



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

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization

Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe
Regional Bureau for Science in Latin America and the Caribbean



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

1

VOL. 3
MAR. 2011

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

Publicado en el 2011 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

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

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

ISSN 1688-2873

© UNESCO 2011

Foto de portada: © Federico Langguth, UNESCO.

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

The denominations used in the publication and the presentation of information herein are not to be seen as an adoption by UNESCO of any position, as it relates to the juridical status of the countries, territories, cities or zones, nor of their authorities, neither within their borders or territorial limits. The ideas and opinions expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily represent the point of view of UNESCO.

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

Subject to availability free copies can be requested to:

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

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

Tel.: + 598 2413 20 75

Fax: + 598 2413 20 94

E-mail: aqualac@unesco.org.uy

<http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac>

CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL COUNCIL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Ávila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutiérrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Blanca Jiménez - Aguas Urbanas
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Lilian Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
Florida International University, USA
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California – Davis, USA
- Víctor Pochat - Gestión Integrada
UNESCO
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Integrating Watersheds and Coastal
Area Management in SIDS, Saint Lucia

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

- Editor en Jefe / Editor in Chief**
Víctor Pochat
UNESCO
- Editora Ejecutiva / Executive Editor**
Zelmira May
UNESCO
- Coordinador de Edición / Editorial Coordinator**
Federico Langguth
UNESCO
- Diseño de Portada / Cover Design**
Federico Langguth
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Modelación hidrológica de grilla en zonas de llanura:
Movimiento multidireccional del agua
Scioli, Carlos C. y Villanueva, Adolfo
Grid-based hydrological model in areas of plain:
Multi directional movement of water 1
- Adaptación del método multiescala para la simulación
de acuíferos
**Gallardo, Pablo; Becerra, Leticia; Pérez, Ángel y
Castellanos, Longina**
Adaptation of multiscale method for the aquifers simulation .. 9
- Diseño de redes de monitoreo apoyadas por herramientas
SIG y modelación geoespacial
Cano Casas, Lina y Escobar Martínez, John Fernando
Monitoring network design supported by GIS tools and
geospatial modeling..... 18
- Sensores para la medición y validación de variables
hidrológicas a escalas local y regional a partir
del balance de energía
**Carmona, F.; Rivas, R.; Ocampo, D.; Schirmbeck,
J. y Holzman, M.**
Sensors for the measurement and validation of
hydrological variables at local and regional scales
from energy balance..... 26
- Nitrificación con bajo tiempo de retención de sólidos
y bajo índice energético
**Loaiza Navia, Jimmy; Martínez García, Laura;
Carlín G., Manuel F. y Esquivel E., Rodolfo**
Nitrification with short solids retention time and slow
energy index..... 37
- Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso
de suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México
Santacruz De León, Germán
Estimate of water erosion and its relationship to land
use in the Cohoacan River basin, Chiapas, Mexico 45
- Planificación y Gestión de las Aguas Subterráneas
para Consumo Humano en el Este de La Pampa,
Republica Argentina
Schulz, Carlos J.; Balestri, Luis A. y Dornes, Pablo F.
Planning and Management of Ground Water for Human
Consumption in East of La Pampa, Republic Argentina..... 55
- Avances en agua y educación para las Américas
y el Caribe
**Vázquez del Mercado Arribas, Rita y Benitez Ferrari,
Soledad**
Advances on water and education in Latin America
and the Caribbean 60
- Hidrología superficial en la cuenca del río Grijalva:
calibración del modelo hidrológico de capacidad
de infiltración variable (vic)
**Francisco Muñoz Arriola, Jorge Humberto Salgado
Rabadán, Heléne Marie Rocchiccioli, Shrraddnnand
Shukla, Alberto Güitrón De los Reyesy René
Lobato Sánchez**
Surface hydrology in Grijalva river basin: calibration of the
variable infiltration capacity model (vic)..... 68

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

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

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

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

DAVID ENFIELD

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

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

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

MICHAEL GLANTZ

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

KENRICK LESLIE

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

ROBERTO PIZARRO

Universidad de Talca, Chile
University of Talca, Chile

CARLOS TUCCI

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

SUSCRIPCIONES

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

www.unesco.org/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

Gran parte de nuestra región de América Latina y el Caribe está respondiendo de manera creciente al incremento de la demanda mundial de alimentos, aprovechando sus condiciones naturales sobresalientes para la producción agrícola y ganadera.

Así se comprueba la expansión de la frontera agropecuaria en varios de sus países y una notable intensificación de los cultivos, lo que está implicando una mayor presión sobre sus recursos hídricos superficiales y subterráneos y ocasionando cambios en el uso del suelo, particularmente en extensas zonas donde la vegetación natural ha sido reemplazada por cultivos.

Asimismo los mercados mundiales están requiriendo madera y sus productos derivados, haciendo desaparecer grandes extensiones de bosques naturales e introduciendo especies exóticas, con la consiguiente afectación sobre los suelos, el escurrimiento de las aguas y la biodiversidad.

Tales cambios están produciendo un impacto directo sobre los suelos y el comportamiento hidrológico de muchas cuencas. El aumento de la erosión, la utilización de agroquímicos y los cambios en la dinámica del escurrimiento -con los consecuentes traslado de sedimentos, agravamiento de la contaminación e incremento de los caudales máximos- pueden reducir la capacidad de los embalses y ampliar los requerimientos de dragado en las vías navegables, afectar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas y producir inundaciones en áreas hasta el momento no inundables.

Afortunadamente, la ciencia hidrológica continúa avanzando y ofreciendo nuevos métodos y herramientas para mejorar la evaluación de los recursos hídricos y entender con mayor profundidad su comportamiento en la naturaleza. Y, por su parte, las técnicas de enseñanza y de administración se van actualizando y perfeccionando, posibilitando una más adecuada transmisión de conceptos y una gestión más efectiva.

Este número de Aqua-LAC presenta algunos ejemplos de tales métodos, herramientas y técnicas, que esperamos sean de utilidad para sus lectores y los impulse a hacer nuevos aportes desde sus respectivas especialidades. Algunos de estos trabajos fueron seleccionados a partir de su presentación en el 1º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras que tuviese lugar en Azul (Buenos Aires, Argentina) del 21 al 24 de Septiembre de 2010, bajo el lema "Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura" y que contó con el auspicio de UNESCO/PHI. El Congreso fue una instancia para contribuir al desarrollo de los conocimientos particulares de la hidrología de llanuras, generando espacios de diálogo, intercambio, discusión y difusión de las investigaciones que llevan a cabo especialistas en las diversas aristas de esta disciplina.

Editor en Jefe

EDITORIAL

A large portion of the Latin American and the Caribbean region is increasingly responding to the enhanced global food demand, taking advantage of the outstanding natural conditions for agricultural production and livestock breeding. Hence, an expansion of the agricultural border and a significant intensification of crops have emerged in several of our countries, what leads to a greater pressure on surface and groundwater resources and land use changes; particularly natural vegetation has been replaced by crops in large areas.

Furthermore, global markets are demanding wood and its derived products, giving rise to deforestation of natural forests and to the introduction of alien species, consequently affecting the soils, runoff and biodiversity.

These changes are directly impacting soils and the hydrological behavior of many river basins. Increased erosion, agrochemical use and changes in runoff dynamics -with the consequent impacts on sediments dynamics, increasing pollution and peak discharge- can reduce the capacity of reservoirs and expand the dredging requirements in the waterways, affecting the quality of surface and groundwater, and leading to floods in areas previously not subject to flooding.

Fortunately, the water sciences continue to advance and offer new methods and tools to improve the assessment of water resources and to better understand their behavior. Moreover, teaching and management techniques are being continuously updated and refined, leading not only to a smoother concept convey but also to a more effective management.

This issue of Aqua-LAC presents some examples of such methods, tools, and techniques that we hope our readers will find useful and motivating in order to make new contributions from their respective field of expertise. Some of the articles included were selected from those submitted at the 1st International Congress of Plain Hydrology that took place in Azul (Buenos Aires, Argentina) from 21 to 24 September, 2010, under the auspices of UNESCO-IHP addressing the topic "Towards integrated management of water resources in plain areas". The Congress was aimed at contributing to knowledge development in the area of plain hydrology, fostering dialogue, exchange, discussion and dissemination of the research carried out by prominent specialists in different fields of knowledge.

Editor in Chief

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

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

Contenido

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

Idioma

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

Aceptación de los manuscritos

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

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

Proceso de revisión

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

Derechos de reproducción (Copyrights)

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

Responsabilidad

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

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

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

Contents

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

Languages

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

Acceptance of manuscripts

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

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

Review process

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

Copyrights

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

Disclaimer

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

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE GRILLA EN ZONAS DE LLANURA: MOVIMIENTO MULTIDIRECCIONAL DEL AGUA

GRID-BASED HYDROLOGICAL MODEL IN AREAS OF PLAIN: MULTI DIRECTIONAL MOVEMENT OF WATER

Scioli, Carlos C.¹ y Villanueva, Adolfo²

Resumen

El agua sobre el terreno en áreas de llanura escurre en forma desordenada, indefinida e imprevisible, siendo los escurrimientos en este caso areales, mantiformes, etc. Para estudiar el escurrimiento sobre la superficie del terreno en estos sistemas se realizó un análisis del movimiento multidireccional del agua sobre el terreno utilizando una modelación hidrológica distribuida.

El análisis mostró que el agua no escurre por un único camino y que la superficie de las AAp a las secciones de salida son dinámicas. Por esto no existe una única relación entre el agua caída en el área de aporte y los caudales medidos en un punto de salida, entonces el concepto de cuenca no es aplicable en estos sistemas.

Las técnicas convencionales utilizadas para monitorear la respuesta de cuencas no son suficientes para cuantificar la respuesta de estos sistemas, por ello se proponen y se ponen en discusión métodos alternativos para cuantificar la respuesta de estos sistemas.

Palabras claves: modelación hidrológica distribuida - dirección escurrimiento - sistemas de llanura

Abstract

The water on land in areas of plain drain untid, indefinite and unforeseeable form, this case the runoffs is areales, mantiformes, etc. The study in these systems the runoff on the surface of terrain was realized with analyzes the multidirectional movement of water using a distributed hydrological modeling.

