., & Contreras, M. (2013). Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecological Modelling*, 264, 7-16.

Moreno Navas, J., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2011). Application of 3D hydrodynamic and particle tracking models for better environmental management of finfish culture. *Continental Shelf Research*, 31(6), 675-684.

Muñoz-Caravaca, A., Díaz-García, O., Douillet, P., Fichez, R., Herrera-Marrero, R., Alcántara-Carrió, J., & Rodríguez, A. G. (2011). La distribución de tiempo de residencia en la Bahía de Cienfuegos. On the flushing time of Cienfuegos Bay, Cuba. *Serie Oceanológica*. No. 9.

Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.

Rand, G. M. (Ed.). (1995). *Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate and risk assessment*. CRC Press.

U.S. EPA. (2008). *Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetland Hydrology*. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-08-024

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA GUARA, DE CUBA

DETERMINATION OF POTENTIAL GROUNDWATER RECHARGE IN GUARA BASIN OF CUBA

Ing. Dulce María Rodríguez¹ Lugo, Dr. Pedro Pérez Álvarez²

Resumen

En ocasiones el uso inadecuado de la tierra en zonas que constituyen áreas de aporte a las aguas subterráneas, es incompatible con su conservación. Sucede también que el incremento de la boscosidad en una cuenca hidrográfica, no se potencia en estos lugares, los que poseen una prioridad intrínseca por naturaleza. A partir de la metodología de balance hídrico de Schosinsky y con el auxilio de un Sistema Información Geográfica se identifican las áreas de recarga hídrica al acuífero de la cuenca hidrográfica Guara. Se establece un procedimiento para la identificación de las principales zonas de recarga hídrica, se proponen acciones de protección y manejo de carácter forestal, hídrico, de conservación de suelos y de educación ambiental para la población comunitaria que reside en dichas áreas lo que contribuye al ordenamiento del territorio de este ecosistema. Para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó un balance hídrico de suelos. Con el uso de la cartografía en forma digital, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas digitales que representan el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la precipitación en el área de estudio y con la base de datos se determinaron los coeficientes de las variables: textura del suelo (kfc), pendiente (Kp) y tipo de cobertura vegetal (Kv). La superposición de estos mapas permitió identificar 29 Polígonos Biofísicos (PB), que son áreas con valores iguales de: evapotranspiración potencial (ETP), humedad inicial (Hsi), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente (DA), infiltración básica del suelo (fc), intercepción de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras de agua. En general, en la cuenca se recargan aproximadamente 79 millones de m³ de agua anualmente, información congruente con los resultados obtenidos por el Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba. Los valores de recarga potencial (Rp) se han obtenido en un período dado y realmente dependen del cambio en las propiedades físicas y uso del suelo, que junto al escurrimiento, pueden provocar una disminución de la Rp, especialmente en aquellos PB con insuficiente boscosidad. Según la Rp, los polígonos se categorizaron con baja, media y alta recarga proponiéndose acciones de manejo que consideran los subprogramas de trabajo del Consejo Nacional de Cuencas para lograr la sostenibilidad de los recursos hídricos.

Palabras claves: recarga hídrica, balance, agua subterránea.

Abstract

Frequently the inappropriate use of lands groundwater recharge areas is incompatible with their conservation. In addition, the increasing of wooded lands in these catchment areas is not a priority task, what is an important one. With of Schosinsky's hydraulic balance method and the support of a Geographic Information System the hydraulic catchment zones to the Guara basin have identified. A procedure for the identification of the main catchment zones were obtained, different protection and management actions were proposed for the conservation of soils, forest, waters and environmental education of the community as a contribution to the environmental ordination of the territory in these ecosystem. The study determined all of the locations with potential for groundwater recharge through soil water balance. With the use of the cartography in digital form, a Geographic Information System (GIS) has generated digital maps that represent the soil type, slope, the vegetal coverage and the precipitation in the studied area and the data base was used to determinate the coefficients of the variables: soil texture (kfc), slope (Kp) and type of vegetal coverage (Kv). The superimposed maps identified 29 Biophysics Polygons (BP) and there have the same values of potential evapotranspiration (PET), initial humidity (Sih), humidity retention of the soil (field capacity and permanent wither point), apparent density (DS), basic infiltration of the soil (fc), and interception of the rain and depth of the roots that extract water. Around 79 million of m³ the water have recharged in the basin area annually. This information is congruent with the results obtained by the Control Graphic Groundwater Balance for the National Hydraulic Resources Institute in Cuba. The values of potential recharge (Rp) had obtained in a moment, but the change in the physical properties of the soil, the use of the soil and a major runoff, can cause a decrease of the Rp, especially in the BP with coverage insufficient to forest. Like the Rp, the BP have classified in low, medium, and high recharge, manage actions are defined, considering the programs of National Basin Council for to sustainability of hydric resources.

Key words: hydraulic catchment, hydraulic balance, underground water.

¹ Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Mayabeque, Mayabeque, Cuba

² Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba

1. INTRODUCCIÓN

Es cada vez más fuerte el convencimiento de que nos encontramos inmersos en una grave crisis en relación a los recursos naturales, la escasez de agua para consumo humano, riego, y para otros usos; debido a cambios en regímenes de precipitación, y escurrimientos, a la degradación de los suelos por el mal manejo de la tierra y la pérdida de los bosques, son algunos de los problemas que han generado esta crisis con proporciones a nivel mundial máxime si tenemos en cuenta que los recursos: agua, suelo y bosque están estrechamente relacionados (Orozco, Padilla, y Salguero, 2003).

En el caso de Cuba por la ubicación geográfica del archipiélago y la configuración estrecha y alargada de la isla, se le confieren determinadas particularidades a la disposición de sus recursos hídricos a partir de la red fluvial, conociendo además que la única fuente de alimentación al manto freático son las precipitaciones, y que también siendo un país netamente agrícola, donde el agua subterránea, es una fuente de vital importancia para el desarrollo económico y social del país (INRH, 2012).

La alternativa sostenible para asegurar a mediano y largo plazo el suministro de la cantidad y calidad del agua para la economía, la sociedad y el medioambiente está dado en “desarrollar una política nacional, regional y local del agua, integrada armónica y coherente, encaminada a su uso racional, productivo y eficiente, optimizando la gestión de riesgos asociados a su calidad y a los eventos extremos” (García, Fontova, 2013). Se hace necesario entonces, establecer nuevas concesiones para el aprovechamiento del agua con una dimensión sostenible incorporando términos como: ecosistema, cuenca hidrográfica y ordenamiento territorial.

El enfoque ecosistémico se refiere a “reconocer los ecosistemas naturales y transformados como sistemas complejos, cuyo funcionamiento y capacidad de respuesta ante perturbaciones, dependen de las relaciones dinámicas entre especies, y entre éstas y el medio ambiente, la sociedad y su cultura” (Guerrero, De Keizer, & Córdoba, 2007). Dirigir el enfoque de ecosistema a la gestión de los recursos naturales, constituye una imposición de estos tiempos, para mantener una visión holística y poder comprender como la naturaleza interacciona con la sociedad.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es el “conjunto de actividades, mecanismos e instrumentos, dirigidos a garantizar la administración y uso del recurso hídrico mediante su conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo y el control de la actividad del hombre en esta esfera”. Es el “proceso” cuyo objetivo es asegurar el desarrollo y manejo coordinado del agua en interacción con otros sistemas naturales, sociales y culturales, maximizando el bienestar económico, sin comprometer a los ecosistemas vitales y brinda un marco propicio para el logro de un aprovechamiento sustentable del agua (García, 2009)

Tradicionalmente se consideraba el enfoque sistémico en el manejo y gestión de cuencas, enfatizando en identificar las entradas y salidas del sistema de la cuenca hidrográfica, principalmente sustentado en el recurso hídrico, actualmente no solo se valora el recurso hídrico, sino también otros recursos como: el aire, la biodiversidad, los suelos, cobertura vegetal, entre otros, siendo insuficiente la gestión adecuada para mantener, mejorar y hacer sostenible el ecosistema, lo cual implica relacionar las variables sociales y económicas, teniendo en cuenta la capacidad del mismo.

En la actualidad en Cuba, la cuenca hidrográfica alcanza una dimensión más integradora e intersectorial, que incluye a los recursos naturales y la infraestructura creada por el hombre, donde se desarrollan sus actividades económicas y sociales y se generan consecuencias favorables y no favorables para el medio ambiente. El Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas desarrolla un trabajo multidisciplinario y sistemático, cumpliendo con la aplicación de la GIRH con enfoque ecosistémico coordinando y evaluando los subprogramas de trabajo del manejo integrado en las cuencas, conllevando a un uso sostenible de sus recursos naturales, vinculado con las actividades económicas y sociales que en ellas se desarrollan, los que se reflejan en la evolución ambiental de las cuencas de interés nacional.

El enfoque ecosistémico complementa la GIRH y su alcance evalúa 11 subprogramas de trabajo en las cuencas hidrográficas en los que se observa la conexión entre ambos conceptos (García, 2007), estos son:

- Políticos y legales.
- Institucionales y organizativos
- De planificación y balances nacionales y de cuencas.
- Hidrológicos e hidrogeológicos (redes y estudios).
- De prevención.
- De infraestructura hidráulica.
- De operación de sistemas.
- Calidad del agua y de los componentes ambientales.
- De sinergias con otros componentes naturales y socio-económicos.
- Científicos y de innovación tecnológica.
- Económicos y financieros.
- Informáticos.
- De educación y comunicación social.
- Culturales.

El recurso hídrico permite el sostenimiento de las relaciones ecológicas así como sus funciones, el desarrollo de actividades productivas y la atención de

las necesidades sociales como consumo, energía, entre otras Barrantes y Vega (2004)¹.

Es indiscutible que cuanto más caracterizado esté el territorio, así como la distribución y estado de sus recursos naturales, unido a las transformaciones realizadas por el hombre, más efectivas serán las acciones a proponer que contribuyan a mantener el equilibrio de sus elementos básicos (clima, medio físico, agua, suelo, flora y fauna entre otros) de ahí la importancia de realizar una gestión ambiental con ciencia y técnica.

Por tanto, el conocimiento de la recarga potencial al acuífero y la identificación de las áreas de mayor aporte en una cuenca hidrográfica, son un requisito fundamental para posteriormente ejercer sobre ellas una adecuada gestión ambiental, pues el desarrollo económico y social de un territorio transita por su crecimiento demográfico de conjunto con su desarrollo industrial y agropecuario entre otros, además, proporciona indicadores de sobreexplotación, descargas, contaminación; de manera general, constituye una herramienta científica para la gestión ambiental en ese ecosistema.

A partir de la problemática antes expuesta, nos planteamos entonces como problema científico de la presente investigación: No se dispone de un procedimiento técnico, que permita identificar las principales áreas de recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara”.

Siendo nuestro objeto las principales áreas de recarga hídrica (PAHR) y la investigación se propone, como objetivo general: Caracterizar las Principales Áreas de Recarga Hídrica (PARH) en la cuenca hidrográfica Guara. Para esto se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las PARH a partir de los parámetros biofísicos de la cuenca.
2. Proponer acciones para un adecuado manejo de las PARH como base para la conservación del recurso hídrico.

1.1 Metodologías de estimación de la recarga hídrica

Se conoce como recarga hídrica, al proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior, además se define este fenómeno como un proceso por el cual el exceso de agua por infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continua circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada, hasta la capa freática (Faustino, 2011).

La recarga hídrica puede ser natural, es concebida por el volumen de agua que penetra a un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Blanco, 2009).

Existen varios métodos o metodologías, para estimar la recarga hídrica natural en una cuenca hidrográfica, entre otros se mencionan los siguientes:

Métodos de balance de agua

En general las metodologías de balance esbozan la ecuación general hidrológica: donde evidentemente los principales elementos de entradas y salidas naturales, están dados por la precipitación, el escurrimiento superficial, la infiltración y la evapotranspiración; y quedarían otras variables, de menos cuantía, como la condensación, etc. (González, Marrero, & Martínez, 1999).

La acumulación de la oferta hídrica a través del cálculo del balance hídrico, se hace para determinar si hay problemas de cantidad. En otras palabras, es importante determinar si hay agua suficiente para satisfacer las diferentes necesidades de los diferentes usuarios actuales y potenciales (Barsev, 2008).

En Cuba el control del uso de las aguas tanto de fuentes superficiales como subterráneas en la cuenca, se realiza a través del Balance de Agua conocido por Plan de Uso de las Aguas (PUA), que es un instrumento de planificación con jerarquía legal, que establece y regula el equilibrio demanda-oferta, según las disponibilidades anuales del recurso hídrico y conociendo las demandas de los usuarios, se dispone un balance hídrico incluyendo en él un pronóstico de las precipitaciones, se elabora a niveles sectoriales, municipales y hasta en la esfera nacional de forma trimestral y anual, es la materialización de la gestión integrada del recurso hídrico en función de satisfacer las necesidades de la economía, la sociedad y el medio ambiente, pues para lograr la sostenibilidad de este recurso, “no se aceptan demandas por encima de las entregas garantizadas de los embalses según sus cálculos hidro-económicos, ni superiores a los recursos explotables en el caso de las cuencas subterráneas” (INRH, 2012).

Método hidroquímico

La recarga por la lluvia a los acuíferos por el balance del ión cloruro, es uno de los métodos de cálculo que se puede emplear en la determinación de la misma, este investiga el aporte atmosférico para llegar a la estimación y la discusión de su valor (Faustino, 2011).

Según Alcalá, (2005) en régimen estacionario, el agua subterránea freática recibe un flujo másico de Cl⁻, igual al aporte por la lluvia, después de restar el flujo que escapa por escorrentía directa y aunque esta metodología aporta un valor de la tasa de recarga por la lluvia esperable en un lugar, no calcula el volumen almacenado, ya que este concepto depende del tiempo medio de residencia del agua subterránea.

1 citado por Blanco Rojas (2009)

Las aguas superficiales y las subterráneas que yacen a poca profundidad se encuentran en equilibrio dinámico con la atmósfera, la posibilidad de determinar la recarga por estos métodos, se calcula por la correspondencia entre el tiempo de vida y los parámetros físico-químicos de las aguas (García, 2007).

El balance del ión cloruro es factible ya que este es un soluto conservativo y que normalmente no es aportado por el terreno entre sus propiedades están que es muy soluble, no interactúa con el medio, es fácil de muestrear y el terreno carece de cantidades significativas del mismo, su ecuación de balance es la siguiente:

$$Inf = \left(1 - \frac{E\%}{P}\right) \frac{C_p}{C_i} \quad (1)$$

Donde:

Inf = coeficiente de infiltración

C_p = valor medio de cloruros aportados por la lluvia (ppm)

C_i = valor del contenido de cloruros en el agua subterránea (ppm)

$E_{\%}$ = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación (mm)

$$E = P (1 - Inf) - E_{\%} \quad (2)$$

Donde:

E = valor de la evapotranspiración (mm)

Inf = coeficiente de infiltración

$E_{\%}$ = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación

Por tanto

$$I = P - E - E_{\%} \quad (3)$$

Donde:

E = valor de la evapotranspiración (mm)

I = valor de la infiltración (mm)

$E_{\%}$ = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación (mm)

Método participativo

Este método elabora una propuesta metodológica práctica y de aplicación simple por parte de actores locales, para identificar zonas con potencial de recarga hídrica, e intenta conjugar el conocimiento técnico y científico con el conocimiento y experiencia local de las comunidades en subcuencas hidrográficas, mediante talleres participativos con los pobladores de las comunidades y especialistas que trabajan en la zona (Faustino, 2011).