The analysis showed that the water does not drain for the only way and the surface of the contributing areas to several "basin exit points" they are dynamic. Due to this does not exist relation between the water fallen in the contributing areas and the flows measured in a exit points, at the time the concept of basin is not applicable in these systems.

The conventional technical used to monitor the response of basins are not sufficient to quantify the response of these systems. This study propose and put in discussion on alternative methods to quantify the response of these systems.

Keywords: distributed hydrological modeling - direction runoff - systems plain

INTRODUCCIÓN

En zonas de bajo relieve "el agua sobre el terreno no tiene una única dirección de escurrimiento, cabe recordar que el agua escurre en forma desordenada, indefinida e imprevisible, siendo los escurrimientos en este caso areales, mantiformes, etc.", comentan Fertonani y Prendes (1983). Esto provoca que durante las inundaciones, el concepto de convergencia del escurrimiento hacia una red de drenaje que es la principal vía de movimiento del agua no sea aplicable. La capacidad de escurrimiento de los cauces es muy pequeña, y el valle de inundación no está bien definido. Esto provoca inundaciones de poca profundidad, generalmente menos de un metro, y tiempo de permanencia muy largo en relación al área de aporte. No es rara una lámina de agua de algunas decenas de centímetros durante 10, 15 o hasta 20 días.

La situación presentada en la Figura 1 es un ejemplo de la respuesta de estos sistemas a un evento extremo. Esta figura muestra la inundación ocurrida en agosto del 2002 en el partido de Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. El arroyo del Azul, de pocos metros de ancho, llega a tener un frente de inundación del orden de algunos km durante el pasaje de una crecida. En la zona a la derecha del arroyo se produce un fenómeno de llenado y encadenamiento de áreas bajas y el agua ocupa, de manera discontinua, superficies del orden de centenas o miles de km². Este encadenamiento de lagunas genera una red de drenaje anastomosada, donde no es posible identificar una red de drenaje jerarquizada, ni un punto que represente la salida del sistema, como se muestra en detalle en la Figura 2. En épocas normales ésta área se encuentra prácticamente sin agua,

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL), Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Ususnoff" scioli@fich.unl.edu.ar

² Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Ususnoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul)



Figura 1. Patrón de anegamiento típico de la llanura en la zona de Azul, Prov de Buenos Aires, Argentina

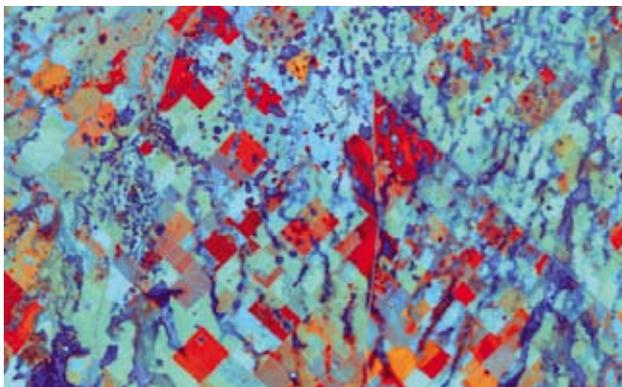


Figura 2. Red de drenaje anastomosada.

ya que solo presenta pequeños almacenamientos superficiales del orden de 1 a 5 ha.

En estos sistemas se genera la necesidad de analizar el comportamiento del escurrimiento superficial y la acumulación del agua sobre el terreno para comprender el funcionamiento hidrológico de estas áreas de llanura. Para ello se simuló el movimiento del agua sobre el terreno con un modelo hidrológico distribuido y los resultados de dicha simulación fueron usados para estudiar la respuesta del sistema mediante un análisis del movimiento multidireccional del agua sobre el terreno.

El estudio realizado permitió comprender el funcionamiento del sistema y plantear metodologías para la cuantificación de la respuesta del mismo. Además se generó información que sirvieron para el planteo y desarrollo de estudios de planificación y gerenciamiento de recursos hídricos y su relación con la actividad productiva de la zona.

LUGAR DE TRABAJO

El trabajo se realizó en la región aledaña a la localidad de Orense, ubicada en el partido de Tres Arroyos. El partido de Tres Arroyos esta situado al sureste de la Provincia de Buenos Aires, como se muestra en la Figura 3. La zona de estudio se puede observar en dicha figura en el sector sureste del partido, donde se localiza un área de llanura.

Este partido es agrícola-ganadero por excelencia, con un importante sector industrial en la zona urbana y peri-urbana. La superficie del partido es de 5.861 Km² y su población está cercana a los 57.000 habitantes en todo el partido, mientras que en la ciudad cabecera tiene una población de 45.000 habitantes

El área de aporte a la localidad de Orense tiene una superficie de 1250 Km², una pendiente media en sentido N-S de 2,5 ‰ al norte de la RP 228, y de 1,5 ‰ al sur de dicha ruta, como se muestra en la Figura 4. Este significativo cambio de pendiente provoca que en esta última franja se presenten frecuentemente problemas de anegamiento y escurrimiento en lámina.

En la imagen de satélite de la Figura 4 es visible el cambio en los patrones de drenaje que se produce en la RP 228. Al sur hay un drenaje difuso y anastomosado, con abundantes puntos de acumulación de agua, del orden de pocas hectáreas. La baja pendiente y el poco relieve de esta zona hacen que el área no tenga la capacidad de evacuar rápidamente volúmenes importantes de agua. El escurrimiento superficial es mayoritariamente mantiforme y no tie-



Figura 3. Argentina - Provincia de Buenos Aires - Partido Tres Arroyos - Zona de Orense.

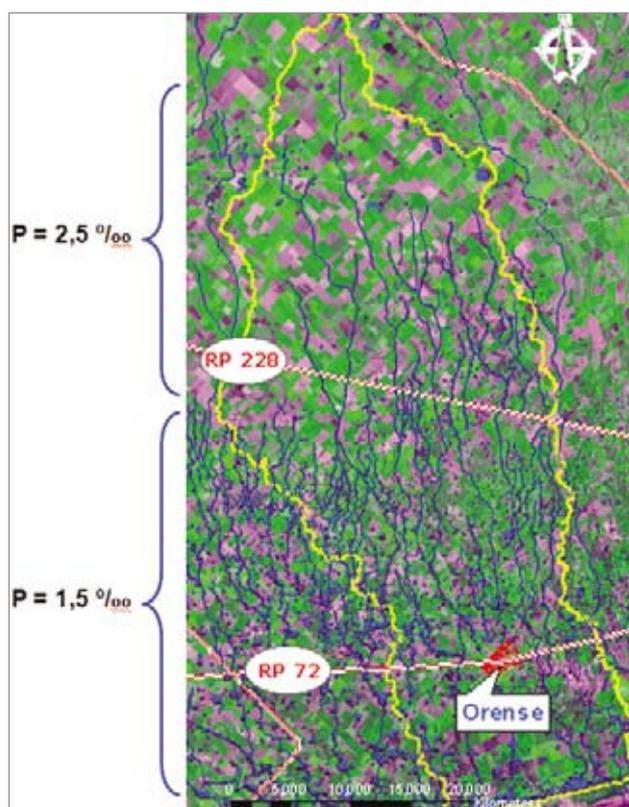


Figura 4. Área de aporte a la localidad de Orense
Zonas de diferentes pendientes medias

ne una dirección definida. Como se observa en la imagen esta zona de estudio presenta las características que describen a un sistema de llanura.

La red de drenaje natural de la zona estudiada ha sido modificada con el paso del tiempo producto de diferentes factores. Estas modificaciones han provocado alteraciones en la forma en que las inundaciones afectan a la región. Uno de los factores que modificó el escurrimiento en la zona fue la profundización de los caminos debido a factores como tipo de suelo, erosión hídrica y/o eólica y acción antrópica. Estos cambios provocaron que los caminos comiencen a concentrar y propagar el escurrimiento en épocas de excesos, modificando la red de drenaje natural. Otra acción que afectó el escurrimiento superficial fue la construcción de una red de canales, por motivos como drenaje de crecidas, vaciado de lagunas, etc. En situaciones de crecidas, la red de canales artificiales tiene por función captar el agua que escurre de manera mantiforme, y conducir a ésta hacia el mar. Como se mencionó en el párrafo anterior, el escurrimiento superficial de la región sufrió modificaciones producto de la acción antrópica. Estos cambios han provocado un direccionamiento del agua en épocas de excesos hacia la zona de Orense. Los efectos de estos cambios quedaron expuestos en la inundación ocurrida en noviembre del 2002. Este evento ocasionó desbordes de canales, anegamientos de campos e inundó parte de la localidad de Orense

Actualmente la zona sigue presentando inconvenientes en el manejo del agua ya que se ha construido nuevos canales para dar una solución inmediata a los problemas de excesos, sin evaluar los efectos que éstos producirían en épocas de déficit hídrico. Los nuevos canales drenan rápidamente las áreas anegadas pero se debe tener en cuenta que éstos pueden continuar funcionando durante un período de sequía y ocasionar una depresión indeseada del nivel freático.

ANÁLISIS MULTIDIRECCIONAL DEL AGUA

Para analizar como el agua escurre sobre el terreno se estudió el movimiento multidireccional del agua utilizando un algoritmo denominado Cuencador (Riccardi, comunicación personal, Scioli, 2009). El algoritmo identifica las celdas que aportan a puntos de convergencia (celdas "destino"). Estas celdas pueden ser puntos de salida del sistema o celdas donde el agua llega y se acumula es decir, no tienen salida de caudal.