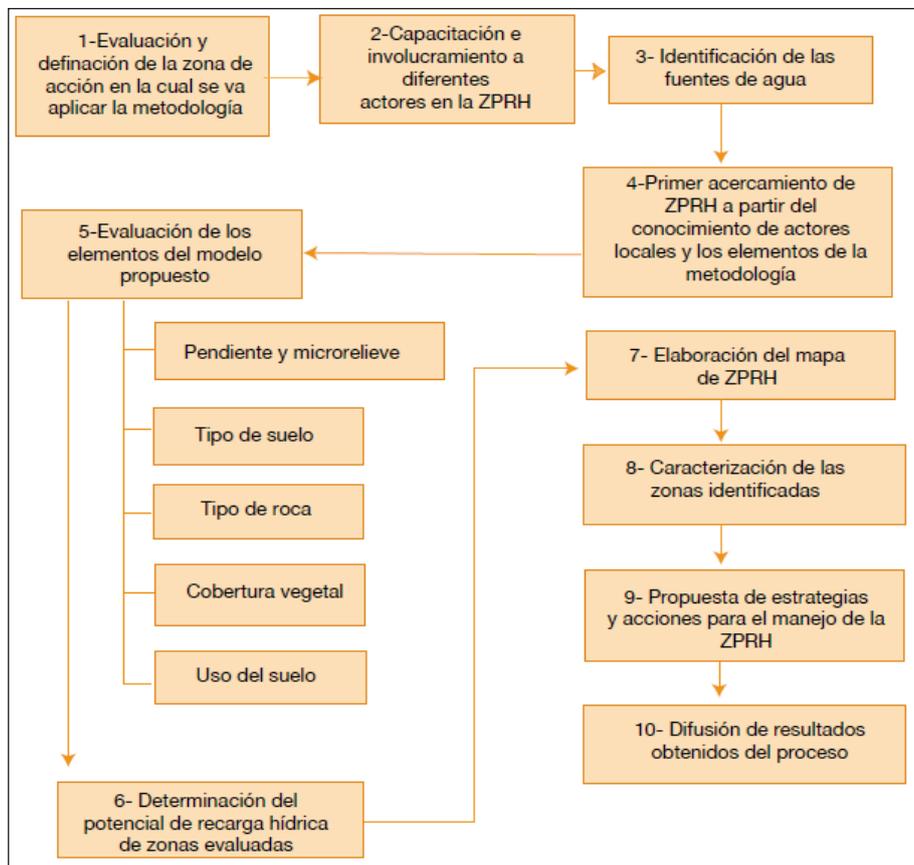


Figura 1. Pasos del Método Participativo.
Fuente: Matus, Jorge (2007)

El método participativo para la identificación de las zonas de recarga hídrica, por lo general, está al alcance de los organismos, comités de cuencas y tomadores de decisiones locales responsables del manejo de estas. Esta propuesta metodológica aporta herramientas prácticas, sencillas, de fácil uso y bajo costo para que los actores, facilitadores y tomadores de decisiones a nivel local de cuenca, puedan identificar zonas potenciales de recarga hídrica y orientar las acciones de protección, conservación y aprovechamiento de dichas áreas (Matus, Faustino y Jiménez, 2007).

Métodos de balance hídrico de suelos

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

El potencial de las aguas subterráneas, se estima determinando la recarga al mismo, que se calcula conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se

requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero y que se encuentra ubicado debajo de este (Faustino, 2011).

El balance de suelos permite “estimar si el cálculo de la recarga hídrica potencial al acuífero” integrando todos los valores en los cuales se puede dividir la precipitación que cae sobre un área determinada en la zona no saturada (Orozco, Padilla & Salguero, 2003).

Descripción del área de estudio

La cuenca hidrográfica Guara es de origen natural y abierto, se encuentra ubicada en la zona suroeste de la provincia Mayabeque de la República de Cuba. Posee un área de 157.8 Km² y sus límites se corresponden: por el Norte con las elevaciones de Cotilla y Managuaco, al Este y Oeste con la Llanura Roja Habana-Matanzas y por el Sur con el Golfo de Batabanó, su afluente principal es el río Bayamo, que nace en la parte alta de la cuenca desembocando en la costa con una longitud de 32.5 Km, es intermitente condición propia de las corrientes superficiales cubanas, con dependencia total de las precipitaciones.



Figura 2. Ubicación cuenca hidrográfica Guara.

Fuente: Geocuba (2013)

El punto de origen con coordenadas (Norte: 344730, Este: 377374) se corresponden con la Loma El Gallo en las elevaciones antes mencionadas y en la desembocadura la Playa Santa Isabel con coordenadas (Norte: 317890, Este: 377040) en el Golfo de Batabanó. Siendo sus cuencas vecinas al Norte Almendares - Vento, al Este Mayabeque, al Oeste Quivicán y al Sur el mar. El relieve es ondulado en la parte alta y llano en las partes media y baja, donde descarga el río y las lluvias constituyen la principal fuente de alimentación en el área, las cuales por el escurrimiento superficial pasan a formar parte del acuífero subterráneo.

Su geología está conformada por varias fajas latitudinales muy bien definidas, orientadas de sur a norte, las rocas tienen un plegamiento de tipo anticlinorio que debió originarse a finales del Eoceno, no aflorando rocas del Paleoceno o más antiguas, de forma general la litología está representada por varias formaciones geológicas miocénicas carbonatadas: Formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines, todas son calizas blanco-cremas organógenas, cársicas, duras.

A partir de trabajos geofísicos y por tener una amplia Red Hidrogeológica compuesta por pozos

de observación de oscilación de niveles de las aguas subterráneas (de ellos 8 ubicados en el área de estudio), teniendo en cuenta la litología, las características geológicas del escurrimiento subterráneo, la dirección principal de flujo y otras consideraciones, se definen los límites de los acuíferos y sus tramos hidrodinámicos, con lo que se elaboró un mapa para la evaluación de los recursos de explotación de las aguas. (INRH, 1991). La cuenca hidrográfica Guara está ubicada en el centro de la cuenca hidrogeológica representando el 45 % de toda al área del acuífero.

El acuífero es libre enmarcado en una llanura cársica que junto a la presencia de un suelo muy permeable y al pobre drenaje superficial la alimentación fundamental de las aguas subterráneas está dada por la infiltración directa de las precipitaciones la dirección del flujo es hacia el Sur en donde se [produce la descarga hacia el mar en forma de escurrimiento a través de las rocas intensamente carsificadas y fracturadas siendo controlado por un humedal que se extiende a lo largo de toda la costa formando parte de la Cuenca Costera Sur.

Por tener un mayor escurrimiento subterráneo, se divide en cinco tramos hidrodinámicos que son los siguientes: Corojal (HS-1), Norte de Artemisa (HS-2), Artemisa - Quivicán (HS-3), Melena-Nueva Paz (HS-5), y Batabanó (HS-4), correspondiendo este último a la cuenca hidrográfica en estudio, el que posee un área total de 353 Km², la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas es de 40 m en la zona premontañosa hasta 0 m en la línea de la costa; los gastos específicos en el tramo varían de 50 a 100 l/s/m; el espesor es de hasta 150 m. Su recurso explotable está evaluado en 107Hm³ (INRH, 2010).

Los recursos hídricos superficiales se componen por el embalse La Ruda, el Canal Pedroso-Güira y el propio río Bayamo; la forma alargada de la cuenca hidrográfica constituye una característica importante en la formación del escurrimiento, la presa está ubicada en la parte alta y cubre los déficit de agua para el riego de cultivos varios en las provincias Mayabeque y Artemisa, vinculada al sistema hidráulico, Canal Pedroso-Guira, garantizando las demandas de agua de la agricultura con un gasto normal de diseño de 8.0 m³/s.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Antecedentes: Cálculo de la recarga hidráulica en Cuba

El Decreto Ley 138 de las Aguas Terrestres en Cuba en su Capítulo IV, artículo 32 expresa que: "con el objetivo de lograr la eficiencia y la racionalidad mayores en la regulación, el aprovechamiento, el uso, la preservación y el saneamiento de las aguas terrestres, en armonía con los demás recursos naturales y con el desarrollo económico-social del país, se realizarán estudios técnico-

económicos integrales, denominados esquemas de aprovechamiento hidráulico, los que tendrán carácter nacional, regional, provincial o zonal".

A su vez la Ley 81 de Medio Ambiente en el capítulo IV sección segunda, sobre las aguas terrestres refiere que: "El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, en coordinación con otros órganos y organismos competentes, es el encargado del control y desarrollo de las acciones encaminadas a la gestión de las aguas terrestres, con excepción de las aguas minero-medicinales.

Por tanto en Cuba el objetivo principal, de una investigación hidrogeológica completa, es llegar a evaluar las posibilidades de aprovechamiento hidráulico no sólo cualitativamente sino sobre todo, cuantitativamente. Esto es, lo que se conoce como el cálculo de los recursos y reservas de las aguas subterráneas., según las metodologías existentes, siendo el método más desarrollado el de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas, creándose un nuevo enfoque conocido como el Gráfico de Balance de las Aguas Subterráneas (GCBAS) (Plaza, 2010).

Este método, tiene como primer y más importante logro, que evalúa (determina) la alimentación o recarga neta al acuífero, directamente, evitando el engorroso método de determinar la infiltración, que como sabemos necesita de mediciones especiales para ser confiable su entorno. Parte de la fórmula de las oscilaciones del nivel (Fórmula de Bindeman), y de las deducciones que se hicieron con referencia a igualar ésta con Darcy salieron otras que son novedosas y se adaptan a los cálculos necesarios. Es bueno aclarar, que el llamado GCBAS, no es sólo un gráfico como tal sino un complejo proceso de cálculo de magnitudes del balance interno del acuífero, de variables y requisitos técnicos del régimen, establecidos para lograr una metodología de evaluación, que agrupa tablas, gráficos y fórmulas de cálculo.

La autora considera que esta metodología es muy eficaz para evaluar recursos ósea, volúmenes reales en el acuífero con fines operacionales y de explotación, pero no permite identificar las áreas que en la cuenca hidrográfica recargan el mismo con fines de establecer en ellas un adecuado plan de manejo con fines de proteger y ordenar el territorio para lograr la sostenibilidad del recurso.

No obstante los lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución No 196 y 204 expresan: "Desarrollar un programa integral de mantenimiento, conservación y fomento de plantaciones forestales que priorice la protección de las cuencas hidrográficas" y "Actualizar y ejecutar programas dirigidos a la preservación y rehabilitación de los recursos naturales que se utilizan: suelos, agua, bosques, animales y plantas, capacitando a los productores en gestión ambiental y aplicando con mayor rigor las regulaciones establecidas", respectivamente.

2.2 Metodología

A nuestro juicio y analizando todas las metodologías expuestas se selecciona el método de balance de suelos, se emplea la metodología de Gunter Schosinsky N. (2006), para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos, adaptada a las condiciones cubanas en cuanto a los parámetros de cálculo, proponiéndose además nuevas consideraciones a la metodología, aunque no toma en cuenta el comportamiento del ciclo hidrológico en las zonas urbanizadas y los cuerpos de agua.

También para la identificación de las zonas de recarga hídrica, se realizaron inspecciones y recorridos por la cuenca de estudio, tomándose evidencias fotográficas y testimonios, que aportaran veracidad a las variables de cálculo como la infiltración y la influencia con la vegetación.

La metodología empleada puede resumirse en los pasos siguientes: (1) caracterización general de la cuenca; (2) determinar los rangos de pendientes; (3) distribución de las precipitaciones; (4) cálculo de la evapotranspiración; (5) reconocimiento de la cobertura vegetal; (6) determinación del tipo de suelo y sus propiedades físicas; (7) determinación de los polígonos biofísicos; (8) aplicación de la ecuación de balance; (9) cálculo de la recarga potencial. Cada paso tiene implícito coeficientes.

Se refiere, que la metodología aplicada y adaptada a las condiciones cubanas, (en cuanto a los coeficientes

por textura de suelo y cobertura vegetal), no solo permite identificar las zonas de recarga hídrica, más vulnerables a la escasez o desaparición total de los recursos hídricos, sino también permite adoptar una serie de medidas que reviertan esta situación y contribuyan con la implementación de buenas prácticas, al ordenamiento del territorio y por tanto a la protección de este recurso natural, además al tener una salida cartográfica de fácil interpretación, pone en disposición de los decisores los resultados, para insertarlos en las estructuras y funcionamientos a nivel de municipio y consejos populares.

Los resultados de la aplicación de esta metodología se validaron con los del GCBAS en el tramo hidrogeológico del área de estudio.

3. RESULTADOS

La cuenca hidrográfica es un ecosistema, integrado principalmente por sus recursos y los usuarios de ellos, la valoración de los recursos expresa la potencialidad de oportunidades, pero fundamentalmente define los límites o niveles de intervención (soporte) sobre el medio físico. La oferta de recursos, su calidad y distribución determinan su vocación y da posibilidades para el hombre, de ella dependen para qué sirve la cuenca y su uso predominante.

A partir del cálculo de las variables que interviene en el balance de suelos y siguiendo los pasos

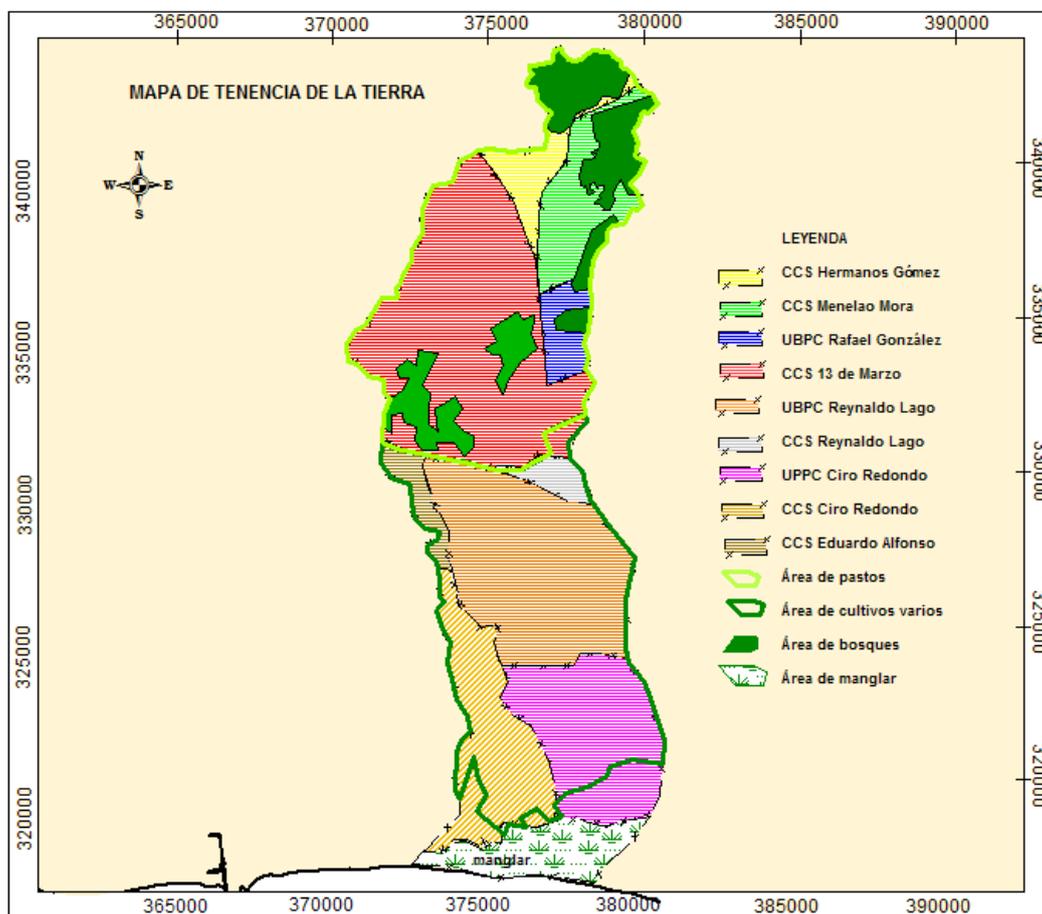


Figura 3. Tenencia de la tierra cuenca hidrográfica Guara

de la metodología, se pudo conocer que: la lluvia promedio anual en la cuenca hidrográfica Guara es de 1573 mm, determinada por una red hidrológica compuesta por 11 pluviómetros con más de 30 años de observación. Producto de la temperatura y la heliofanía solar 23.9°C y 2701 horas sol al año respectivamente medidas en una estación climática cercana a la cuenca Guara, el 51% de la lluvia caída se evapotranspira por la cobertura vegetal existente, determinada por la fórmula de Thonhwhite, mantiene un relieve llano pues sus pendientes promedios se clasifican como planas, estando su mayor elevación a 238.0 msnm.