Este algoritmo utiliza los resultados del modelo distribuido Simulaciones Hidrológicas I (SSHH I) y puede identificar algunos de los fenómenos característicos de los sistemas de llanura. Con este algoritmo, se evaluó la variación de la superficie y forma de las áreas de aporte (AAp) a las secciones de salida y se analizó la dirección del escurrimiento sobre el terreno.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

Para la modelación del sistema se utilizó el modelo distribuido de grilla, SSHH-I, con el cual se puede simular el movimiento del agua sobre la superficie del terreno. Este modelo fue desarrollado en la Universidad Nacional de Rosario por Riccardi (2000) y Rentería y Stenta (2003). El modelo representa y vincula el escurrimiento mantiforme con el encauzado,

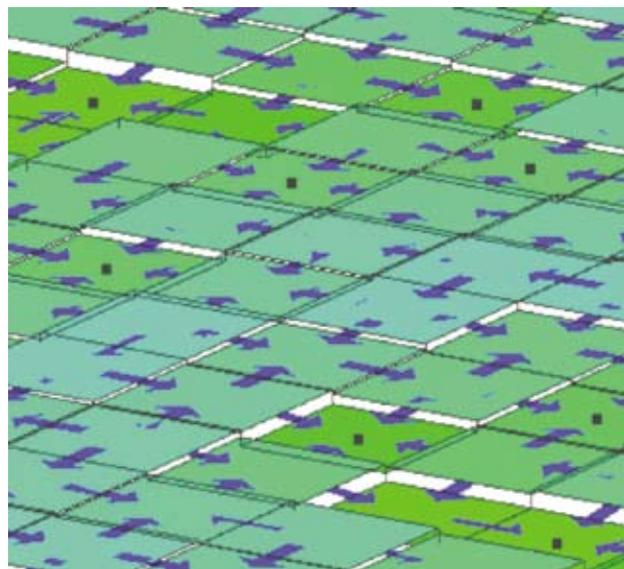


Figura 5. Discretización por grilla - Movimiento del agua sobre la superficie del terreno

característica fundamental para simular el movimiento del agua sobre el terreno en sistemas de llanuras. El SSHH-I discretiza el terreno en forma de grilla (celdas cuadradas) y aplica una ecuación de almacenamiento a cada celda y ecuaciones de escurrimiento a las vinculaciones entre celdas. El modelo representa el relieve de la zona utilizando como base un modelo digital de elevaciones (DEM), en el cual se delimita el área de trabajo o celdas de cálculo. Dependiendo del tamaño de grilla, el modelo puede representar el almacenamiento y movimiento del agua sobre la superficie del terreno, y no solo en los cursos de agua como se muestra en la Figura 5.

Las celdas pueden representar la superficie del terreno o tramos de cauce y se relacionan entre sí mediante relaciones hidráulicas simples, como la ecuación de Manning, vertederos, etc. El primer ejemplo de modelo de celdas para ríos con planicie de inundación es el modelo del Delta del Mekong, desarrollado por la SOGREAH (Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques) (Cunge et al., 1980). A cada celda se le asigna un valor de cota determinada de un DEM para representar la topografía del terreno. El modelo no necesita de una delimitación previa de cuencas y es posible asignar varios puntos de salida al sistema.

El modelo simula el proceso de escurrimiento con flujo dinámico multidireccional y determina el movimiento del agua a partir de la información topográfica y del tirante de agua en cada celda. La topografía incorporada en el modelo puede ser modificada para imponer al modelo canales o cauces pequeños de agua que no estén representados en el DEM. El escurrimiento entre celdas puede ser calculado mediante diferentes ecuaciones de descarga. Estas ecuaciones incluyen aproximaciones cinemáticas y difusivas de la ecuación de cantidad de movimiento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Los escurrimientos encauzado y superficial pueden ser simulados a través de singularidades tales como puentes, vertederos, alcantarillas, uniones/bifurcaciones, cambios de sección, estaciones de bombeo, etc. ya que el modelo tiene incorporada las leyes de descarga de cada una de ellas.

El SSHH I se implementó en la zona de estudio utilizando datos de topografía del modelo digital del terreno SRTM, cartas topográficas del IGM, imágenes satelitales, relevamientos topográficos locales de canales y ríos, etc. La estimación de los valores de los parámetros se realizó en función de una calibración cualitativa o marginal (Scioli, 2009), de datos de la bibliografía y de proyectos realizados en la zona similares. (Cazenave et al., 2007; Villanueva et al., 2007)

Las características que presenta el SSHH-I hacen que sea una herramienta adecuada para su utilización en modelaciones hidrológicas en zonas de llanura. Es por esto que se utilizaron los resultados del modelo para realizar el análisis del movimiento multidireccional del agua sobre la superficie del suelo.

CUENCADOR

El Cuencador determina las celdas que aportan a cada celda destino (CD) a partir de los resultados del SSHH-I.

El algoritmo utiliza el valor de caudal de cada vinculación en un determinado intervalo de tiempo para determinar el camino que recorre el agua desde una celda inicial (i) hasta la CD. El grupo de celdas que aporta a una misma CD constituyen el área de aporte a dicha celda.

El Cuencador comienza el cálculo en una celda i evaluando los egresos de caudales de la misma. El algoritmo escoge el máximo caudal e identifica hacia que celda vecina se dirige el agua. Paso seguido el programa se sitúa sobre la celda donde fue descargada el agua y repite el análisis de los caudales salientes. Este cálculo es repetido hasta llegar a una celda que no tenga salida de agua o sea un punto de salida del sistema. Las celdas que se recorrieron hasta llegar a la CD determinan el camino del caudal máximo ($Q_{m\acute{a}x}$).

El proceso identifica a que CD aporta la celda i. Este análisis se repite en todas las celdas del modelo, con lo cual se determinan las celdas aportantes a cada celda destino.

Una modificación propuesta por Scioli, 2009 consistió en incorporar una nueva alternativa para determinar el camino del escurrimiento. Esta nueva alternativa radica en considerar como dirección de salida del agua de una celda a la dirección del segundo caudal en orden de magnitud ($Q_{2^{do}}$).

De esta manera el algoritmo analiza los caudales de salida de la celda i y determina la celda a la que aporta ésta considerando la *dirección del $Q_{2^{do}}$* . En el caso que sólo exista un caudal de salida de la celda, se toma a éste para el cálculo. En la Figura 6 se

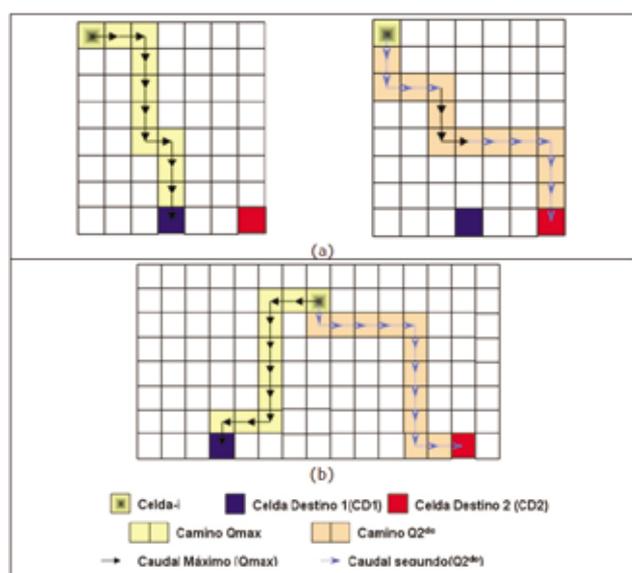


Figura 6. Esquema del resultado de la aplicación del Cuencador (a) y (b) son ejemplos de posibles resultados para la vía de escurrimiento de Q_{max} y Q_{2do}

presenta un ejemplo de como funciona el algoritmo modificado para Q_{\max} y para $Q_{2^{\text{do}}}$. El Cuencador con esta modificación puede calcular el camino del escurrimiento desde una celda i a un CD en función del Q_{\max} o del $Q_{2^{\text{do}}}$.

El algoritmo se utilizó con esta modificación para poder analizar mejor el movimiento del agua sobre el terreno, ya que en esta zona con frecuencia no existe una única dirección de escurrimiento.

PLANTEO DE ESCENARIO A ANALIZAR

El Cuencador se utilizó para analizar el comportamiento de las AAP cuando el sistema está en equilibrio. Para esto se utilizaron los resultados obtenidos de simular el sistema para una lluvia constante (0,2 mm/h) de larga duración distribuida uniformemente sobre el área simulada de modo de generar un estado de equilibrio. A partir de los resultados de esta simulación con el Cuencador se determinaron las AAP considerando la dirección del Q_{\max} saliente de la celda y $Q_{2^{\text{do}}}$.

RESULTADOS

Con el algoritmo se determinaron las AAP para distintos días posteriores a la iniciación de la lluvia. En la Figura 7 se muestra algunas de las imágenes que se utilizaron para el análisis de la evolución en el tiempo de las AAP considerando como dirección del escurrimiento el Q_{\max} y $Q_{2^{\text{do}}}$ saliente de la celda. En todas las imágenes se identificaron con un mismo color a las celdas que aportan a una misma celda destino. Los colores en las imágenes representan AAP de la zona estudiada.

El análisis de la evolución en el tiempo de las AAP se identificó que las áreas de aportes calculadas considerando el Q_{\max} y $Q_{2^{\text{do}}}$ cambian de forma y tamaño con el paso del tiempo. Para la situación simulada, estado de equilibrio del sistema, las AAP en determinado día dejan de cambiar sus dimensiones. Las AAP calculadas en función de la dirección del Q_{\max} varían hasta el 15^{to} día de comenzada la lluvia, en cambio las correspondientes al $Q_{2^{\text{do}}}$ lo hacen hasta el 19^{to} día.