En la parte alta de la cuenca predominan los pastos y algunos pequeños bosques y matorrales, en la parte media y baja, la agricultura asume las mayores áreas con cultivos como viandas, hortalizas, frijol, entre otros y en la zona costera predomina el manglar. La transpiración vegetal del área de estudio no es compleja, ya que en la misma la cobertura está bien definida, en su parte alta predominan los pastos, (pastizal) pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Nazareno (65.15 Km²), en la que se intercalan algunos bosques naturales y matorrales secundarios, en la media y baja se cosechan cultivos varios (granos, viandas y hortalizas) pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Melena del Sur (41.96 Km²) y la Empresa Agropecuaria Batabanó (20.01Km²) y

finalmente, la zona costera abarca aproximadamente 6.20 Km² de ciénaga y 10.67Km² de manglar.

En el área de estudio se identifican en su mayoría suelos de textura arcillosa relacionados con la Llanura roja Habana-Matanzas, obteniéndose sus propiedades físicas de la Clasificación Agroproductiva de los Suelos de Cuba, lo que se digitalizó con un SIG para confeccionar el mapa de los suelos. Por su textura existen 2 tipos de suelos: arcillosos y arcilloarenosos (Hernández, et al, 1999).

3.1 Identificación de los polígonos biofísicos.

Dirigir el enfoque de ecosistema a la gestión de los recursos naturales, constituye una imposición de estos tiempos, para mantener una visión holística y poder comprender como la naturaleza interacciona con la sociedad (Guerrero, Keizer & Córdoba, 2007).

Como se define anteriormente, la cuenca hidrográfica es un sistema compuesto de varios subsistemas, como el biológico (vegetación), físico (suelos). De ahí que en este trabajo se ha nombrado como polígono biofísico a aquella unidad o área, con características similares de suelo, pendiente topográfica y vegetación vinculándolas con la lluvia.

A partir de lo anterior, se obtiene 29 Polígonos Biofísicos (PB) agrupando las zonas con iguales variables biofísicas como: tipo de suelo, pendiente,

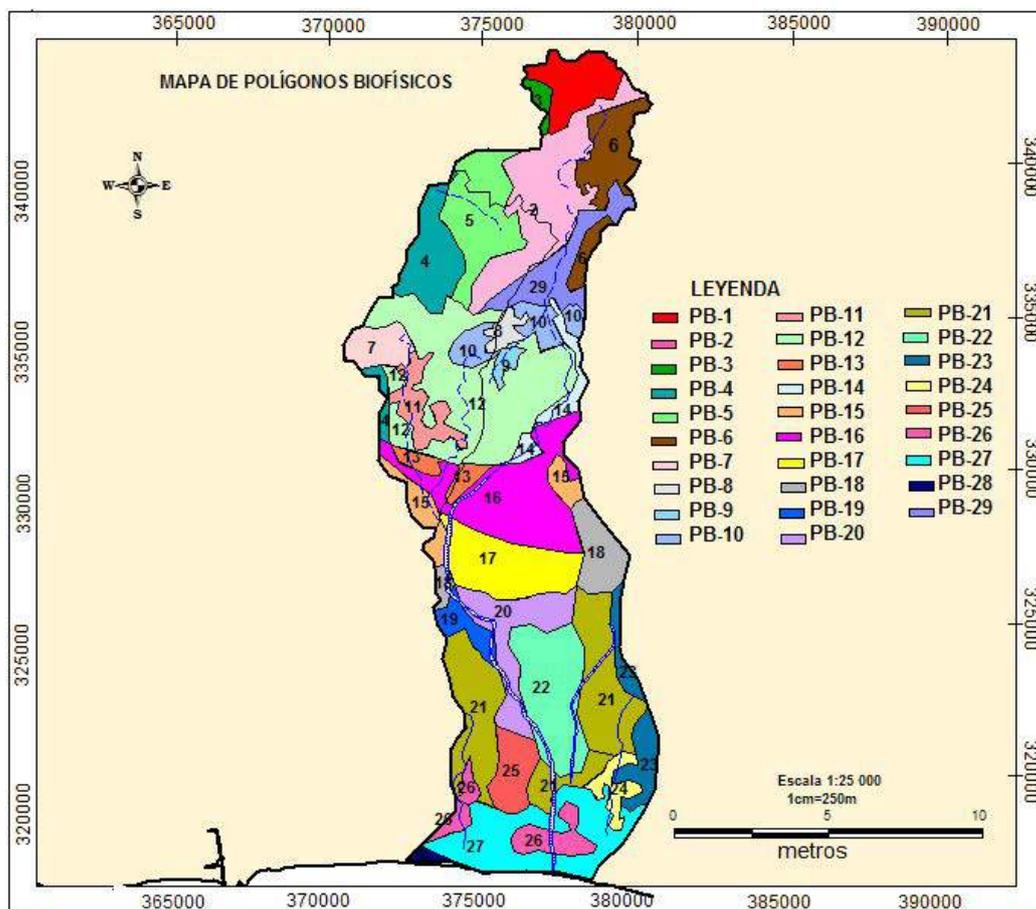


Figura 4. Polígonos biofísicos cuenca hidrográfica Guara

cobertura vegetal y precipitación y con el apoyo de un SIG, se elaboró un mapa digital donde se agruparon las capas de vegetación, textura de suelo, pendiente y precipitación.

Según Junker (2005), en el Método RAS para el cálculo de la recarga hídrica en El Salvador, analiza la influencia de la transpiración en el asfalto, lo que se tuvo en cuenta en este trabajo.

3.2 Cálculo de la recarga hídrica potencial (Rp) al acuífero

En cada polígono identificado se aplicó la ecuación de balance hídrico de suelos propuesta por Schosinsky y el objetivo de la misma es determinar parámetros hidrológicos (infiltración, escurrimiento, evapotranspiración y fundamentalmente, el volumen de agua que pasa a formar parte del acuífero).

Tabla 1. Ecuación Balance Hídrico de Suelos. Fuente: Schosinsky 2006

Zona de Estudio:													
Textura de Suelo:							Fecha:						
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración							P: Precipitación Media Mensual						
I: Infiltración							Pi: Precipitación que infiltra						
CC: Capacidad de Campo							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez							ETP: Evapotranspiración Potencial						
PR: Profundidad de Raíces							ETR: Evapotranspiración Real						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible							HSi: Humedad de Suelo Inicial						
DS: Densidad de Suelo							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo						
Kp: Factor por pendiente							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación							NR: Necesidad de Riego						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de Lluvia						
fc [mm/d]						?							
Kp [001%]						?							
Kv [001%]						?			por peso				
Kfc [001%]						000			(%)	(mm)			
I [001%]						000			CC	?	000		
DS (g/cm³):						?			PM	?	000		
PR (mm)						?			(CC-PM)	000	000		
HSi (mm)						?							
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3 12?													
Lluvia retenida [001%] : Bosques=02, otros=012													
Distribución mensual													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	000
Ret [mm]	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
Pi (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	000
HSi (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
C1	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
C2	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
HD (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
ETR (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
HSf (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
DCC (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	000
NR (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000

La ecuación de balance antes mencionada, relaciona todos los componentes y para su aplicación se requirió de los datos que están señalados con un signo de interrogación (?) y el volumen de recarga potencial al manto freático en la cuenca hidrográfica Guara, alcanza un valor total de 79 009.35 m³/año.

A modo de resumen se afirma, que el 32% de la precipitación que cae en la cuenca, llega a ser, recarga potencial al acuífero, el 15% se retiene en el follaje, el 51% evapotranspira a través de la vegetación y el 2% se convierte en escurrimiento producto de las áreas urbanas el que se obtiene por la propia ecuación de balance.

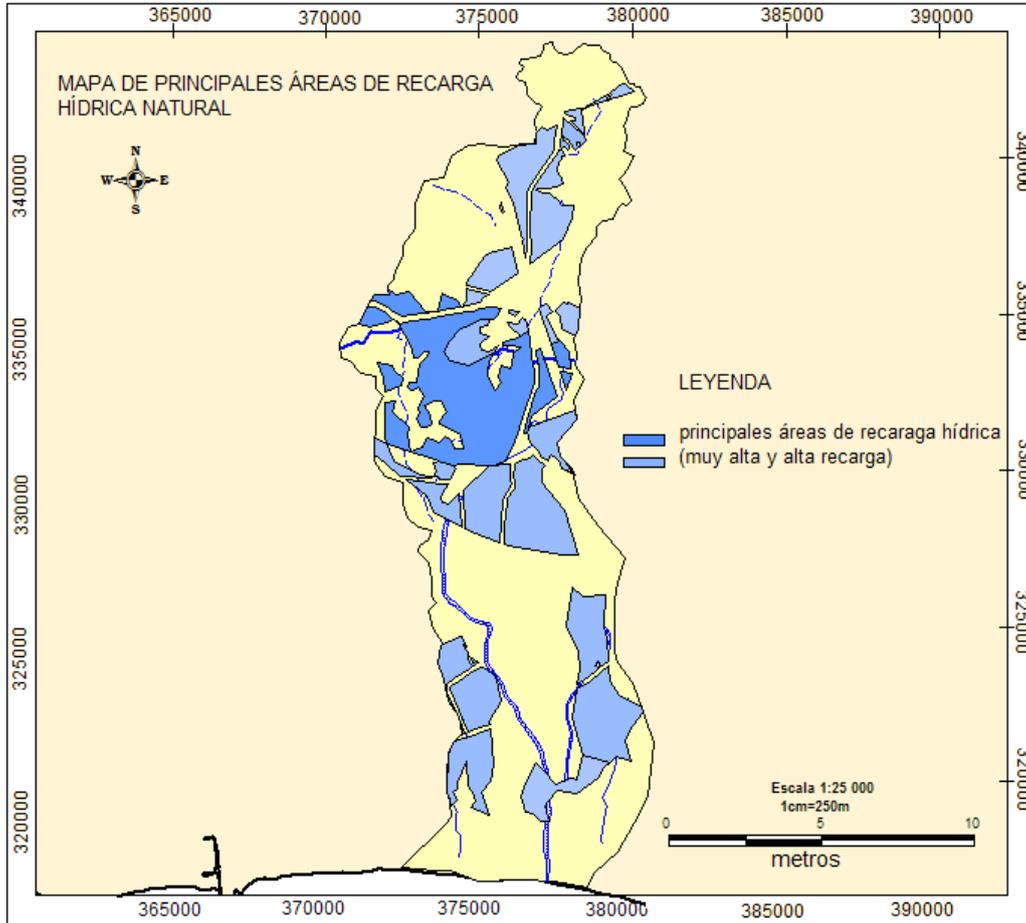


Figura 5. Principales áreas de recarga hídrica en la cuenca hidrográfica Guara.

Tabla 2. Variables finales de comprobación del balance de suelos

Precipitación	Infiltración	Escurrimiento	Evapotranspiración	Retención follaje	Recarga
m/Km ² / año					
47.187	39.207	0.974	23.684	7.006	15.523

3.3 Validación de los resultados

El objetivo de las redes de observación del ciclo hidrológico, es informar sobre la evolución de la cantidad y calidad del agua. La red hidrogeológica de la cuenca está compuesta por 8 pozos de sondeo, de ellos 6 con frecuencia mensual, y 2 con frecuencia semestral, la red pluviométrica consta de 6 equipos y para el monitoreo de la calidad del agua, existen 3 estaciones (EAHMY, 2013).

Según el GCBAS se estima que la recarga promedio anual es de 87 cm con un volumen de recarga de 0,160 Hm³ en todo el acuífero durante el año de estudio 2013, mientras que según Schosinsky en la cuenca hidrográfica el valor es de 54 cm y el volumen de recarga es de 0,079 Hm³ y nunca los niveles alcanzaron la zona de entrega restringida.

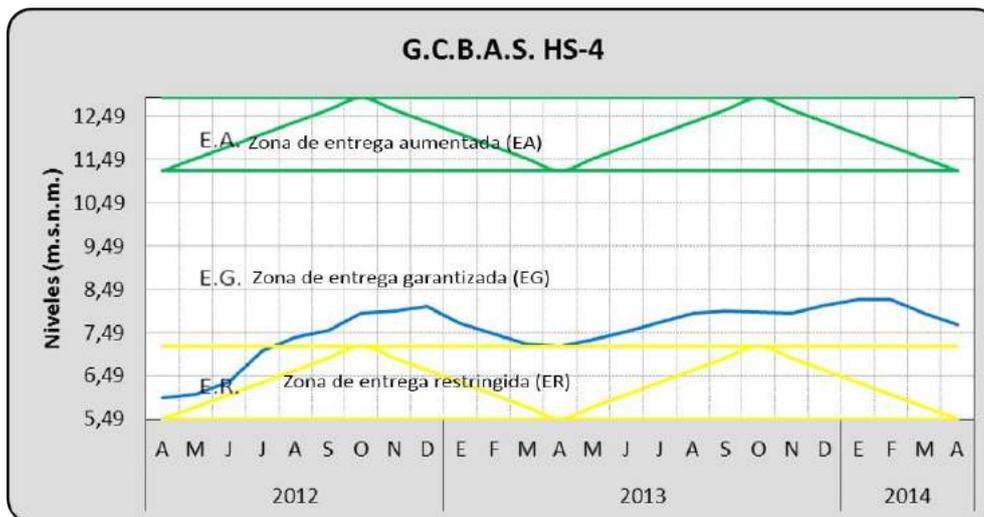


Figura 6. Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas.
Fuente INRH, EAHMY (2013)

Lo anterior minimiza la incertidumbre de esta estimación de la ecuación de balance hídrico a partir del balance de suelos ya que los resultados obtenidos se corresponden con las dimensiones de ambas cuencas, el acuífero tiene un área de 353,0 km² y la cuenca superficial 157,8 km². Recordemos que el territorio que abarca el área de estudio representa el 45 % del área total de su cuenca hidrogeológica.

Esta investigación propone superponer cada mapa temático, (suelos, vegetación, lluvia, uso de suelos) con el resultante de las principales áreas de recarga en la cuenca, enfocando las acciones, en cinco vertientes fundamentales: protección del recurso hídrico, desarrollo forestal, agropecuario, urbano y fortalecimiento de capacidades, donde se incluye la educación ambiental.

A partir de la superposición del mapa resultante de las principales áreas de recarga hídrica natural, con los mapas de temáticos se pueden implementar estrategias de carácter local, sobre la base de una información fácilmente accesible y confiable, favoreciendo así el uso eficiente y racional del agua y su sostenibilidad.