En la Figura 7 compararon las AAP determinadas con la dirección del Q_{\max} saliente de cada celda con las del $Q_{2^{\text{do}}}$. De esta comparación se observó que las AAP en un determinado intervalo de tiempo para ambos caudales son muy diferentes. Esto se produce porque muchas celdas aportan en un mismo período de tiempo a distintas celdas destino. En una cuenca "típica" esto no sucede, las dos áreas serían iguales, ya que el agua siempre saldría por un único punto de salida

La Figura 8 muestra que el sistema entra en estado de equilibrio después del 25^{to} días de iniciada la lluvia, o sea varios días posteriores a que las áreas dejan de cambiar de forma y tamaño. La Figura 8 (a)

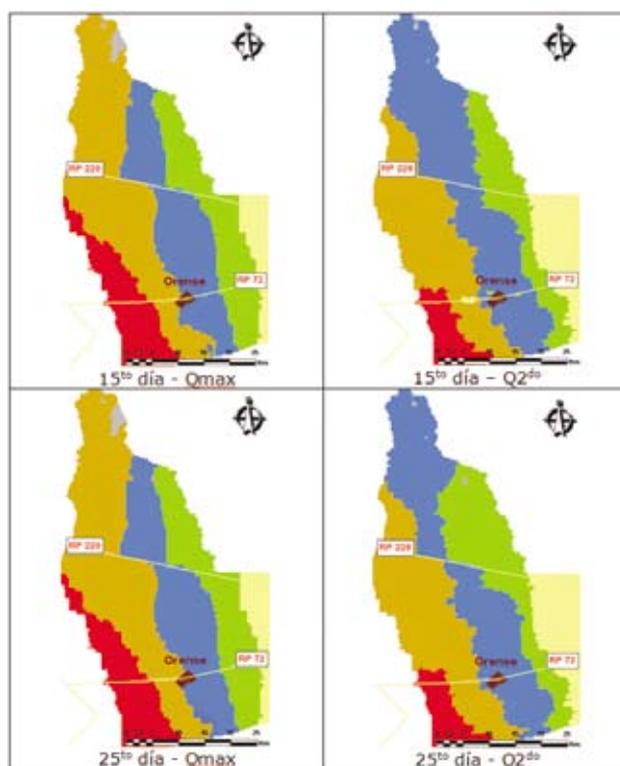


Figura 7. Áreas de aporte determinadas para 15to y 25to día de comenzada la lluvia cte, considerando la dirección del Q_{\max} saliente de cada celda y del $Q_{2^{\text{do}}}$

muestra el área de aporte a cada sección de salida considerando solo la dirección de Q_{\max} . En esta figura se observa que el área 1 es mucho menor que área 4, pero el caudal generado en dichas áreas es muy parecido (Figura 8 (b)), debido a que el área 1 también esta recibiendo agua de otras celdas. Esto muestra que conocer los hidrogramas a la salida del sistema no es una información suficiente para determinar la respuesta del sistema.

Otro análisis que se realizó fue la comparación de caudales correspondientes a las AAP simuladas con el SSHH I con los caudales de las áreas de aporte determinadas topográficamente (AAP_T). En la Figura 9 se observan las AAP simuladas para Q_{\max} y $Q_{2^{\text{do}}}$ para el estado de equilibrio y a la derecha las AAP_T 2 y 3. Se puede observar la diferencia de tamaños y forma que existe entre ellas.

En la parte inferior de la figura se comparan los caudales erogados por las secciones de salida de por cada una de estas áreas. Los caudales de las AAP simuladas corresponden a la suma de los caudales de las áreas determinadas a partir Q_{\max} y $Q_{2^{\text{do}}}$. Mientras que los caudales correspondientes a las AAP_T fueron calculados considerando que el toda el agua caída en estas áreas es erogada por su sección de salida.

Es notable ver la diferencia de caudales, mostrando que no sería posible relacionar caudales con tamaño de áreas, al existir trasvasamientos no puede corresponderse el caudal generado a las áreas de aporte.

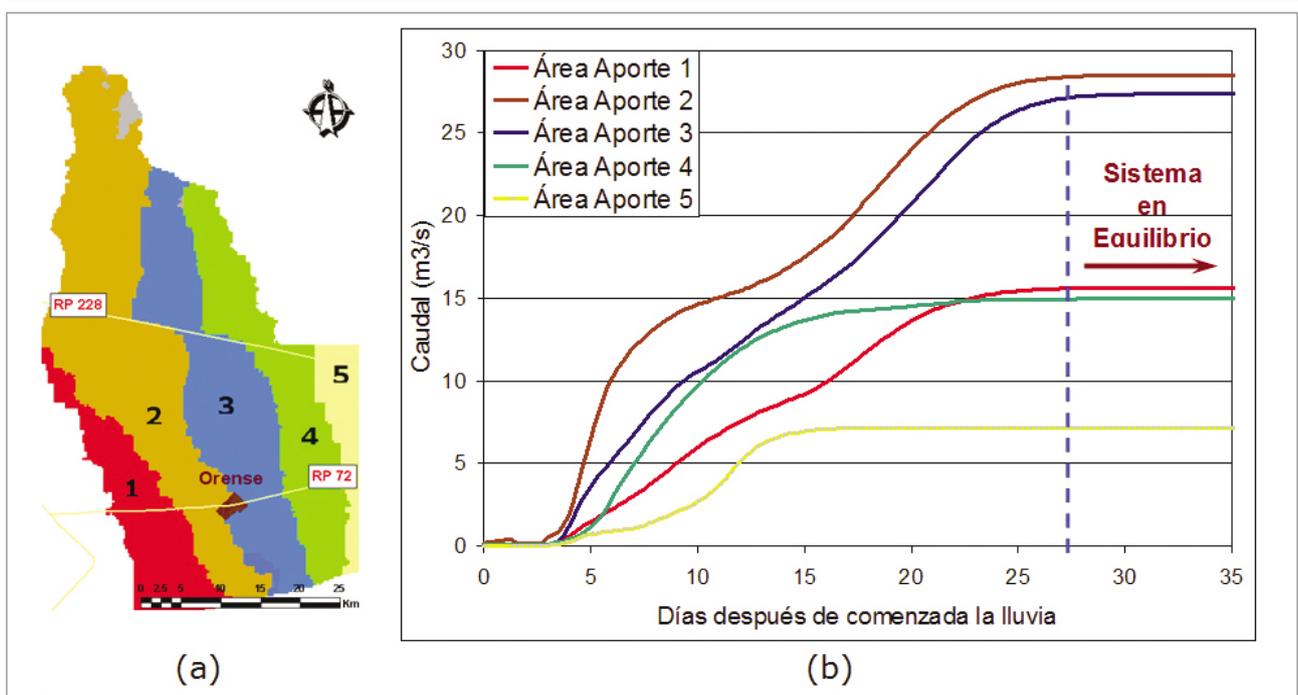


Figura 8 (b). Hidrogramas de las secciones de salida correspondientes a las áreas de aporte señaladas en (a).

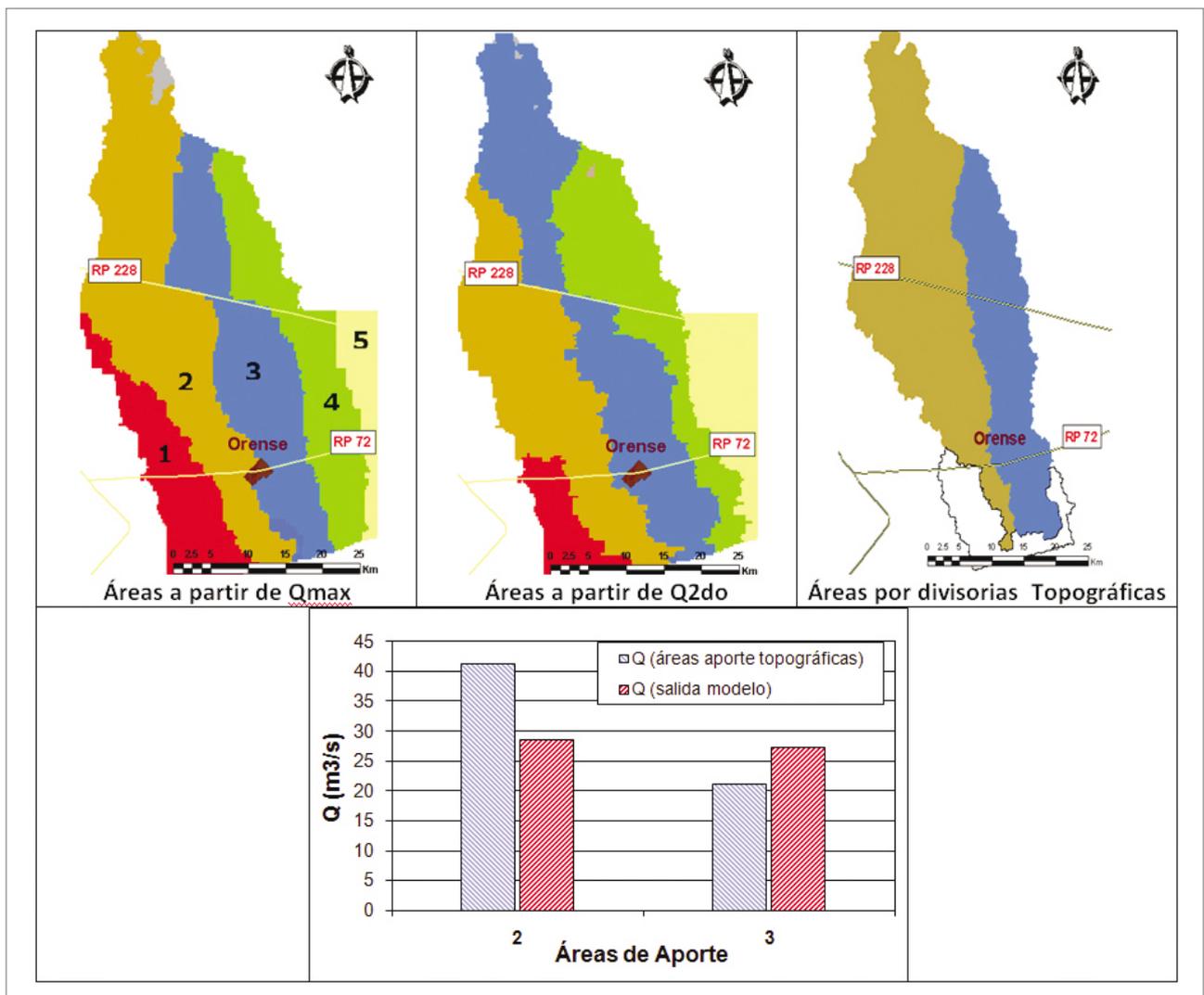


Figura 9. Caudales correspondientes a las áreas de aporte simuladas con el SSHH I y al agua generada en las áreas determinadas topográficamente.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de la aplicación del Cuencador mostraron que las AAP en la zona estudiada no tienen límites fijos, varían de forma y tamaño. La variación de las AAP se debe al intercambio de agua entre ellas. Los trasvasamientos entre las AAP del sistema estudiado se generan porque los niveles de agua son del orden de las alturas de las “divisorias de aguas”.

El análisis de la evolución temporal de las AAP mostró que éstas cambian de forma y tamaño. Estos cambios se producen porque las celdas que aportan a una determinada celda destino, varían su tirante de agua y cambian la dirección de su aporte hacia otra en el siguiente período de tiempo.