Se propone entonces, un plan que contenga acciones concretas y funcionales a partir de los resultados plasmados en esta investigación, que aunque está referida a los recursos hídricos, no se puede obviar su sinergia con otros componentes naturales.

3.3.1 Propuesta de acciones en las áreas de mayor recarga hídrica

Acciones de protección del recurso hídrico

- Mantener el terreno con cobertura vegetal y dar prioridad a productos biológicos como fertilizantes en las áreas de cultivos varios.
- Analizar las nuevas perforaciones de pozos en las principales áreas de recarga hídrica natural.

- Fortalecer el monitoreo de las variables del ciclo hidrológico (pozos de observación de niveles, pluviómetros, estaciones de calidad etc.).
- Mantener el control de la explotación de las aguas subterráneas a través de los sondeos mensuales que permiten conocer las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas y la actualización del GCBAS.
- Incorporar en los planes de inversión de la localidad, acciones de rehabilitación de las instalaciones hidráulicas en las vaquerías y poblados para el ahorro y uso racional del agua.
- Concebir sistemas de tratamiento de residuales en las nuevas inversiones que se ubiquen en estas áreas por ser vulnerables a la contaminación del agua subterránea.
- Ejecutar los proyectos de reforestación establecidos en los embalses que lo posean para la protección de su faja forestal.
- Cumplir los requisitos establecidos en la Norma (NC 93-11/209) referentes a las zonas de protección sanitaria, en los pozos de abasto a población.

Acciones para el desarrollo forestal

- Intensificar el Plan de reforestación del Servicio Estatal Forestal, de los municipios Melena, Batabanó y San José, tomando como base el mapa de las principales áreas de recarga hídrica natural.
- Desarrollar sistemas de agroforestería y silvopastoriles con prioridad en las entidades: CCS 13 de Marzo, UBPC Reynaldo Lago y CCS Menelao Mora, fundamentalmente por ser los terrenos de la tierra en las zonas potenciales para la reforestación.

3. Contemplar actividades de aprovechamiento óptimo de los bosques, incentivando la aplicación de tecnologías adecuadas, ya que esta cuenca tiene como actividad fundamental la ganadería y la agricultura y por su propio desarrollo económico, no sería adecuado reponerla totalmente de bosques como solución final para la conservación de sus suelos y el aporte de agua al acuífero.
4. Incluir en el Plan de reforestación, la faja forestal del embalse la Ruda, así como las de las micropresas existentes, de manera conjunta entre el Servicio Estatal Forestal Municipal de San José, la Empresa Genética Agropecuaria Nazareno y la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Mayabeque.
5. Suspender definitivamente toda labor de aprovechamiento forestal en una profundidad de 15 km a partir de la línea costera, categorizándola como áreas de conservación recuperando en especial los manglares y el área de ciénaga.

Acciones para la conservación de suelos y desarrollo agropecuario

1. Desarrollo de sistemas productivos de uso múltiple como el intercalamiento de cultivos.
2. Incentivar en los productores de las entidades pertenecientes a las Empresas Genética Pecuaria Nazareno, Agropecuaria Melena del Sur y Agropecuaria Batabanó la adopción de prácticas productivas amigables con el ambiente.
3. Fortalecer y priorizar el Programa Conservación y Mejoramiento de suelos, con prioridad en las entidades: CCS 13 de Marzo, UBPC Reynaldo Lago y CCS Menelao Mora, UBPC Ciro Redondo, UBPC Hermanos Gómez CCS Reynaldo Lago fundamentalmente.
4. Capacitar a los técnicos agrícolas y productores con entidades en las áreas de recarga, teniendo en cuenta ajustar el régimen de riego a la variable NR (números de riego) de la metodología empleada.
5. Disminuir los niveles de degradación debido principalmente a la práctica de actividades productivas con enfoque agroecológico.

Acciones de desarrollo urbano

1. Entregar a la Dirección Municipal de Planificación Física los mapas temáticos realizados, así como el mapa resultante con las principales áreas de recarga hídrica natural, para el desarrollo económico y social de la zona.
2. Regular el crecimiento de las zonas urbanas de manera sostenible.
3. Ejecutar el mantenimiento de las vías de acceso existentes, así como el estudio para la

implementación de las nuevas, teniendo en cuenta las áreas identificadas como potenciales del recurso hídrico.

Acciones para el fortalecimiento de capacidades

1. Crear y fortalecer las capacidades humanas e institucionales existentes, de tal modo que se asegure el cumplimiento de las medidas propuestas con la intervención de la comunidad
2. Proponer al Consejo Territorial de Cuencas Mayabeque, la inclusión de la cuenca hidrográfica Guara, en las cuencas de interés provincial
3. Establecer Proyectos de eje estratégico, que fundamenten las acciones anteriormente propuestas siempre con la participación local.
4. Desarrollar un Programa de Educación Ambiental con las comunidades y entidades sobre la cuenca de conjunto con el CITMA Provincial y los representantes municipales.

4. DISCUSIÓN

Al conocer la recarga potencial en la cuenca hidrográfica Guara se estima que el 13 y el 27% del área total con cobertura vegetal, se sustenta en polígonos con alta y muy alta recarga, el 55% poseen recarga media (estando cubiertos en su mayoría por bosques, pastos y el manglar, constituyendo este último, una barrera protectora contra la erosión costera) y los que aportan los menores volúmenes de agua al manto freático de forma natural representan el 5%.

La estimación del volumen que puede llegar al acuífero, muestra la influencia de la vegetación, se observa que el área de bosque recarga 186 mm/Km², la de pastos 101 mm/Km² y el área de cultivos varios 89 mm/Km², en la zona costera el proceso hidrodinámico que se produce entre el agua dulce y el agua salada no hace veraz este análisis demostrando que en los bosques se da una mayor evapotranspiración, pero la capacidad de regulación y almacenamiento de humedad que presentan los suelos cubiertos de bosques, y la alta tasa de infiltración de los mismos, producen volúmenes de recarga superiores.

La superposición del mapa resultante de las principales áreas de recarga hídrica natural, con los mapas de temáticos de suelos, vegetación, uso del agua, etc., permite puntualizar con mayor precisión los problemas ambientales de manera general así como, la solución de los mismos.

En cuanto a la cobertura vegetal se establece un índice de reforestación potencial que toma en cuenta la reforestación de la zona costera, las zonas de recarga hídrica, además de la faja de protección forestal de ríos y embalses, el que refleja que el 66%

del área de la cuenca admite plantaciones forestales en función de potenciar la disponibilidad del agua.

5. CONCLUSIONES

En la cuenca hidrográfica Guara que ocupa el 45% del área de su cuenca hidrogeológica siendo su principal fuente de alimentación, se identifican 29 polígonos biofísicos los que aportan como recarga potencial al acuífero el 33% de la precipitación que cae en la cuenca, a razón de 79 009.35m³ al año, donde además, el 50% evapotranspira a través de la vegetación, el 15% se retiene en el follaje y el 2% se convierte en escurrimiento producto de las áreas urbanas.

La metodología de cálculo aplicada permite valorar la cuenca de forma integral, combinando variables del ciclo hidrológico, parámetros fisiográficos y efectos antrópicos, como elementos que rigen el balance hídrico, para la formación, almacenamiento y explotación del recurso agua, constituyendo su salida cartográfica un valioso instrumento de trabajo para la gestión ambiental, brindando los fundamentos esenciales para implementar una política de ordenamiento del territorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalá, G. y Francisco, J. (2005). Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidroquímico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña España.

Barsev, R. (2008). Valoración económica de los bienes y servicios ambientales. Proyecto PNUD-GEF. Sabana-Camagüey.

Blanco Rojas, H. (2009). Identificación de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafelito, Tesis de Maestría. Costa Rica.

Decreto Ley 138 de las Aguas Terrestres de 2 de julio de 1993. (1993). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Extraordinaria No.9. Habana. Cuba.

EAHMY. (2013). Base de datos digitales de las Redes de observación hidrológicas, hidrogeológicas y de calidad de las aguas (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Mayabeque).

Faustino, J. (2011). Importancia del Bosque- Agua. Manual Manejo Integrado de Cuencas (CATIE, Ed.).

García, J. M. (2007). Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. Aproximación al caso cubano. Revista Voluntad Hidráulica No.99, pp. 2-17.

García, J. M. (2009). Aplicación del enfoque de sistema a la gestión integrada de los recursos hídricos en Cuba. Proyecto IWCAM – GEF.

García, J. M. y Fontova M. (2013). "La gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica y medidas de adaptación al cambio climático". Revista Voluntad Hidráulica No.107, pp. 25-27.

Geocuba. (2013). Imágenes satelitales de Google. gvsig 10.64. II Taller de Directores Técnicos. Cienfuegos.

Guerrero, E., De Keizer, O., y Córdoba, R. (2007). Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos. (UICN, Ed.). pp. 16.

González, L., Marrero, N., y Martínez, J. B. (1999). Hidrología. (C. d. Hidráulicas, Ed.) La Habana: ISPJAE.

Hernández, A.; Pérez J. M., Bosch, D. y Rivero, L. (1999). Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. La Habana. Edit. AGRINFOR. 64 pp.

INRH. (1991). Esquema Regional Precisado.

INRH. (2010). Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Línea Base de Recursos Hídricos para el Ejercicio de Integración Sur LA Habana.

INRH. (2012). Procedimiento para la elaboración del Balance de Agua. Dpto. Uso Racional del Agua.

Junker Martín. (2005). Método RAS para determinar la Recarga de Agua Subterránea. El Salvador. FORGAES

Ley 81 del Medio Ambiente de 11 de julio de 1997. (1997). Gaceta Oficial de la República de Cuba Extraordinaria No.7. Habana. Cuba

Matus, O., Faustino, J., Jiménez. (2007). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río JUCUAPA. Nicaragua. CATIE.

NC 93-11/209."Procedimiento de cálculo para la determinación de las zonas de protección sanitaria".1990.

Orozco, E., Padilla, T. y Salguero M. (2003). Manual Técnico para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. Guatemala, 2003.

Plaza, I. (2010). Manual Práctico de campo. Hidrogeológico. (INRH, Ed.) GEARH. Dirección Técnica. La Habana.

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un Balance de suelos. Revista Geológica de América Latina. Universidad de Costa Rica. CATIE.

GENERACIÓN E INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS DESTINADA AL AHORRO DE AGUA DE RIEGO EN DOS REGIONES PRODUCTORAS DE FRUTA EN CHILE

DEVELOPMENT AND INTEGRATION OF TECHNOLOGIES TO SAVE IRRIGATION WATER IN TWO FRUIT-PRODUCING REGIONS IN CHILE

Rodrigo H. Callejas¹, Juan Vera², Maximiliano Rioseco¹, Fernanda Prohens¹, Helen Osorio¹, Paulina Pino, Jaime Navarrete¹, Rodrigo Gálvez¹.

Resumen:

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 70% del agua dulce a nivel mundial es utilizada por la agricultura y considerando que Chile es uno de los principales productores de fruta que exporta a todo el mundo, el Estado, a través de los Fondos de Innovación para la Competitividad (regiones de Atacama y O'Higgins) le encomendó al Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile (UCHILECREA), desarrollar una estrategia para enfrentar la escasez hídrica, ahorrar agua de riego a nivel predial y en lo posible, permitir mejorar los rendimientos, calidad de la fruta y el potencial productivo de los huertos frutales. A partir del año 2007, se inició en la Región de Atacama un estudio de nuevas tecnologías que permitieran abordar, en forma eficiente y objetiva, el manejo del recurso hídrico a nivel predial, como complemento a los esfuerzos de inversión pública que realizaba el Estado a nivel extrapredial o de cuenca. Una vez generado y validado el conocimiento en unidades pequeñas, se implementó un programa de transferencia tecnológica en todo Atacama, ampliándose el año 2011 a la Región de O'Higgins, lo que incluyó el uso de sondas de capacitancia para el monitoreo de la humedad en el suelo de lectura discontinua en calicatas (TDR100, POGO, WET Sensor), en tubos de acceso (Diviner), de lectura continua (Enviroscan, Hydra Probe) y telemetría (Plus y plataforma Wiseconn). El control se complementó con el uso de la bomba de presión tipo Scholander móvil modelo Pump-up, usando valores de potencial xilématico relacionados con el déficit de presión de vapor como criterio de toma de decisión. Se logró instaurar la importancia del recurso hídrico y la incorporación de tecnología en el manejo agrícola, logrando ahorros de entre 20 a 50 % del uso de agua de riego, con una disminución proporcional de energía eléctrica, incrementando el potencial productivo y calidad de fruta. En muchas ocasiones, se estima equivocadamente que el éxito de un programa como éste depende solamente del acceso a nuevas tecnologías o al conocimiento generado por investigación de alto impacto, sin embargo, la experiencia ha demostrado que en la agricultura es fundamental complementar lo anterior con la adaptación a la realidad local, validación en terreno, transferencia tecnológica permanente, conocimiento práctico y respeto por la cultura en donde se enmarca la intervención.

Palabras clave: Sonda de capacitancia, FDR, TDR, humedad en suelo, manejo eficiente del agua de riego, frutales.

Abstract:

According to UNESCO, agriculture accounts for the 70% of global freshwater consumption, and Chile is one of the main fruit exporters worldwide. Through the use of Competitiveness and Innovation Funds, the Regional Center of Agronomic Studies of the University of Chile (UCHILECREA) has developed a technological package to face water scarcity. The package was designed to save irrigation water, and to improve fruit quality and productive capacity. The method included the use of soil water content capacitance probes (TDR100, POGO, WET sensor), access tubes' probes (Diviner), continuous measurement probes (Enviroscan, Hydra Probe) and telemetry (Plus and Wiseconn platform). Thus, the decision-making of irrigation frequency considers the maximum dynamic characteristics of the soil. Irrigation management was complemented with the use of a movable Scholander-like pressure bomb (Pump Up) using xylomatic potential as standard criteria. In addition, climatic information from meteorological stations was used. A technological transference team, constituted by agricultural engineers, developed an irrigation baseline and validated the study programs. Importance of hydric resources and incorporation of technology in agricultural management were established, generating 20 to 50% savings on irrigation water and electricity use. Better conditions of the radical system, an increase of the productive potential and fruit quality were also accomplished. Programs like this owe its success not only to the access to new technologies or investigation-generated knowledge, but also to a local environment adaptation, practical knowledge and respect for the culture in which the intervention is delimited.

Key Words: Capacitance probes, FDR, TDR, efficient management of irrigation water, fruit trees.

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro de Regional de Estudios Agronómicos UCHILECREA. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. rcallejas.uchilecrea@gmail.com; rcalleja@uchile.cl. www.uchilecrea.cl

² CEBAS, Murcia, España.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 70% del agua a nivel mundial es utilizada por la agricultura, siendo el factor de mayor importancia para la producción de fruta de alta calidad. Sin embargo, su óptimo manejo debe asegurar no solamente la obtención de producciones rentables, sino que debe contribuir a generar árboles capaces de producir de manera continua (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995), manteniendo un follaje y sistema radical eficiente que asegure un máximo potencial productivo (Callejas *et al.* 2009; Callejas *et al.* 2012).