La diferencia entre las AAP determinadas con el Q_{max} y $Q2^{do}$ en un intervalo de tiempo que se observan en las Figuras 7 se producen porque el agua en un área puede estar escurriendo, simultáneamente, en dos direcciones diferentes, o sea una celda puede estar aportando al mismo tiempo a diferentes celdas destino, es decir trasvasando hacia otra área de aporte. Esto muestra que el agua generada en una celda no tiene un único camino de escurrimiento.

Los fenómenos mencionados indican que en este sistema el movimiento del agua sobre el terreno es principalmente gobernado por la pendiente hidráulica y no la topográfica. Esto último sumado a que el terreno es muy plano genera que variaciones de pequeña magnitud en la altura del agua sobre las celdas causen el cambio de dirección del escurrimiento superficial. Estos cambios de dirección terminan provocando que sea dinámica la superficie de las áreas de aporte.

Las características del funcionamiento del sistema causan que no exista una única relación entre el agua caída en el área de aporte y los caudales medidos en un punto de salida, mostrando que el concepto de cuenca no es aplicable en estas áreas. Por ello, las determinaciones de caudales en las secciones de salida no brindan la información suficiente para realizar una calibración del sistema.

El análisis realizado mostró que el escurrimiento sobre la superficie del terreno es el proceso que incide en las variaciones de la forma y tamaño de las áreas de aporte, influyendo en la respuesta del sistema estudiado. Debido a esto, para modelar estos sistemas es necesario representar de manera adecuada y con una buena escala de detalle el movimiento del agua sobre el terreno.

Por último, los resultados de la evaluación del movimiento multidireccional del agua sobre la superficie del terreno permitieron confirmar que el área de estudio tiene las características de un sistema de llanuras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las AAP del sistema estudiado no tienen límites fijos, y varían en tamaño y forma. El fenómeno que produ-

ce la variación de estas áreas es el trasvasamiento de agua entre ellas, ya que la altura de las “divisorias de aguas” es del mismo orden que el tirante del escurrimiento superficial.

El concepto de cuenca en estos sistemas no es aplicable, ya que las “divisorias de aguas” no están bien definidas, y además frecuentemente no es posible definir un punto que sea representativo del comportamiento del sistema. La presencia de trasvasamientos y el movimiento multidireccional del agua hacen que en el sistema no exista una única relación entre el agua caída sobre cada área de aporte y los caudales medidos en las secciones de salida.

En la modelación de una zona que presente características de un sistema de llanura puede ser necesario incluir áreas contiguas a ésta, para evaluar los posibles trasvasamientos de agua. Como límites de la zona simulada se podrían utilizar cuerpos de agua que no produzcan desbordes que afecten a la zona estudiada, divisorias de agua topográficas bien definidas, etc.

El cambio de forma y tamaño de las AAP muestran la necesidad de simular el escurrimiento sobre la superficie del terreno con una buena escala de detalle para obtener una adecuada representación de la respuesta del sistema.

El análisis del movimiento multidireccional del agua presentado en este trabajo debería ser profundizado con el objetivo de obtener más información del comportamiento del sistema. Por ejemplo, se deberían analizar y cuantificar los efectos en el sistema que generan los trasvasamientos de agua, analizando la relación entre las condiciones de equilibrio del sistema y las AAP del Q_{max} y $Q2^{do}$; También sería interesante estudiar el caso para lluvia variable, ya que este es un caso difícil de interpretar físicamente. En el caso de lluvia variable, lo que se obtiene es una “fotografía” de las direcciones de escurrimiento en un determinado instante, pero es difícil imaginar cual va a ser el comportamiento del agua a medida que el escurrimiento se va modificando. Sería interesante plantear este caso con un análisis de tipo “lagrangiano”, siguiendo a lo largo del tiempo el movimiento del agua originada en una celda.

El comportamiento de estos sistemas hace que las técnicas utilizadas para monitorear la respuesta de cuencas no sean aplicables. Debido a esto es necesario plantear métodos alternativos para cuantificar la respuesta de estos sistemas. En función de las características de estos sistemas probablemente sea más adecuado plantear una evaluación regional de la respuesta del sistema que identificar algún punto representativo.

La realización de este trabajo mostró la necesidad de plantear dos tipos de monitoreos en estos sistemas, uno a nivel regional y discreto en el tiempo y otro puntual y continuo. El primer caso comprendería la realización de identificación y cuantificación de las zonas anegadas después de un evento, determina-

ción de los tiempos de traslado del agua sobre el terreno y las rugosidades de los canales, etc. En cambio, el monitoreo puntual estaría relacionado con la medición de caudales en puntos como alcantarillas en las rutas, para estimar la cantidad de agua que escurre en el sistema.

Por último se debe mencionar que la modelación matemática realizada sirvió para obtener una estimación de cuanto podría ser mitigada una inundación, y cuál sería el costo de implantación de las medidas necesarias (Villanueva et al., 2007). También con simulaciones del modelo se analizó el impacto de una inundación sobre la productividad y la producción agrícola, analizando la probabilidad de que un cultivo sea afectado por una inundación de ese tipo, comparando las épocas de ocurrencia de lluvias (con tiempos de retorno alto) con las épocas de cultivo (Cazenave, 2008).

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Vialidad e Hidráulica Rural del partido de Tres Arroyos, Prov. de Bs. As, Argentina.

Este trabajo ha sido desarrollado con financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) – Argentina a través del PID 35765. y la Comisión de Investigadores Científicos (CIC) provincia de Buenos Aires

BIBLIOGRAFÍA

Cazenave G. y Villanueva A.; 2007; “Modelación Superficial en una Cuenca de Llanura con El HEC-

HMS. Caso de Estudio: Cuenca del Azul Superior”. XXI CNA Tucumán. Argentina

Cazenave, G., 2008. “Tormentas máximas y periodos de cultivo en el partido de Tres Arroyos, Pcia. de Buenos Aires”. Informe interno del proyecto PID 35765 - Desarrollo de criterios y pautas para gerenciamiento de recursos hídricos en áreas de llanura.

Cunge, J. A.; Holly, F. M.; Verwey, A. (1980) “Practical Aspects of Computational River Hydraulics” Pitman Advanced Publishing Program.

Fertonani, M. y Prendes, H.; 1983. “Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos”. Actas del Coloquio de Olavarría de Hidrología de las grandes llanuras. Vol. I, pp. 118-156. Buenos Aires, Argentina

Rentería J. y Stenta, H. (2003) “Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial”. Tesis de Grado Ingeniería Civil. FCEIA – UNR. Rosario, Argentina. Inédito.

Riccardi G. (2000). “Cell model for hydraulic modeling”. Journal of Environmental Hydrology. Vol. 8, paper 15, 1-13.

Scioli, C. 2009. Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Tesis Maestría – Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina. 160 pp.

Villanueva, A.; Scioli, C.; Vives, L. y Gil, F. (2007) “Hidrología Superficial en el Partido de Tres Arroyos, Provincia De Buenos Aires (Parte II)”; Informe Técnico 15 Conclusiones

ADAPTACIÓN DEL MÉTODO MULTIESCALA PARA LA SIMULACIÓN DE ACUÍFEROS

ADAPTATION OF MULTISCALE METHOD FOR THE AQUIFERS SIMULATION

Gallardo, Pablo¹; Becerra, Leticia²; Pérez, Ángel³ y Castellanos, Longina⁴

Resumen

Un modelo de flujo de agua subterránea es una herramienta de apoyo para administrar y explotar racionalmente un acuífero, permite predecir los niveles de agua que se obtendrían usando diferentes políticas de explotación, antes de que éstas se implementen. Desde la década de los 70's, los modelos de simulación numérica y matemáticos se han venido empleando para el estudio del agua subterránea (Yeh, 1986). En general, estos modelos son resueltos mediante aproximaciones en diferencias finitas o elementos finitos. El gran desarrollo que han tenido las computadoras ha permitido utilizar algoritmos complejos. Es por eso que en la actualidad tenemos la posibilidad de utilizar mallas con una discretización muy refinada, generando un enorme sistema de ecuaciones que se puede resolver mediante los métodos iterativos. Como resultado se tiene una solución mucho más exacta.

La estimación de parámetros en aguas subterráneas a través de los métodos inversos es en términos matemáticos, un problema mal planteado dado que su solución no es única. Allison (1979) menciona que la no-unicidad e inestabilidad son comúnmente una propiedad interna invariable de los problemas inversos. La inestabilidad de la solución inversa proviene del hecho que en errores pequeños en las cargas hidráulicas puede causar serios errores en los parámetros estimados (Yeh, 1986). Hay que usar entonces una estrategia de regularización.

El Método de Regularización Multiescala (MS) ha mostrado en la práctica su efectividad y constituye una alternativa al Método de Regularización de Tíjonov (TJ), que depende de un parámetro de regularización difícil de encontrar. Ambos métodos de regularización se incorporaron al código fuente del simulador de acuíferos denominado MODFLOW-2000 que ha demostrado ser eficiente y de amplio uso en esta área.

En este trabajo se muestran también algunos resultados obtenidos por los autores en la temática de estimación de parámetros usando ejemplos académicos sintéticos. Los métodos que se discuten en este artículo están a la vanguardia y los resultados han sido alentadores.

Palabras claves: MODFLOW-2000, Modelación, Regularización, Multiescala, Optimización.

Abstract

A model of groundwater flow is a support tool to manage and exploit rationally an aquifer. It can predict the water levels that would be obtained using different policy consideration of exploitation, before these are implemented. Since the early 70's, numerical simulation and mathematical models have been frequently used to study groundwater (Yeh, 1986). In general, these models are solved by finite difference approximations or finite elements. Besides, the great developments of computers have allowed using complex algorithms. That's why we now have the ability to use large discrete meshes generating a huge system of equations that can be solved by iterative methods. The result is a more accurate solution.

Parameter estimation in groundwater through inverse methods in mathematical terms is an ill-posed problem because its solution is not unique. Allison (1979) mentioned that the non-uniqueness and instability are often an invariable internal property of inverse problems. The instability of the inverse solution comes from the fact that small errors in the hydraulic heads can cause serious errors in the estimated parameters (Yeh, 1986). We must then use a strategy of regularization.

Multiscale Regularization Method (MS) has shown its effectiveness in practice and provides an alternative to Tikhonov Regularization Method (TJ), which depends on a regularization parameter difficult to find. Both regularization methods were incorporated in the source code of the aquifer simulator called MODFLOW-2000, which has proven to be efficient and widely used in this area.