En Chile, la zona productora de fruta se caracteriza por poseer excelentes condiciones climáticas, con precipitaciones concentradas en invierno, con la cordillera como un reservorio de agua en forma de nieve y una serie de cuencas que bajan de cordillera al mar con fuerte pendiente (Banco Mundial, 2011). Si bien existe una importante disponibilidad de agua para riego proveniente de cauces superficiales, se constata que cerca del 84% de ella se pierda en el mar por falta de infraestructuras de acumulación (embalses) y por otro lado en materia de aguas subterráneas, existe una situación generalizada de sobre-otorgamiento (CNR, 2013). La fruticultura en Chile representa un 4% del PIB del país (un 10% considerando a la agroindustria) (SNA, 2008) y generando más de 400 mil empleos en plena temporada. Se señala que los incrementos en el aporte de la agricultura al PIB hacia el año 2011, se debieron principalmente al buen desempeño de la fruticultura, en especial la exportación de arándanos, cerezas y uva de mesa (ODEPA, 2012). Es así como se ha constatado que las plantaciones de frutales se incrementan todos los años, destinados principalmente a exportación (SNA, 2013), cultivándose en las regiones de Atacama y O'Higgins, 11.232 y 75.238 ha de frutales, respectivamente. Si se entiende la fruticultura como un motor de la economía y de gran interés para el sector privado, es de esperar que la superficie siga aumentando y con ello el consumo de agua dulce para riego, compitiendo principalmente con el consumo humano y la minería.

La Dirección General de Aguas (DGA), organismo del Estado de Chile que se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico, ha propuesto la variación general de disponibilidad hídrica asociada al cambio climático según las proyecciones de estudios realizados por la Universidad de Chile para la Corporación Nacional de Medioambiente (CONAMA), señalando un importante déficit a nivel país (Banco Mundial, 2011). En la macrozona norte, donde se ubica Atacama, se ha determinado un déficit estructural que se incrementa exponencialmente en el tiempo (-397; -873 y -1.299 millones de m³/año, en 1996, 2010 y 2025; respectivamente) conformando un enorme desafío para el país si es que desea seguir desarrollando

la fruticultura y otras actividades económicas en la zona. Para el caso de la zona centro-sur, donde se ubica la región de O'Higgins, si bien el balance es positivo, muestra una disminución preocupante en el tiempo (16.462, 15.173 y 12.688 millones de m³/año, en 1996, 2010 y 2025; respectivamente).

Frente a estos grandes desafíos, es fundamental implementar estrategias o paquetes tecnológicos a macro escala considerando aspectos que relacionan el conocimiento científico, el mecanismo de transferencia tecnológica que responda a la realidad de la zona intervenida y su relación con aspectos culturales y económicos de los agricultores y otros actores relevantes del medio.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo fue disminuir el consumo de agua de riego intrapredial en huertos frutales. Los objetivos específicos propuestos fueron: a) implementar nuevas tecnologías a nivel predial, destinadas a objetivar el criterio de riego, b) disminuir el consumo de agua y por consecuencia, la energía eléctrica y c) generar un programa de transferencia tecnológica que asegure la adopción de la estrategia por parte de los agricultores.

ANTECEDENTES

Región Atacama

La Región de Atacama pertenece a la macrozona norte de Chile y se ubica entre 25°18' y 29° 43' latitud sur y entre los 68° 19' y 71° 30' de longitud oeste, alcanzando una superficie de 75.573,3 km² (Figura 1). Presenta un clima desértico (según clasificación de Köppen), con variaciones desde la costa a la montaña y, según lo señalado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2010), la totalidad de su superficie es clasificada como una zona árida considerando su régimen hídrico. Las precipitaciones son escasas, concentrándose principalmente en los meses de invierno, no superando los 100 mm año⁻¹ y variando su distribución según su cercanía al mar y altitud, situación que se determina por la influencia del Anticiclón del Pacífico (Juliá *et al.*, 2008). Las zonas agrícolas se localiza en 2 valles principales; Copiapó y Huasco. La cuenca del río Copiapó posee una superficie de 18.400 km² y este nace de la unión de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas (DGA, 2004a). El Valle de Huasco, que resulta de la unión de los ríos de El Tránsito y del Carmen, se localiza al sur de la Región de Atacama y su hoya hidrográfica es de 9.850 km² (DGA, 2004b).

En la cuenca del Copiapó existe un sobre otorgamiento del recurso hídrico y la demanda supera a la oferta existente, con niveles de recarga del acuífero inferiores a los volúmenes de extracción (Fuster *et al.*, 2009). En la cuenca del río Huasco aún no se da esta situación, sin embargo, el embalse

Santa Juana durante el periodo marzo 2013 a febrero 2014, presentó un 69,6% menos de su capacidad promedio de almacenamiento histórico según datos de la DGA (2014). Los cultivos principales de la Región de Atacama son la uva de mesa, con una superficie de 8.050,7 ha y el olivo, con una superficie de 2.417,1 ha. El 91,06% de las plantaciones tienen riego tecnificado, principalmente goteo (ODEPA-CIREN, 2013).

Región de O'Higgins

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, ubicada entre 33°51' y 35°01' de latitud sur y desde 70°02' de longitud oeste hasta el océano pacífico (Figura 1), se enfrenta un panorama difícil respecto del recurso hídrico, declarándose, durante la temporada 2011-2012, en la categoría de emergencia agrícola en 22 de sus comunas debido al déficit hídrico severo.

La región presenta un clima templado-cálido (según la clasificación de Köppen) con lluvias invernales y estación seca prolongada (7 a 8 meses), con precipitaciones variables desde la costa a Los Andes, las que van desde los 500 mm a los 2000 mm en la alta cordillera, respectivamente. Las últimas se concentran como precipitaciones nivosas

principalmente, las que se traducen en un gran reservorio de agua contenida en invierno, y que en primavera-verano se derrite y es utilizada por la región (INE, 2007). Según los datos proporcionados por la Red Agrícola FDF-INIA-DMC (Fundación para el Desarrollo Frutícola- Instituto de Investigaciones Agropecuarias- Dirección Meteorológica de Chile), las precipitaciones acumuladas de enero al mes de septiembre, entre el año 2011 al 2013, presentan un déficit del 58% en la precordillera, 47 % en valles interiores y 56% en los valles con influencia marina.

A nivel nacional, la VI Región presenta la mayor superficie de frutales con riego, con un total de 59.333,3 ha (27,4 % del total de hectáreas bajo riego a nivel nacional) (CIREN, 2003), de las cuales un 68,2 % están bajo riego por surco y tendido y sólo un 31,4 % con sistemas tecnificados (goteo, microaspersión y aspersión), lo que representa baja eficiencia en el uso del agua al momento de regar.

El sistema hidrográfico que abastece del recurso hídrico a la región está constituido por el Río Rapel y sus afluentes, los ríos Cachapoal y Tinguiririca. Dicho sistema de aguas, Rapel-Cachapoal y Tinguiririca, debe ser capaz de sustentar las diversas demandas de la región, como la producción de energía eléctrica, la industria, la minería, el consumo de agua por la población y la agricultura.

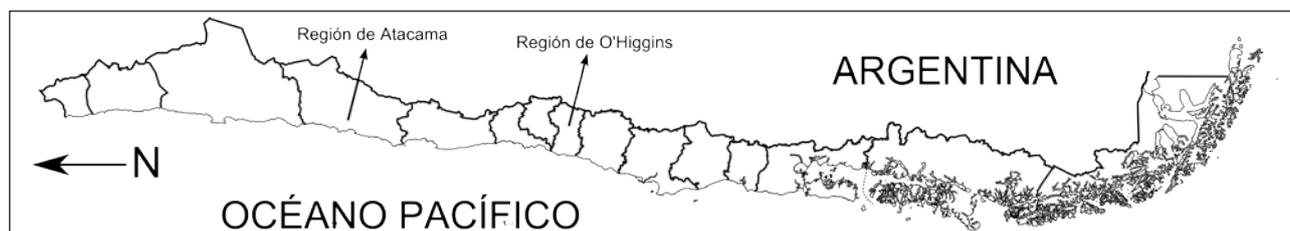


Figura 1. Ubicación de las Regiones de Atacama y O'Higgins.

Integración de tecnologías (Paquete tecnológico)

El diagnóstico realizado en el año 2005 respecto de los criterios utilizados para regar en Atacama, arrojó que un 75% de los productores utilizaban la observación de calicatas con diferentes grados de periodicidad, un 5% según la evapotranspiración (Eto de bandeja tipo A o estaciones meteorológicas) y un 20% replicaba o copiaba a otros productores vecinos, sobre todo a aquellos grandes que tenían un asesor técnico reconocido en el medio, quien utilizaba la observación de calicatas.

Observación de calicatas y determinación del contenido del agua al tacto. Esta técnica se comenzó a implementar masivamente hacia el final de la década de los años 80, como respuesta a los malos resultados que se lograron al utilizar variables climáticas (evapotranspiración de referencia, Eto; coeficiente de cultivo, Kc; evapotranspiración de cultivo, ETc) o tensiómetros para definir los criterios de riego. Si bien ayudó a mejorar en parte la gestión del riego, presenta importantes deficiencias: **1)**

es subjetiva, dado que la decisión del tiempo y frecuencia de riego se realiza sobre percepciones, **2)** ineficiente método para determinar el tiempo de riego al no determinar el frente de avance del agua, lo que favorece las pérdidas por percolación profunda, **3)** los datos, al no ser objetivos, no pueden ser guardados y utilizados para un análisis integral de la temporada, **4)** toda decisión requiere del administrador y/o asesor, demandando tiempo de ellos con un alto costo alternativo, **5)** para el productor es difícil delegar esta tarea a mandos medios calificados, **6)** no es posible compartir lo observado, dado que solamente se puede señalar; "había agua, estaba muy mojado, faltaba en un sector del bulbo de riego o el riego llegó al fondo de la calicata", **7)** se requiere volver a repetir todos los años la práctica de "calicateo" en todo el predio y **8)** la hechura manual de una calicata tiene un costo aproximado de entre US\$ 15 a 20 por persona, requiriéndose 2 personas para lograr 3 calicatas por día; presentándose como alternativa la inversión en una mini-excavadora.

Frente a este panorama, se definió la siguiente estrategia técnica: **(A)** determinaciones objetivas y discontinuas del contenido de agua del suelo y/o sales utilizando equipos de reflectometría en el dominio del tiempo, TDR (Time Domain Reflectometry) y reflectometría en el dominio de la frecuencia, FDR (Frequency domain reflectometry) (Campbell y Mulla, 1990; Charlesworth, 2000; Callejas *et al.* 2002; Evett *et al.*, 2002; Callejas *et al.* 2004; Martín de Santa Olalla *et al.* 2005; Callejas *et al.* 2006; Gálvez y Callejas, 2012), aprovechando las mismas calicatas realizadas por los productores y motivando a la incorporación gradual de nuevas tecnologías. Esta técnica permite presentar la información en forma gráfica facilitando la interpretación del contenido de agua del suelo y fortalecer el criterio de riego. Si bien es un avance, sigue presentando la debilidad de no permitir eficientemente, de acuerdo al desarrollo de la planta y evolución climática de la zona, determinar la frecuencia y tiempo de riego dado la carga de trabajo, costo y oportunidad de hechura de las calicatas **(B)** determinaciones objetivas y discontinuas del contenido de agua del suelo, utilizando sondas Diviner (Sentek Sensor Technologies, Australia), permitiendo disminuir la construcción de calicatas, **(C)** control del riego con sondas de capacitancia de lectura continua EnviroScan (Sentek Sensor Technologies, Australia), plataforma Plus y/o Wiseconn. La selección de estos equipos se basó en la literatura científica, antecedentes de uso en terreno y durabilidad (Dean *et al.* 1987; Paltineanu y Starr, 1997 y Starr y Paltineanu, 1998; Evett *et al.*, 2002; IAEA, 2008; Starr *et al.* 2009; Vera *et al.* 2010; Callejas *et al.*, 2013). Adicionalmente y para algunos casos, se utilizó el equipo Hydra Probe Soil Sensor (STEVENS, 2007; López Riquelme *et al.* 2009), **(D)** se complementó la información y toma de decisión utilizando evaluaciones de ETo (Penman-Monteith) proveniente de estaciones meteorológicas

(Allen *et al.* 1998; Morales, 2008; Santos *et al.* 2010), **(E)** finalmente, apoyo permanente a los productores fortaleciendo la capacitación y transferencia tecnológica (Callejas *et al.*, 2011; Universidad de Chile, 2012).

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en las regiones de Atacama (valles de Copiapó y Huasco), iniciado el año 2007 y O'Higgins, iniciado el año 2011. En Atacama, se trabajó con olivos y vid de mesa, mientras que en O'Higgins, con diez especies; arándano, cerezo, ciruelo europeo, duraznero, frutilla, kiwi, manzano, naranjo, nogal y uva de mesa. El equipo de trabajo estuvo conformado por profesores especialistas de la Universidad de Chile, cerca de 8 Ingenieros Agrónomos, mucho de ellos con maestrías en temáticas relacionadas con la problemática, encargados de la capacitación y transferencia tecnológica, más el apoyo de a lo menos 15 alumnos de pre y post grado, quienes realizaron sus memorias de título y/o tesis de grado en temáticas relacionadas.

Tecnología. La instrumentalización para evaluaciones del contenido de agua en el suelo de lectura discontinua en calicata (Figura 2), fueron el WET Sensor (Delta T), TDR100 (Campbell Scientific) y Pogo Portable Soil Sensor (Stevens). Para evaluaciones de lectura discontinua, a través de tubos de acceso, Diviner (Sentek). En las evaluaciones de lectura continua; sonda Enviroscan (Sentek) e Hydra Probe (Stevens). A nivel de planta, se utilizó la cámara de presión tipo Scholander, modelo Pump-Up (PMS Instruments). A nivel climático, información proveniente de estaciones meteorológicas instaladas en los predios e información de red FDF (Fundación para el Desarrollo Frutícola).

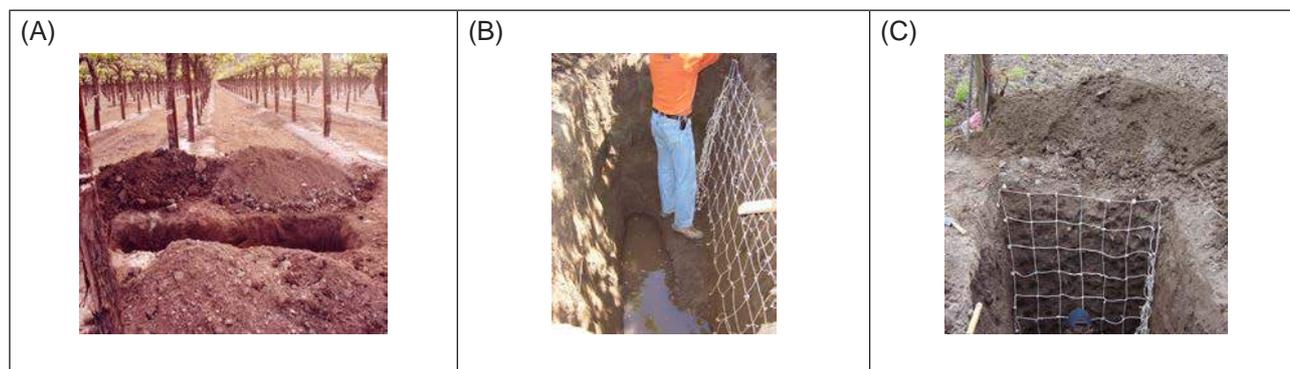


Figura 2. Calicata utilizada para definir criterio de riego (A). Implementación de evaluación sistemática con sondas (B y C).