This paper also shows some results obtained by the authors on the subject of parameter estimation using synthetic academic examples. The methods discussed in this article are on cutting-edge research and the results have been encouraging.

Keywords: MODFLOW-2000, Modeling, Regularization, Multiscale, Optimization.

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, gallardo@tlaloc.imta.mx

² Consultor independiente, lety.becerra@gmail.com

³ Consultor independiente, aperezdom@gmail.com

⁴ Northwood University, West Palm Beach, USA, longinac@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los métodos inversos son una metodología, mediante la cual se estiman los parámetros partiendo de un grupo inicial de valores, basados en minimizar una función objetivo y en actualizar el nuevo grupo de parámetros a partir del análisis de sensibilidad (Poeter, 1998). Los problemas inversos surgen con más ímpetu debido a su importancia científica, económica, social y política. El conocimiento de los métodos de solución de los problemas inversos, ha demostrado su capacidad al permitirle al modelador reducir a un mínimo las discrepancias entre los números generados por el modelo pertinente y las mediciones correspondientes. En la modelación de un acuífero, cualquiera que sea su propósito, explotación o control de la contaminación, donde las matemáticas constituyen una herramienta fundamental para la construcción de modelos, es de gran utilidad economizar tanto en tiempo como en costos en la obtención de los parámetros físicos del acuífero; sin menoscabar la importancia de obtener parámetros in situ.

El objetivo del presente trabajo es adaptar el Método de Optimización Multiescala al código numérico de modelación de flujo subterránea MODFLOW (USGS, 2000). Posteriormente realizar una implementación computacional para la estimación de parámetros. Para esto se realizaron dos alternativas o escenarios, el primero es un ejemplo sintético de la Subcuenca Aeropuerto del acuífero Ariguanabo, Cuba y el segundo es una aplicación al acuífero del Valle de Querétaro, Querétaro, México.

Tradicionalmente en los modelos de flujo se utiliza el método de prueba y error para llevar a cabo la calibración del modelo. Sin embargo mediante las técnicas inversas es necesario contar con mediciones de la carga hidráulica en diferentes puntos (pozos de observación o explotación), que es un proceso más económico que el de conocer los parámetros hidráulicos a través de las pruebas de bombeo que resultan ser muy costosas, pero necesarias, las cuales nos proporcionan mediciones puntuales.

METODOLOGÍA

En este trabajo se adaptó el método de Multiescala al código numérico MODFLOW-2000 para la estimación de parámetros en acuíferos que eliminan el mal planteamiento que, por naturaleza, presentan los problemas inversos.

Recordemos que el problema a resolver es, encontrar los parámetros χ que caracterizan al medio poroso, tal que:

$$\min_x \| F(x) \| \quad (1)$$

$$F(x) = \sum_{i=1}^{nobs} (h_i^c - h_i^{obs})^2 \quad (2)$$

$nobs$	número de observaciones
h_i^{obs}	cargas observadas
h_i^c	cargas calculadas por el modelo

Inicialmente se creó una variante de MODFLOW-2000 en doble precisión, luego de lo cual se sustituyó el módulo de optimización del mismo (GAUSS-NEWTON) en su variante Levenberg Marquardt (USGS, 2000) por una implementación de Quasi-Newton de (Nocedal J. y Wright, 1999). Esta sustitución se hizo manteniendo el cálculo del gradiente, y por ende, el cálculo de sensibilidades implementadas en MODFLOW-2000. Para esto fue necesario una intensa exploración de los diferentes módulos fuentes (Fortran90) de este software.

Este nuevo optimizador, aunque carece de las propiedades de regularización del método de Levenberg Marquardt (USGS, 2000) (que funciona sólo cuando se conoce un parámetro óptimo, cosa muy difícil en la práctica), es un optimizador con cotas, cosa importante en este tipo de problemas donde, por lo general, existe información sobre rangos aceptables para los parámetros a estimar y es, en esencia, una forma de regularización.

MODFLOW-2000 es un modelo tridimensional de aguas subterráneas en diferencias finitas que simula los flujos estacionarios y no estacionarios en configuraciones irregulares, en las cuales los acuíferos pueden ser confinados y no confinados.

Para el caso práctico la ecuación más general para flujo transitorio en tres dimensiones para un acuífero confinado en un medio heterogéneo y anisotrópico es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S_z \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

donde:

h	carga hidráulica, (L);
K_x, K_y, K_z	componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones x, y y z (L/T);
T_x, T_y, T_z	componentes de la transmisividad hidráulica en las direcciones x, y y z , para acuíferos confinados $Kh = T(x, y, z)$, (L^2/T^2);
Q	fuelle o sumidero local por unidad de volumen, ($1/T$);
S_s	coeficiente de almacenamiento específico, (L^{-1});
x, y, z	coordenadas espaciales, (L);
t	tiempo, (T).

Suponiendo que conocemos las propiedades antes mencionadas, asociadas con los parámetros K y S , es posible entonces resolver el modelo de flujo con condiciones iniciales y de borde correspondientes al área de interés, y obtener como respuesta los niveles de agua o altura piezométrica h , que es la variable que nos reporta la cantidad de agua disponible en cierto momento.

El problema inverso se plantea de la siguiente manera: se conoce el efecto (h) y se busca la causa (K y S) que lo provoca, en otras palabras dada la carga hidráulica (h), se trata de determinar un grupo óptimo de parámetros (K y S) que reproduzcan dichas observaciones.

Breve descripción del método de regularización “optimización multiescala”

El problema de estimación de parámetros en un acuífero es lo que se llama en matemáticas un problema mal planteado y, por tanto, necesita ser regularizado. El Método de Optimización Multiescala ha mostrado en la práctica ser una posible vía para la solución de este problema.

Se trata de una técnica de regularización cuya idea central consiste en construir una sucesión de aproximaciones discretas de K en subespacios de dimensión finita definidos a partir de discretizaciones cada vez más finas de la región del acuífero, iniciando con una discretización gruesa hasta llegar a una óptima para resolver el problema por el método de prueba y error. El número de discretizaciones juega en este caso el papel de parámetro regularizador (Pérez, A. y Castellanos, L., 1999).

Asumiremos para mayor facilidad en la explicación que estamos modelando un acuífero confinado, que el coeficiente S es conocido y que sólo tenemos que estimar T .

La malla es rectangular y los diferentes niveles de discretización son Δ_k , las sucesiones empleadas en Multiescala se muestran en la figura 1.

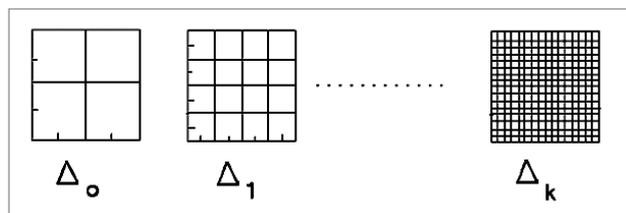


Figura 1. Proceso de optimización Multiescala.

Buscamos T en un subespacio de dimensión finita.

$$T_{\Delta_0}^- = \arg \min \| L(T_{\Delta_0}) - h_{\Delta_0} \| ^2 \quad (4)$$

La idea principal es resolver en una malla “gruesa” Δ_0 el problema de optimización discreta, después, se divide cada rectángulo y la optimización continúa por el siguiente algoritmo:

para $k = 0$, partiendo de $T_{\Delta_0}^-$ encontrar $T_{\Delta_0}^-$ para $k = 1$ hasta ms (nivel multiescala) se resuelve para obtener T para (Δ_k) habiendo interpolado $T_{\Delta_{k-1}}^-$ a los puntos de la malla Δ_k .

$$T_{\Delta_0}^- = \arg \min \| L(T_{\Delta_k}) - h_{\Delta_k} \| ^2 \quad (5)$$

Descripción de las posibles diferentes implementaciones de “multiescala” sobre MODFLOW–2000

Existen diferentes formas de implementar “multiescala”. En el presente trabajo usaremos la que hemos llamado “semiautomática” y consiste en lo siguiente:

Usando las facilidades que brinda el software ArgusONE (Argus, 1997) se pueden generar diferentes grupos de ficheros, un grupo para cada escala, y correr el estimador secuencialmente, es decir: se obtiene un grupo de parámetros óptimos en la escala cero y después tomar como punto inicial para las siguientes escalas los parámetros obtenidos en escalas anteriores previa una interpolación adecuada. En cada paso MODFLOW–2000 utilizaría los ficheros generados por ArgusONE para la escala correspondiente con excepción de los ficheros de los parámetros a estimar que se sustituye por los valores obtenidos anteriormente mediante interpolación. El programa que tiene esta implementación se denominó MFK_MS.

Debido a que usamos esquemas centrados en las celdas, las diferentes mallas multiescalas serán del tipo:

$$x_0^{ms} \times x_0^{ys} \quad (6)$$

En futuros trabajos se desarrollará una implementación “automática” que definirá el número de escalas a usar, partiendo de una escala cero y posteriormente generar en forma exponencial las siguientes escalas. Las mallas generadas para cada una de las escalas serán creadas en ArgusONE. La última malla de la secuencia de escalas, es la denominada escala máxima.

Gradiente por diferencias sobre MODFLOW–2000

Debido a que el método de sensibilidades implementado en MODFLOW–2000 funciona sólo para el caso en que el problema esté bien determinado es decir, el número de observaciones (ND) sea mayor al número de parámetros a estimar (NPE), se implementó otra forma para el cálculo del gradiente. Debido a la complejidad que tiene MODFLOW–2000 en el cálculo del valor de la función, se hizo necesario hacer cambios en la estructura del mismo e implementar un método más sencillo para el cálculo del gradiente. Por tal motivo se eligió el gradiente por diferencias que básicamente está dado por la fórmula:

$$\frac{F(x + \sigma) + F(x)}{\sigma} \quad (7)$$

donde σ es la precisión de la máquina.

La figura 2 muestra los cambios introducidos en el diagrama general de MODFLOW-2000 para lograr nuestro objetivo.

Funcional de Tíjonov

Uno de los métodos más eficaces, al menos en teoría, para la regularización de problemas mal planteados como el que nos ocupa, es el Método de Regularización de Tíjonov, que a grandes rasgos, consiste en sustituir la resolución del problema inverso “mal planteado” por la resolución de una familia de problemas “vecinos” bien planteados, dependientes de un parámetro de regularización, en cada uno de los cuales se minimiza el funcional regularizante:

$$R_{\delta}^{\alpha}(z) = \|Az - u_{\delta}\|^2 + \alpha S(z) \quad (8)$$

El funcional que se usó en el programa MFK_MS es el siguiente:

$$S(z) = \|(z \uparrow)^2 \quad (9)$$

donde (\uparrow) un operador diferencial.

En el programa se presenta la opción de usar o no regularización de Tíjonov y en caso positivo se pide el parámetro de Tíjonov. Es bueno destacar que el cálculo de este parámetro no es nada trivial y actualmente se dedica un gran número de trabajos a esto (Castellanos L., et al., 2002).

Tipos de funcionales

Como parte de los cambios realizados a MODFLOW-2000 está la incorporación de dos nuevas formas del cálculo del funcional que se requiere minimizar. Estos funcionales se definen de la siguiente forma:

Ftipo0 es el tipo de funcional que trae implementado MODFLOW-2000.

Ftipo1 es el funcional que usa para comparar el valor de la carga de la celda donde se encuentra la observación.

Ftipo2 es el funcional que usa para comparar el valor interpolado en *ialfa* celdas cercanas a la observación.

Un inconveniente que se revela inmediatamente al aplicar el método “multiescala” en su forma actual y sobre todo en las últimas escalas es que el número de observaciones (*ND*) puede ser menor que el número de parámetros que se desea estimar (*NPE*). Esto nos lleva a decidir si resolver o no problemas sobredefinidos o subdefinidos, es decir, dejar va-

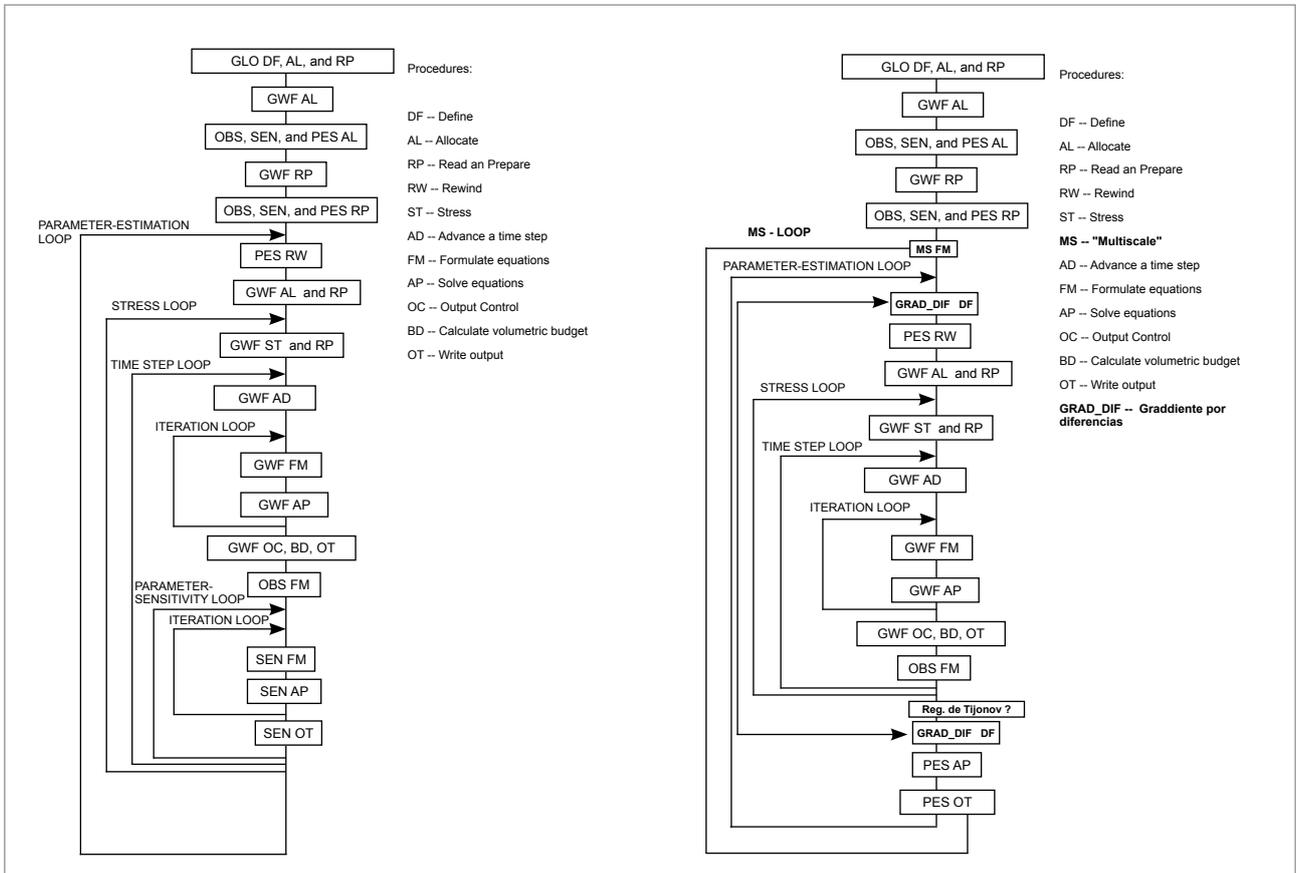


Figura 2. a) Diagrama de flujo general de MODFLOW-2000; b) Diagrama general de MFK_MS.

riables libres en el proceso de minimización y usar métodos que garanticen que se cumpla la condición $ND > NPE$ al estilo de MODFLOW-2000 (Método de Levenberg Marquardt), cosa que puede ser alcanzada interpolando adecuadamente (método del kriging) las observaciones a un mayor número de celdas hasta que se cumpla la condición ($ND > NPE$) (Doherty J., 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los problemas sintéticos que analizamos en este trabajo son la subcuenca Aeropuerto del acuífero Ariguanabo en La Habana, Cuba y el acuífero del Valle de Querétaro, México con una sola capa. Ambos problemas, aún cuando son sintéticos, mantienen muchas de las propiedades de los problemas reales. Esto se hizo así para cuando se pase al problema real tener una idea más exacta del mismo.

Acuífero Ariguanabo, subcuenca Aeropuerto

El área de estudio se localiza en la provincia La Habana Cuba, subcuenca Aeropuerto, con una superficie de 40 km². En la figura 3 se muestra la localización, mapa de transmisividades ($T=Kd$) y pozos de observación para la subcuenca Aero-

puerto. En la zona norte se impusieron condiciones de contorno de Neumane ($T \frac{\partial h}{\partial n} = constante 1 (t)$) y en la zona suroeste condiciones de Dirichlet ($h = constante 2 (t)$), mostradas en la tabla 1. La malla usada para esta región en el programa ESTIM (Pérez A. y Gómez, S., 2001) fue de dimensión 16x16 (nodo centrado, Gómez, S., et al, 1998).

Tabla 1. Condiciones iniciales del acuífero Ariguanabo.

Tiempo	Cte1(t)	Cte2 (t)		
		P-80	P-85	P-91
T1	235	57.0	55.0	54.9
T2	1482	57.8	56.0	55.1
T3	1282	57.2	55.5	54.9
T4	1046	57.7	55.5	54.5

Nota: multiplicar la Cte1(t) por el área de la celda

En la figura 4 se muestran las diferentes mallas generados con ArgusONE para ser usada por MODFLOW-2000 (centrada en la celda) en el acuífero Ariguanabo.

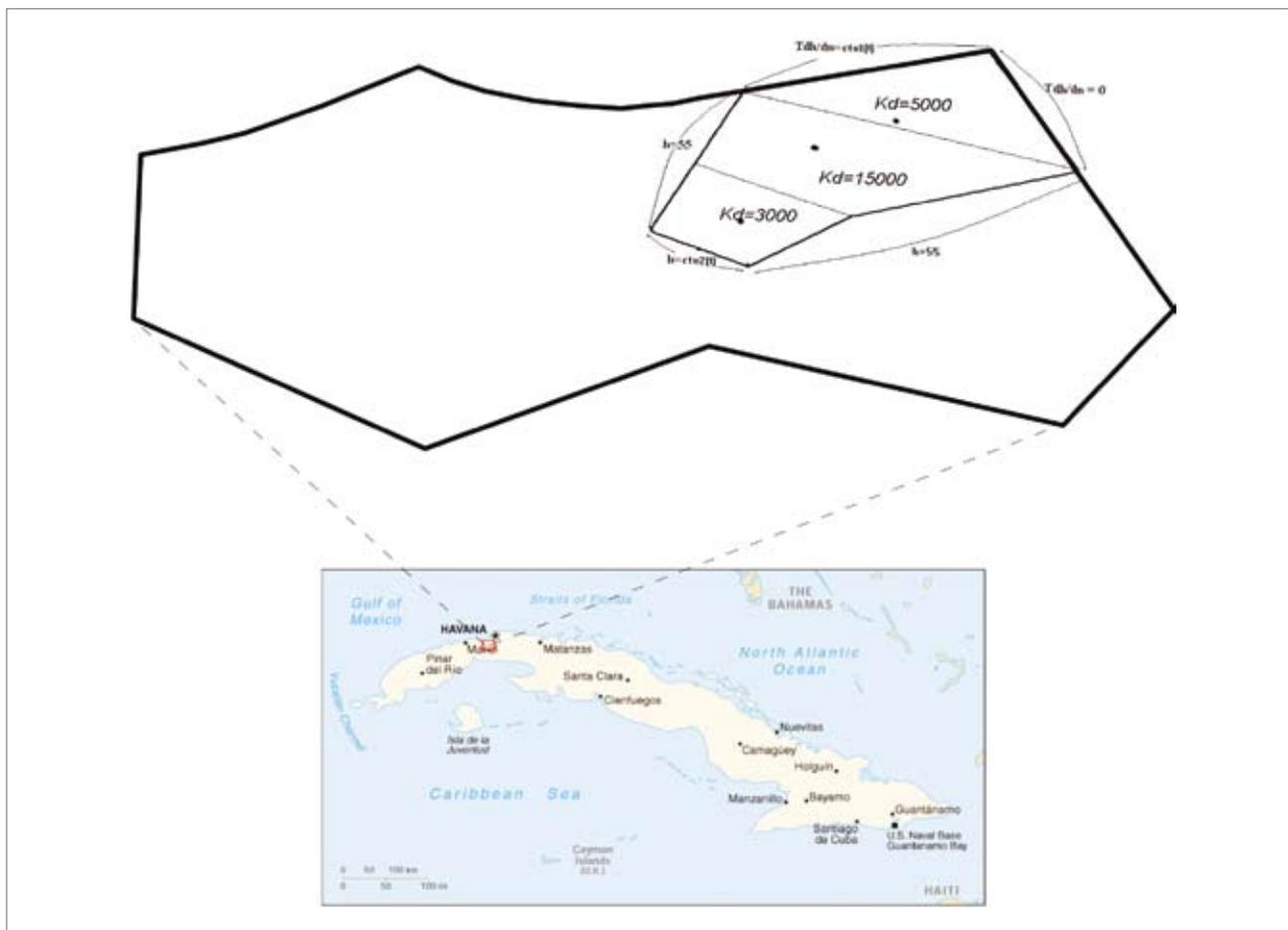


Figura 3. Modelo conceptual del acuífero Ariguanabo, subcuenca Aeropuerto.