Unidades de control de la frecuencia y tiempo de riego. La estrategia involucró la instalación y puesta a punto, a modo de plataforma basal, de una red calibrada de sondas Enviroscan en uva de mesa (19), olivos (2), arándanos (2), cerezo (4), ciruelo europeo

(4), duraznero (6), frutilla (1), kiwi (5), manzano (2), naranjo (1) y nogal (2), así como 2 unidades Hydraprobe de apoyo en uva de mesa en suelos salinos. El uso práctico de esta tecnología se realizó de acuerdo a Fares y Alva (2000), Hanson *et al.* (2000), Dukes *et al.* (2007) y Callejas *et al.* (2013). En

la Región de Atacama, las sondas están sobre suelos cuyas texturas varían de franco arenoso a franco, con una profundidad ligera a moderada (máximo 1 m), poco estratificado, con ligera pedregosidad en el perfil y con topografía suavemente ondulada a plana. La salinidad o acumulación de sales solubles en el perfil del suelo, es un problema frecuente en los huertos, especialmente en el Valle de Copiapó, con valores de CE de entre 1 a 3,5 dS m⁻¹. Las sondas de la Región de O'Higgins, se encuentran instaladas en suelos que en su mayoría son de textura franco arcillosa a arcillosa. Corresponden a suelos de topografía plana, profundos, poco estratificados y escasa presencia de piedras en el perfil de suelo.

Unidades de control ampliado. Se amplió la base de datos para la toma de decisión, instalando en diferentes predios tubos de acceso para el equipo Diviner. Adicionalmente, se implementó un sistema de verificación periódica y discontinua del contenido de agua en calicata (2 m de largo y 1,5 m de profundidad), construidas en cada ocasión perpendicularmente a la línea de plantación y a 30 cm desde el tronco de las plantas (Callejas *et al.* 2012), utilizando los equipos TDR100 y Pogo. Como complemento, se apoyó con evaluaciones del potencial xilemático (Navarrete *et al.*, 2010; Gálvez., 2011) usando la cámara de presión modelo Pump-Up, sobre todo en condiciones de suelo de texturas gruesas donde los otros equipos son poco eficientes. Finalmente, se utilizó la evapotranspiración de referencia y la pluviometría proveniente de estaciones meteorológicas, información de apoyo a la interpretación de las lecturas de las sondas de los softwares IrriMax y DropControl.

Evaluaciones. Se consideraron las siguientes: a) volumen de agua en m³/ha/año; b) costo de la energía eléctrica ocupada por ha, c) contenido de agua en calicata, d) evolución del contenido del agua en el suelo, e) evapotranspiración de referencia, f) potencial xilemático, g) producción por hectárea y h) calidad de la fruta, cuando se requirió.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

A modo de caracterización climática de los sitios donde se trabajó, se presenta la evolución de la ET_o anual acumulada en localidades representativas de cada región. La ET_o fue ingresada en el software Irrimax y utilizada como herramienta de apoyo para definir los umbrales, indicadores o parámetros de referencia, denominadas en el uso de sondas de capacitancia de lectura continua como "líneas de gestión" del riego, definidas de acuerdo al análisis de la dinámica de extracción de agua por las plantas (Callejas *et al.* 2013), de manera de facilitar la interpretación de los datos generados por las sondas Enviroscan. Adicionalmente y utilizando los K_c de

los diversos frutales (Zúñiga, 2013), se calculó la ET_c como complemento al trabajo realizado con las sondas de capacitancia.

Para el 90% de la de superficie de Atacama bajo estudio, la ET_o presentó una conducta muy similar en los diferentes años, lo que permitió generar un sistema predictivo, Figura 3A (Morales, 2008). Mediante esta herramienta, al ingresar la ubicación georreferenciada del predio, permitió a los productores que no tienen una estación meteorológica cercana obtener una buena aproximación de la ET_o de la temporada. Para el caso de O'Higgins, en la Figura 3B se muestra la ET_o para 3 localidades en esta región, la que se caracteriza por ser variable entre ellas, sobre todo en primavera, debido a los cambios permanentes que pueden ser observados en el clima local, recomendándose el uso de la ET_o proveniente de estaciones meteorológicas propias o de la red estatal, en la medida que el punto de monitorización se encuentre cerca del predio.

Desarrollo de las estrategias que conforman el paquete tecnológico

Unidades de control de la frecuencia y tiempo de riego. Se optó por no hacer cambios radicales en los criterios de manejo del riego, generando registros objetivos de lo que se venía haciendo en forma tradicional (mostrando el exceso de agua) y contrastando esta información con la literatura. En la Figura 4A y a modo de ejemplo, se presenta el comportamiento de los registros de riego y contenido de agua del suelo en el primer año de trabajo para una unidad demostrativa (uva de mesa var. Flame Seedless, Atacama), dejando claramente de manifiesto que las plantas se desarrollaban permanentemente bajo condiciones de exceso de humedad y ratificando que esta situación era una de las principales razones de la poca abundancia, en el bulbo de riego, de raíces finas y con esto menor potencial productivo (Callejas *et al.*, 2009; Callejas *et al.*, 2012), generándose consumos de agua de riego al año de entre 14.000 a 18.000 m³.ha⁻¹. Con esa información y sabiendo que las plantas no se encontraban en una situación óptima (Malladi y Burns, 2007), se planteó una estrategia destinada a cambiar la frecuencia y tiempo de riego.

El segundo año, se reforzó la estrategia señalando que si se sumaban a esta tarea era posible, adicionalmente al ahorro de agua, bajar los costos de producción a través del ahorro de energía eléctrica, motivando a muchos a realizar los esfuerzos y a comprometerse con el proyecto. En la Figura 4B, se puede observar el comportamiento de la actividad de las mismas plantas de la Figura 4A, una vez implementadas las frecuencias y tiempos de riego óptimos para esa condición en particular, de acuerdo a las líneas de gestión definidas previamente. A diferencia del comportamiento del primer año (Figura 4A), claramente las vides se desarrollaron bajo adecuadas

condiciones de equilibrio entre la disponibilidad de agua y oxígeno, permitiendo un mejor comportamiento de las plantas, lo que es ratificado por Sellés *et al.*

(2000). En este sentido, el contenido de agua no debe ser excesivo, debido a que se dificulta la difusión de oxígeno en el suelo, afectando la respiración de las raíces (Ferreira *et al.*, 2001).

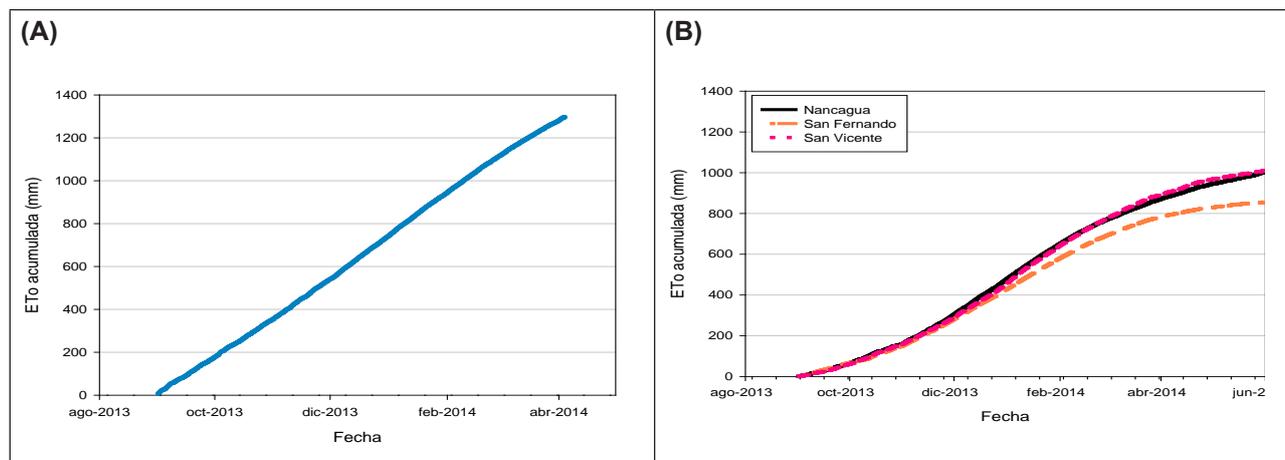


Figura 3. (A) ETo acumulada en Atacama basada en modelo predictivo (Morales, 2008). (B) ETo acumulada en O'Higgins, sectores de Nancagua, San Fernando y San Vicente.

Claramente, el trabajo de 8 años de UCHILECREA ha demostrado que el uso de estos equipos permiten lograr en forma práctica un registro eficiente del comportamiento del agua de riego en el suelo, controlar la actividad de las plantas y efectivamente, ahorrar agua de riego e incrementar la productividad de este recurso, sobre todo en zonas desérticas o que estén sufriendo periodos sequías eventuales. Estos resultados concuerdan con la información presentada por Orozco (2010).

Unidades de control ampliadas. Apesar que la sonda Diviner 2000 se limita a mediciones discontinuas, logró ser una herramienta de apoyo importante permitiendo determinar los zonas del suelo donde los frutales extraen el mayor porcentaje de consumo diario de agua (Hidalgo *et al.*, 2003; Navarrete, 2012); efectividad de la apertura del bulbo de suelo mojado en un evento de riego, instalando una serie de tubos de acceso perpendiculares a la hilera de plantación (Figura 5), e incluso relacionar el contenido de agua del suelo con respuestas fisiológicas de la planta (Olivo *et al.*, 2009; Egea *et al.*, 2009). Adicionalmente, se ratificó que es un instrumento que entrega lecturas confiables respecto del contenido de agua del suelo (Evet *et al.*, 2002; Navarrete, 2012).

Uno de los grandes desafíos que se enfrentó en este trabajo, fue desarrollar una metodología práctica y objetiva que permitiera mejorar la forma tradicional del uso de la calicata, empleada en forma importante por agricultores, técnicos y asesores. Se estimó que si esta técnica era mejorada, más productores se sumarían a la tarea de ahorrar agua sin el miedo de perder potencial productivo de sus frutales. Con el objetivo de ocupar las mismas calicatas utilizadas por los agricultores, se implementaron los siguientes cambios: 1) Realizar las calicatas justo antes de un

nuevo riego, de manera de ajustar la frecuencia y posteriormente a un riego, con el objetivo de evaluar la eficiencia del tiempo de riego. Este cambio, aunque sencillo, fue muy importante dado que lo tradicional era hacer la calicata cuando se pudiera o por calendario (ej: todos los miércoles o cuando podía venir el técnico o asesor). 2) En la pared de la calicata se procedió a cuadricular el suelo o usar una red de 20 x 20 cm (Figura 2), de manera de realizar una evaluación sistemática del contenido de agua en el bulbo de suelo mojado, utilizando equipos TDR o FDR. 3) Los datos se registraban en una planilla de cálculo (Microsoft Excel 2003) y posteriormente se transformaban en información de fácil interpretación por parte de los agricultores a partir de una gráfica de contorno (Systat Software Sigma Plot 11, Figura 6). Así, se pudo definir el tamaño del bulbo de suelo mojado, la eficiencia del sistema de riego, se determinó zonas saturadas entre riego o sectores totalmente limitados de agua, condiciones que asociadas a la presencia de raíces, permitieron mejorar los criterios de riego.

A modo de ejemplo y para un caso en Ciruelo Europeo, en la Figura 6A se observan los dos bulbos de suelo mojado (dos líneas de gotero) pero sin un traslape suficiente, generando un sector seco que inducía estrés hídrico, el que fue corroborado por evaluaciones del potencial xilemático relacionados con el déficit de presión de vapor (DPV), arrojando valores mayores a -0,12 MPa. Con los datos, es posible estimar el momento del riego atendiendo el concepto de "déficit de humedad admisible" (Castilla y Montalvo, 2005). Para esto, la capacidad de campo sonda (CCs; Callejas *et al.*, 2013) se determinó evaluando con los equipos en invierno (Figura 6B), sin transpiración y mínima evaporación desde la superficie del suelo después de una lluvia abundante o un riego profuso (Veihmeyer y Hendrickson, 1950), para asegurar una adecuada dotación de agua, sobre todo en áreas con

bajas precipitaciones. Posteriormente, integrando los análisis de textura de suelo y su interpretación con programa Soil Water Characteristics (Saxton *et al.*, 2006), considerando información bibliográfica

(Moya, 2009), las líneas de gestión obtenidas desde las sondas y experiencia práctica de las evaluaciones de huertos productivos exitosos y la ETo, se definió el umbral de riego, aportando una metodología de toma de decisión más objetiva y con fundamento.

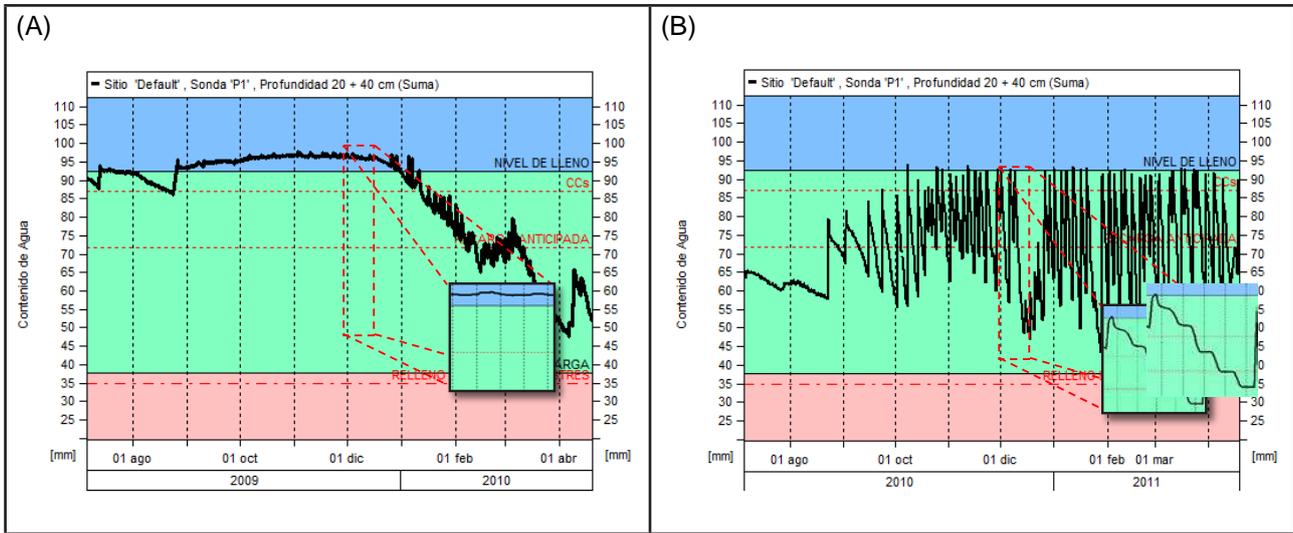


Figura 4. A) Evolución del contenido de agua en el suelo, en el primer año y B) segundo año, evaluado con la sonda Enviroscan Plus y analizados mediante el software Irrimax; uva de mesa, var. Flame Seedless, Atacama.

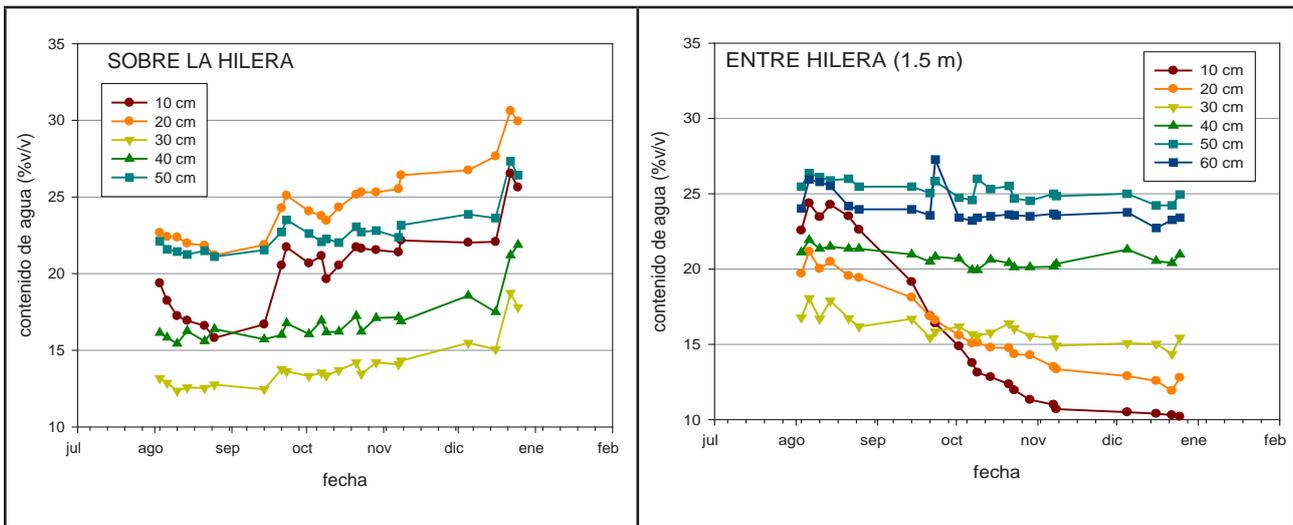


Figura 5. Evolución del contenido de agua del suelo en la sobre hilera y la entre hilera, evaluado con Diviner, suelo franco arenoso, Red Globe, año 2009, Región de Atacama.

Luego de varios años de trabajo en terreno y de mejoramiento de esta metodología, podemos rescatar una serie de ventajas: a) Permite generar información que es factible de ser almacenada digitalmente y utilizada cada año para evaluar el comportamiento de los rendimientos y calidad de la fruta, fortaleciendo la gestión predial, b) efectivamente se pasa de una evaluación subjetiva, con un sin número de desventajas, a una objetiva y basada en cifras numéricas, facilitando los cálculos y generación de índices, c) fortalece, amplía y valida

la información obtenida por las sondas de lecturas continua Enviroscan e Hydra Probe, d) motiva a los productores a invertir en tecnologías para ahorrar recurso hídrico, dado que les permite ver imágenes (como una fotografía) del comportamiento del riego, transformándose en una poderosa herramienta de capacitación, formación y transferencia tecnológica y e) permite asociar el comportamiento del bulbo de suelo mojado con la cantidad, calidad y distribución de las raíces en el suelo.

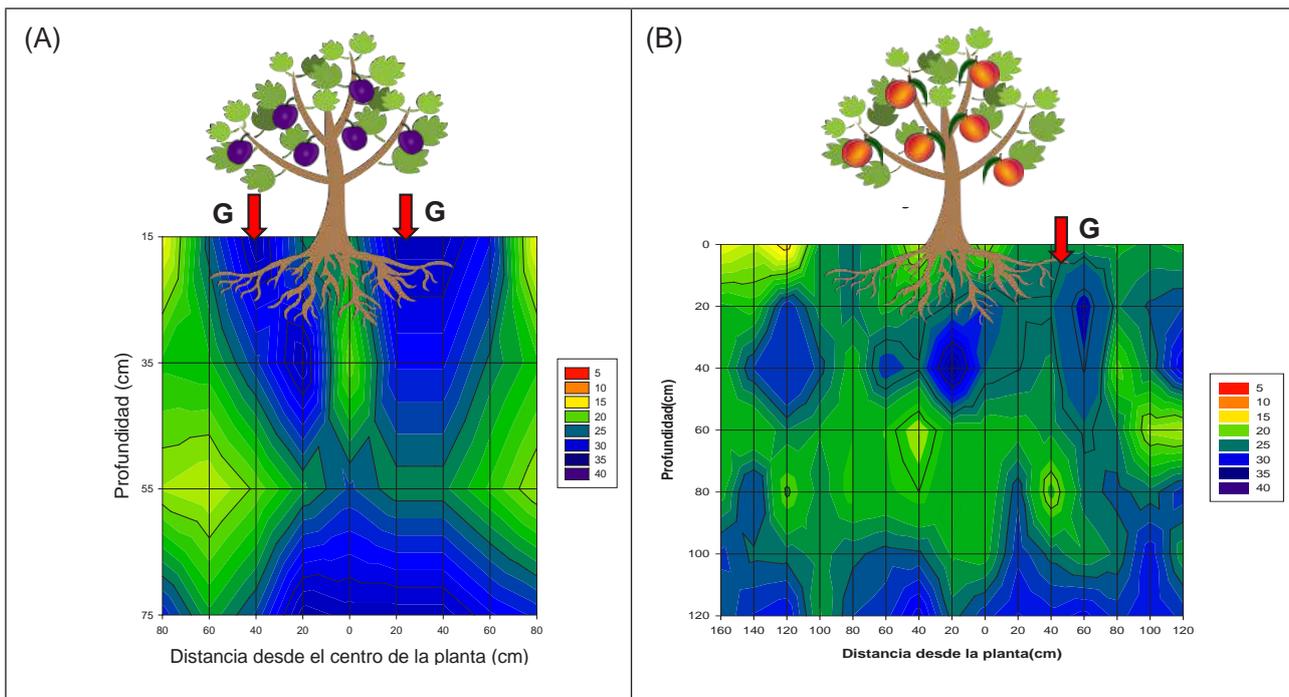


Figura 6. (A) Contenido de agua del suelo (% volumétrico) evaluado con equipo TDR100 en calicata, ciruelo europeo. (B) Determinación de capacidad de campo sonda (CCs) a partir de evaluaciones realizadas en invierno con equipo TDR100, en durazneros (G significa goteros).

Mediciones del potencial xilemático en relación al déficit de presión de vapor (DPV).

Se estimó necesario, como complemento a las otras evaluaciones, implementar una alternativa a nivel de planta de manera de apoyar la toma de decisión, teniendo en cuenta que en la mayoría de los frutales lo central, del punto de vista de la calidad de exportación, es el tamaño de los frutos debiendo prevenir todo tipo de indicio de estrés hídrico a nivel de planta. Otro punto importante, era el hecho de tener huertos en suelos de texturas gruesas, con piedras o exceso de arena en el perfil de suelo, lugares donde las sondas de lectura continua y discontinua en calicata presentaron un comportamiento ineficiente. Dado que la gran mayoría de las técnicas a nivel de plantas carecen de sensibilidad en la detección del estrés hídrico o presentan una alta variabilidad, lo que las hace poco confiables como programadores del riego (Naor, 2008), se optó por el potencial hídrico xilemático evaluado a mediodía (McCutchan y Shackel, 1992; Naor *et al.*, 1999; Choné *et al.*, 2001; Shackel *et al.*, 2000; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005; Ferreyra *et al.*, 2006; Doltra *et al.*, 2007; Naor, 2008; Acevedo-Opazo *et al.*, 2010; Stewart *et al.*, 2011), usando la cámara de presión modelo Pump-Up (PMS instruments) y relacionando los valores con el DPV, generando así los criterios de riego o la determinación de períodos de estrés hídrico (Gálvez *et al.*, 2010a, 2010b; Gálvez, 2011; Navarrete *et al.* 2010; Navarrete, 2012). A modo de ejemplo se presenta en la Figura 7 y Tabla 1, uno de los estudios en uva Sultanina, portainjerto Freedom,

en Atacama. Se observa la línea de referencia definida de acuerdo a la metodología de Shackel *et al.*, 2000 y Gálvez *et al.*, 2010a y claramente, para dos tratamientos, la utilización de un exceso de agua al inicio de la temporada (meses de octubre y noviembre) optimizándose el riego a partir de diciembre en adelante.

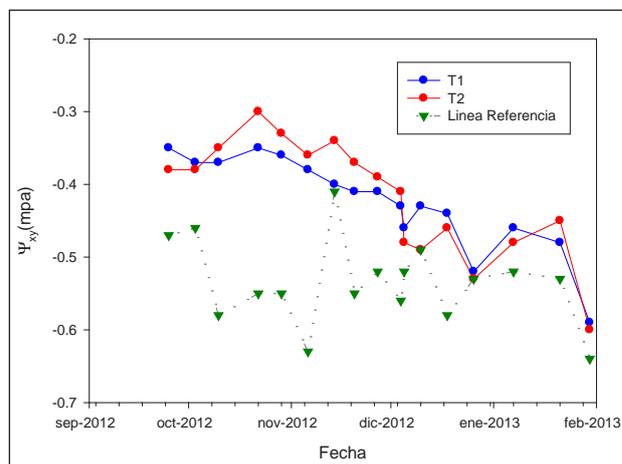


Figura 7. Línea de referencia de potencial xilemático (definida de acuerdo a la metodología de Shackel *et al.*, 2000 y Gálvez *et al.*, 2010a) y comportamiento de los tratamientos T1 (riego con criterio tradicional) y T2 (riego con criterio basado en líneas de gestión), en función del avance en la temporada. Uva Sultanina, portainjerto Freedom, región de Atacama.

Tabla 1. Evaluaciones de cosecha para los tratamientos T1 (riego con criterio tradicional) y T2 (riego con criterio basado en líneas de gestión)

Tratamiento	Volumen de agua aplicada (m ³ ha ⁻¹)	Producción (kg planta ⁻¹)		Peso de baya		Diámetro ecuatorial		Sólidos solubles totales		Acidez de titulación		SS/AT	
T1	10.239	25,37	a	7,43	a	21,84	a	16,10	a	0,95	a	17,11	a
T2	7.752	25,35	a	7,53	a	22,00	a	16,00	a	0,84	a	19,40	a

Ahorro de agua de riego y energía eléctrica. Para el caso de Atacama, se pudo reducir el consumo de agua de riego de entre 20 a 50% respecto a su uso original (Figura 8), con un ahorro de energía proporcionalmente similar valorizado de entre 200 a 1000 US\$/ha. Hubo productores que mencionan haber realizado un menor uso de fertilizantes (entre 20 a 40%) por menores niveles de percolación profunda, situación que debe ser validada de acuerdo al comportamiento de las plantas a largo plazo.

En la Tabla 2 y a modo de ejemplo para Atacama y de acuerdo a Catalán *et al.* (2006), se presentan indicadores para 8 ha en vid de mesa, variedad Red

Globe. Claramente se logró optimizar la eficiencia del uso del agua, así como una mayor eficiencia monetaria de este recurso gracias al incremento de los rendimientos (ej: 22.140 a 31.570 kg ha para el 2008 y 2001, respectivamente) y calidad de la fruta (ej: 50, 30 y 20% a 70, 18 y 12% de fruta grande, mediana y chica para el 2008 y 2011, respectivamente). Esta información deja de manifiesto que la óptima implementación de tecnología no solamente ayudará a optimizar el consumo de agua de riego, bajar el consumo de energía y ahorrar fertilizantes; sino que tendrá un importante impacto sobre la competitividad de los agricultores.

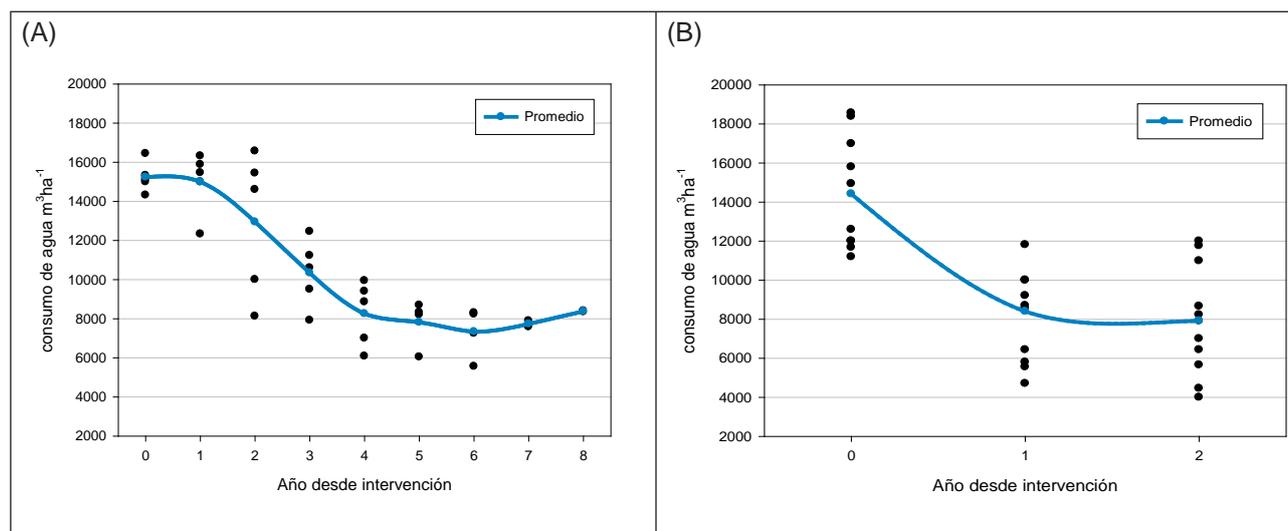


Figura 8. Comportamiento decreciente del promedio de consumo de agua en m³ha⁻¹ en uva de mesa, 8 años de intervención (A) y para un grupo más reciente de 11 productores con 2 años de intervención (B), mediante el paquete tecnológico de ahorro de agua de riego, Región de Atacama.

Tabla 2. Determinación de indicadores del uso del agua para 8 ha de Red Globe, Atacama. Eficiencia del uso del agua (EUA) en kg m⁻³ y eficiencia monetaria del uso del agua (EMUA) en US\$ m⁻³.

Año	2008	2009	2010	2011
EUA (kg m ⁻³)	1,5	1,9	2,8	3,8
EMUA (US\$ m ⁻³)	2,6	3,4	5,3	7,4

Para el caso de O'Higgins (Tabla 3), los resultados han sido similares, a pesar del menor tiempo de trabajo y las condiciones particulares de esta región. Con el pasar del tiempo, junto al ahorro de agua y energía se están observando cambios positivos en

los rendimientos y calidad del producto cosechado, como por ejemplo el color de cubrimiento en las uvas (Navarrete, 2012), lo que ha motivado seguir avanzado en esta línea de trabajo, considerando que es fundamental incrementar los potenciales

de rendimiento, calidad de la fruta producida y las ganancias por volumen de agua aportado (Sánchez et al., 2006), fundamental para mantener la competitividad frente a un incremento permanente de los costos, principalmente del recurso humano, energía, fertilizantes, entre otros.

Finalmente, con normalidad se estima de manera equívoca que el éxito de un programa como éste solamente depende del acceso a nuevas tecnologías o al conocimiento generado por investigación de alto impacto, sin embargo, la experiencia ha demostrado que en la agricultura es fundamental complementar lo anterior con la adaptación a la realidad local, validación en terreno, transferencia tecnológica permanente, conocimiento práctico y respeto por la cultura en donde se enmarca la intervención (Callejas y Mora, 2014).

CONCLUSIONES

Se concluye que el uso de tecnología permitió, en una primera fase, advertir objetivamente sobre el ineficiente uso del agua de riego en frutales, logrando en una segunda fase de trabajo, facilitar y fortalecer la

estrategia de manejo intrapredial implementada a nivel macro, destinada a hacer un uso eficiente del recurso hídrico en frutales, rebajando el consumo de agua de riego y electricidad de entre un 20 a un 50%. Mediante las mesas de trabajo, se realizó capacitación en el uso e interpretación de la información, fortaleciendo la adopción de la tecnología y la ampliación hacia otros productores fuera de grupo inicial y en otras regiones del país (Ej: Región de Coquimbo, Proyecto FIC-Capel, 2014). Las solicitudes, adicionales a las incluidas en los proyectos, de más actividades de formación y talleres de capacitación en esta temática, es una muestra que la tecnología llegó para quedarse en la agricultura nacional e inclusive, a nivel de programa de estudio de la Facultad de Ciencias Agronómicas se ha creado una nueva asignatura en esta temática, de manera de entregar las herramientas a los nuevos ingenieros agrónomos. Finalmente, se pudo concluir que para llegar a generar una intervención exitosa, no solamente se requiere moderna tecnología o conocimiento de frontera, sino, la capacidad de integrar habilidades a través de la transferencia tecnológica de acuerdo al entorno cultural donde es requerida.

Tabla 3. Región de O'Higgins; ahorro de agua de riego en frutales.

Especie	Productor	Agua aplicada sin tecnología (m ³ /ha/año ⁻¹)	Agua aplicada con tecnología (m ³ /ha)	Ahorro agua (%)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Cerezo	Productor 1	10.775	7.389	31,4	9.200
	Productor 2	9.036	7.461	17,4	2.900 (2da producción)
Ciruelo Europeo	Productor 5	5.704	4.548	20,3	40.500
Duraznero	Productor 3	7.684	4.580	40,4	28.560
	Productor 4	9.957	4.963	50,2	54.500
Manzano	Productor 6	12.286	8.087	34,2	93.700
	Productor 7	9.094	6.520	28,3	50.000
Uva de mesa	Productor 8	7.000	3.489	50,2	32.947
	Productor 9	7.900	4.478	43,3	28.673
	Productor 10	4.580	2.620	42,8	27.800

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo-Opazo, C., S. Ortega-Farías, and S. Fuentes. 2010. Effects of Grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 97 (7): 956-964.

Allen, R., L. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, Italia 300 p.

Banco Mundial. 2011. Chile. Diagnóstico de la gestión del recurso hídrico. Departamento de medioambiente y desarrollo sostenible Región para América Latina y el Caribe. 78 p.

Callejas, R., C. Benavides y E. Kania. 2002. Control y seguimiento de los niveles de sales en el suelo a través de lavado invernal, en parronales de la parte alta del Valle de Copiapó, III Región. 53º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 3-6 de diciembre 2002, Santiago, Chile. *Simiente* 72:116 p.

- Callejas, R. J. T. Wieczorek y C. Kusch. 2004. WET Sensor: Desarrollo de una metodología de evaluación en calicata, de la humedad y la conductividad eléctrica del suelo. 56º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 19-22 de octubre 2004, Valdivia, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Callejas, R., J. T. Wieczorek y C. Benavides. 2006. Uso del sensor "Soil Moisture Soil Moisture WET" (DELTA T), en el seguimiento de lavado de sales del suelo, mediante riego por goteo y tendido, en un parronal de uva de mesa en la Tercera Región. 57º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 18-20 de octubre 2006, Santiago, Chile. *Simiente* 76:75 p.
- Callejas, R., P. Canales and V. García de Cortázar. 2009. Relationship between root growth of 'Thompson Seedless' grapevines and soil temperature. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69:496-502
- Callejas, R., G. Reginato, R. Gálvez y P. Pino. 2011. Uso eficiente del agua de riego y mejoramiento de la competitividad de la fruticultura de Atacama. Acciones de UCHILECREA. *Revista Antumapu, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile*. 9: 33-36.
- Callejas, R., E. Rojo, C. Benavides y E. Kania. 2012. Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de vides de mesa. *Agrociencia* 46: 23-35.
- Callejas, R., J. Navarrete y M. Rioseco. 2013. Líneas de Gestión del Riego: Umbrales para Interpretar los Datos de Humedad del Suelo Registrados por Sondas de Capacitancia. Universidad de Chile, *Revista Electrónica Antumapu Profesional*. Volumen 2, número 3. 17 p. 10/10/2013. <http://www.antumapuprofesional.cl/articulos.html>.
- Callejas, R. y M. Mora. 2014. Gotas de información. *Revista Mundoagro*, 55: 56-58 p.
- Campbell, G. S. and Mulla, D. J. 1990. Measurement of soil water content and potential. In B. A. Stewart and D. R. Nielsen, co-ed. *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy N. 30, ASACSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Castilla N. y T. Montalvo. 2005. Programación del riego. In: *Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Cadahía C. (Ed). 3a edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Pág. 277-298.
- Catalán, I. E., G. González, J. Estrada y D. García. 2006. Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura Técnica en México* (32) 3 p. 333-340.
- Comisión Nacional de Riego (CNR). 2013. *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 – 2025*.
- Charlesworth, P. 2000. Soil water monitoring. Number one. *Irrigation Insights*. Land and Water Australia. 96 pp.
- Choné, X., C. Van Leeuwen, D. Dubourdieu, and J.P. Gaudillere. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of Grapevine water status. *Annals of Botany* 87 (4): 477-483.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2003. *Boletín frutícola* n° 9: Métodos de riego. Chile. 12/04/2014. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/bdirenci/index/assoc/HASH014e.dir/bolfrut9.pdf>. ciren@ciren.cl.
- Dean, T. J., J. P. Bell and A. J. B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. 1. Sensor design and performance. *J. Hydrol.* 93, 67–78.
- Dirección General de Aguas. 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de aguas según objetivos de calidad: cuenca del río Copiapó. Cade Idepe Consultores. Chile. 12/04/2014. http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Copiapo.pdf. ffernandez@mma.gob.cl.
- Dirección General de Aguas. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de aguas según objetivos de calidad: cuenca del río Huasco. Cade Idepe Consultores Chile. http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Huasco.pdf. ffernandez@mma.gob.cl.
- Dirección General de Aguas. 2014. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. *Boletín DGA* n° 430, febrero de 2014. 12/04/2014. <http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin022014.pdf>.
- Doltra, J., J.A. Oncins, J. Bonany and M. Cohen. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* 25 (4): 351-359.
- Dukes, M.D., Carpena-Muñoz, R., Zotarelli, L., Icerman, J. y Scholberg, J.M. 2007. Soil moisture-based irrigation control to conserve water and nutrients under drip irrigated vegetable production. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 8: 239 - 236.
- Egea, G., M. González-Real, A. Baille, P. Nortés, P. Sánchez-Bel, R. Domingo. 2009. *Agricultural Water Management* 96 (2009): 1605–1614.
- Evetts, S., B. Ruthardt, S. Kottkamp, T. Howell, A. Schneider and J. Tolck. 2002. Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance and TDR methods. Paper n° 318, 8 p. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand.
- Fares, A y A.K. Alva. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science* 19 (2): 57-64.
- Ferreira R., G. Sellés y I. Sellés. 2001. Riego deficitario controlado en uva de mesa. Instituto de

- Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA No 60. Santiago de Chile. 44p.
- Ferreira, R., G. Sellés, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz and V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7): 1109-1118.
- Fuster, R., González, L., Morales, L., Cerda, C., Hernández, J., Sotomayor, D., Lillo, G., González, M. y Escobar, C. 2009. Estudio Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile. Informe final. Capítulo 3: Los recursos hídricos en Chile. 58-266.
- Gálvez, R. 2011. Evaluación del uso conjunto del potencial hídrico xilemático y el déficit de presión de vapor en el manejo del riego en vides de mesa. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 59 p.
- Gálvez, R., R. Callejas y G. Reginato. 2010a. Metodología de la medición del potencial xilemático para su uso en el control del riego en vides de mesa de la región de atacama. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Gálvez, R., R. Callejas, G. Reginato y J. Vera. 2010b. Comparación de tres indicadores fisiológicos del estado hídrico en vid de mesa variedad Red Globe. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Gálvez, R. y R. Callejas. 2012. Comparación de dos sondas FDR en la estimación de la conductividad eléctrica del suelo en el Valle de Copiapó. XXº Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 19-22 de octubre 2004, Valdivia, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Hanson, R., Orloff, S. y Peters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54: 38 – 42.
- Hidalgo, J., M. Pastor y J.C. Hidalgo. 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 6: 171 – 176.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2007. División Político y Administrativa y Censal. Santiago, Chile. . 10/03/2014. http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/territorio/division_politico_administrativa/pdf/DPA_COMPLETA.pdf. ine@ine.cl.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2008. Field Estimation and Soil Water Content. A Practical Guide to Methods, Instrumentations and Sensor Technology. Training Course Series 30. Vienna. Austria. 131 p.
- Juliá, C., Montecinos, S. y Maldonado A. 2008. Características Climáticas de la Región de Atacama. En: FA. Squeo, G. Arancio, J.R. Gutierrez (eds.). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Region de Atacama. Ediciones Universitarias de La Serena. La Serena, Chile, pp: 25-42.
- López Riquelme, L.A., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A. y Vera, J.A. 2009. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture* 68 (1): 25 - 35.
- Malladi, A. and J. K. Burns. 2007. Communication by plant growth regulators in roots and shoots of horticultural crops. *HortScience* 42(5):1113-1117.
- McCutchan, H. and K.A. Schackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in Prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 607-611.
- De Santa Olalla, Martín, Mañas, F., P. López y A. Calera. 2005. Agua y Agronomía. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 606 p.
- Morales, L. 2008. Evapotranspiración. In. Nodo de Riego: Difusión y transferencia tecnológica para el uso eficiente de agua de riego en la región de Atacama. Proyecto co-financiado por el Gobierno Regional de Atacama a través de Innova Chile de CORFO. Editado por Callejas y Reginato. 4 p. (formato de citas)
- Moya, J.A. 2009. Riego localizado y fertirrigación. 4a edición. Ediciones Mundi- Prensa. Madrid. 575 p.
- Naor, A., I. Klein, H. Hupert, Y. Grinblat, M. Peres and A. Kaufman. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of American Society of Horticultural Science* 124 (2): 189-193.
- Naor, A. 2008. Water stress assessment for irrigation scheduling of deciduous trees. *Acta Horticulturae* 792: 467-481.
- Navarrete, J., R. Callejas y O. Seguel. 2010. Efecto de distintos criterios de riego sobre parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad Red Globe. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Navarrete, J. 2012. Efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad red globe. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 73 p.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2012. Macroeconomía y agricultura chilena. 4/11/2013. http://www.df.cl/prontus_df/site/artic/20120612/asocfile/20120612171639/macroeconom_a_y_macroeconom__a_y_agricultura_de_abril_de_2012.pdf.

- Olivo, N., J. Girona and J. Marsal. 2009. Seasonal activity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Science* 27(2): 175 – 182.
- Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura, UNESCO. 2010. Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe. Proyecto “Elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe”. Documentos técnicos del PHI-LAC, N°25. Montevideo, Uruguay. 48p.
- Orozco, A. 2010. Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia. *Aqua-LAC - Vol. 2 - No 1 - Mar. 2010*. pp. 56- 66.
- Paltineanu, I.C., and J. L. Starr. 1997. Real time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1576–1585.
- Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 253-259.
- Ruiz-Sánchez, M. C. y J. Girona. 1995. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. Pp. 67-95. En: *Riego deficitario controlado, fundamentos y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 188 p.
- Saxton, K., P. Willey and W. Rawls. 2006. Field and pond hydrologic analyses with the SPAW model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 4-11-2013. <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAW%20Proceedings%20Paper-ASABE.pdf>. ksaxton@roadrunner.com.
- Sellés G., R. Ferreyra, y I. Sellés. 2000. Riego. J. Valenzuela (Ed.). *Uva de mesa en Chile*. INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias) Santiago, Chile. 338p.
- Santos, L., J. De Juan, M. Picornell y J. Tarjuelo. 2010. El riego y sus tecnologías. Centro de Egenharia dos Biosistemas (CEER), Instituto Superior de Agronomía, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal. 292 p.
- Shackel, K.A., B. Lampinen, S. Southwick, W. Olson, S. Sibbett, W. Krueger, J. Yeager and D. Goldhamer. 2000. Deficit irrigation in Prunus: Maintaining productivity with less water. *HortScience* 35 (6): 1063-1066.
- Sociedad Nacional de Agricultura (SNA). 2008. Chile Agrícola, Una mirada de la agricultura por regiones. Chile. 15-06-2014. <http://www.sna.cl/web/admin/spaw2/uploads/files/Microsoft%20PowerPoint%20-%20CHILE%20AGRICOLA.pdf>. comunicaciones@sna.cl.
- Starr, J. L. and I. C. Paltineanu. 1998. Soil water dynamics using multisensory capacitance probes in non-irrigated interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 114–122.
- Starr, J., D. J. Timlin, P. M. Downey and I.R. McCann. 2009. Laboratory evaluation of dual-frequency multisensor capacitance probes to monitor soil water and salinity. *Irrig. Sci.* 27: 393-400.
- Stewart, W., A. Fulton, W. Krueger, B. Lampinen and K.A. Shackel. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of Almonds without affecting yield. *California Agriculture* 65 (2): 90-95.
- Stevens Water Monitoring Systems (STEVENS). 2007. The HydraProbe Soil Sensor: Comprehensive Stevens Hydra Probe Users Manual. Estados Unidos. 20-10-13. http://www.stevenswater.com/catalog/products/soil_sensors/manual/Hydra%20Probe%20Manual%2092915%20June%202007.pdf. info@stevenswater.com.
- Universidad de Chile. 2012. Llevando a la Universidad de Chile a regiones para dar soluciones a los problemas del agro y los recursos naturales. 295-297 p. In. *Memoria Anual 2010 y 2011*. 368 p.
- Vera, J., J. M. Abrisqueta, R. Quezada, J. Munguía, R. Callejas, R. Gálvez, I. Abrisqueta y M.C. Ruiz-Sánchez, M.C. 2010. Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad. 69-71 p. *Memoria Resúmenes Extendidos. Primer Congreso Boliviano del Riego y Drenaje*. 12 al 14 de julio del 2010 La Paz, Bolivia. Edición B. Moises Quiroga Sossa IIAREN-UMSA.
- Veihmeyer, F.J. y A. H. Hendrickson. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1:285-304.
- Williams, L.E. and T.J. Trout. 2005. Relationship among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (4): 357-366.
- Zuñiga, M. O., 2013. Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile. *Memoria Ingeniero Agrónomo*. Santiago. Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 56 p.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Gobiernos y Consejos Regionales de Atacama (Bip: 33-03-779, 33-03-218 y 30137081) y O'Higgins (IDI: 30112430-0) por haber financiado estos trabajos, así como a los productores que apoyaron en todo momento a la correcta ejecución de las actividades comprometidas y a los profesores de la Universidad de Chile.

Agradecemos en este número la colaboración de los siguientes revisores:

Arcelus, Alejandro

Departamento de Hidrología, CARU, Uruguay

Baethgen, Walter

The Earth Institute, Columbia University, USA

Balocchi, Francisco

University of Arizona, USA

Bertoni, Juan Carlos

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Gaviño, Marcelo

Universidad de La Plata, Argentina

Genta, José Luis

Cuenca del Plata, Argentina

Gil, Joram

Cátedra UNESCO de Sustentabilidad de los Recursos Hídricos, Universidad de San Carlos, Guatemala

Mancilla, Gabriel

CAZALAC, Chile

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Chile

Pochat, Victor

Gestión Integrada de recursos Hídricos, UNESCO, Argentina

Ramirez, Aldo

Centro del Agua para América Latina y El Caribe, TEC Monterrey, México

Tujchneider, Ofelia

Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Urbina, Fernando

CTHA-Universidad de Talca, Chile

Ugarte, Yuri

GlobalCip, Chile

Vallejos, Carlos

Universidad de Talca, Chile

Verbist, Koen

Responsable del Proyecto MWAR-LAC, UNESCO, Gobierno de Flandes

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
www.unesco.org.uy/phi/aqualac