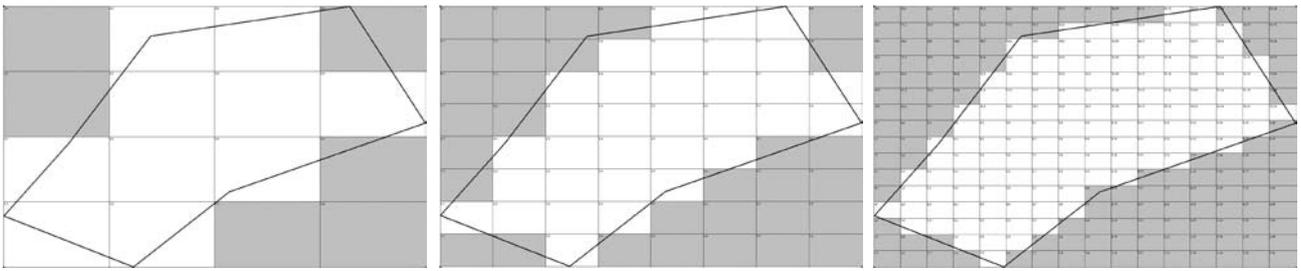


Figura 4. Multiescala de 4x4, 8x8 y 16x16 para el acuífero Aeropuerto.

Acuífero Valle de Querétaro

Para la experimentación numérica con el método multiescala se disminuyó la complejidad del modelo original del acuífero Valle de Querétaro (GUYSA, 1996): reduciendo el número de capas, de cinco a una. Para obtener los valores de la conductividad hidráulica en esta capa se consideró el promedio de las conductividades hidráulicas de los dos medios (poroso y fracturado). Se consideraron 406 pozos de extracción para calcular su volumen y 41 pozos de observación para obtener los niveles. Las fronteras en el modelo original fueron consideradas como condición de borde de carga general (GHB, por sus siglas en inglés), ubicadas de la siguiente manera: al Norte, los valles de Buenavista y Chichimequillas-Amascala; al Este, San Juan del Río-Pedro Escobedo; al Sur, el valle

de Humilpan; estas tres fronteras son consideradas entradas de flujos laterales. Y al Oeste se localiza la única frontera considerada de salida, hacia el valle de Apaseo El Alto, Gto (Figura 5).

El ejemplo sintético para este acuífero se modeló como freático. La recarga representada en lámina diaria fue de 0.00023 m/día aplicada a cada una de las celdas activas del modelo y el rendimiento específico utilizado es de 0.1 (que corresponde a material detrítico sin consolidar de origen volcánico). Se consideraron tres periodos de stress con lapsos de cinco años cada uno (1981-1985, 1985-1990 y 1990-1995) para discretización del tiempo (GUYSA, 1996). En la figura 6 se muestran las diferentes mallas generadas con ArgusONE para ser usada por MODFLOW-2000 (nodo centrado) del acuífero Valle de Querétaro.

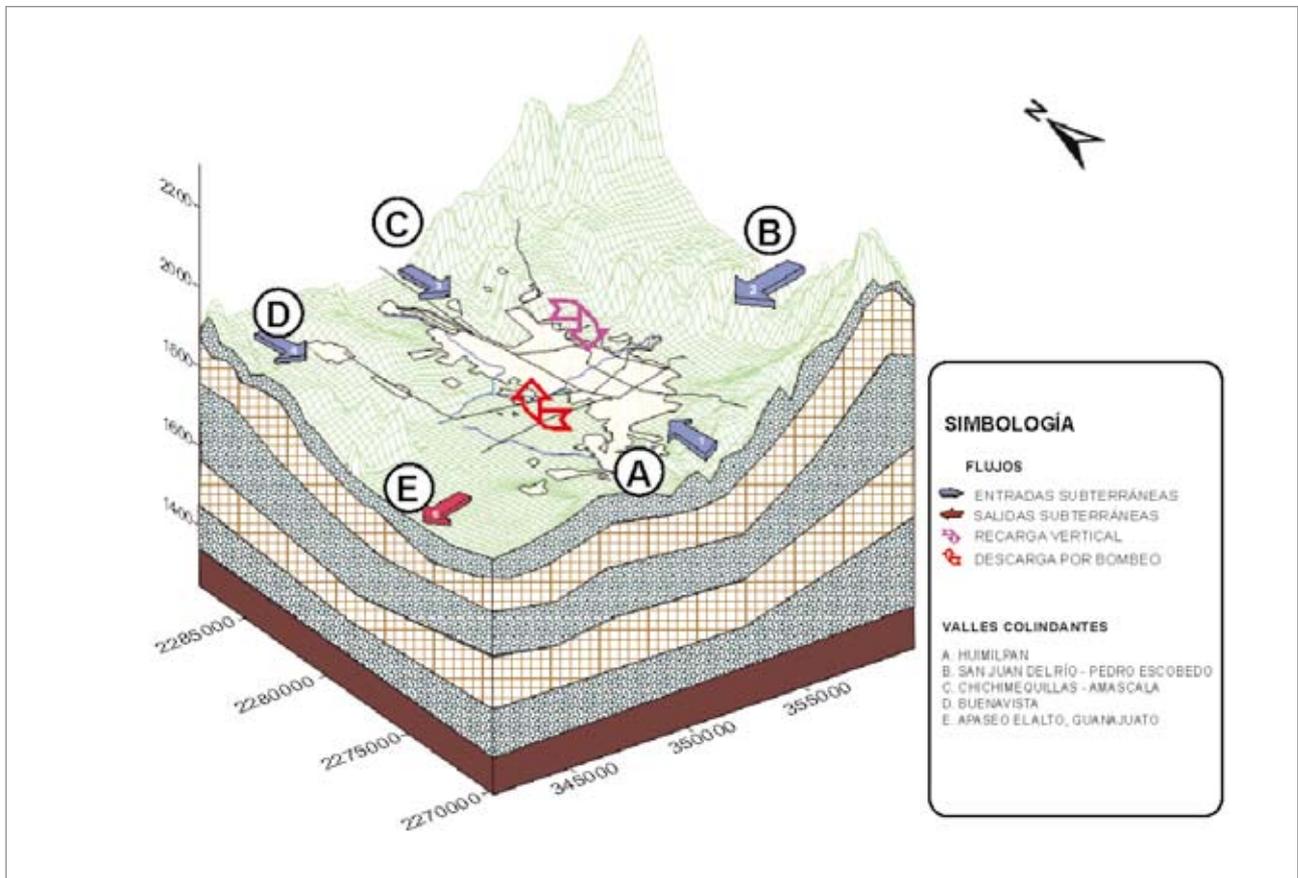


Figura 5. Modelo conceptual del acuífero Valle de Querétaro.

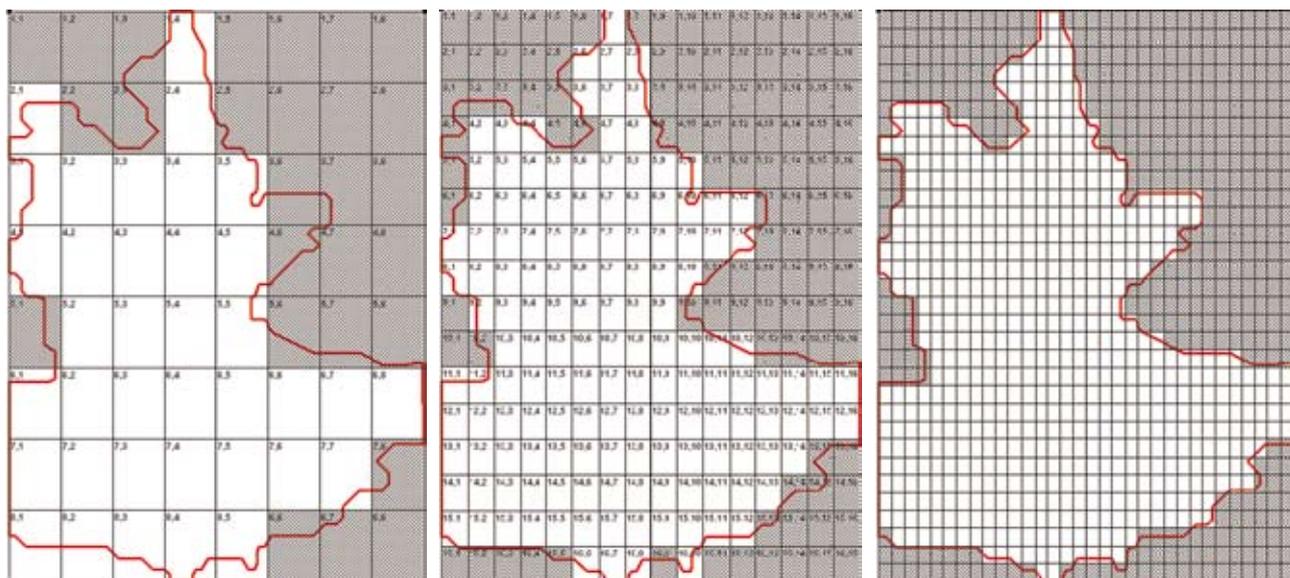


Figura 6. Multiescala de 8x8, 16x16 y 32x32 para el acuífero Valle de Querétaro.

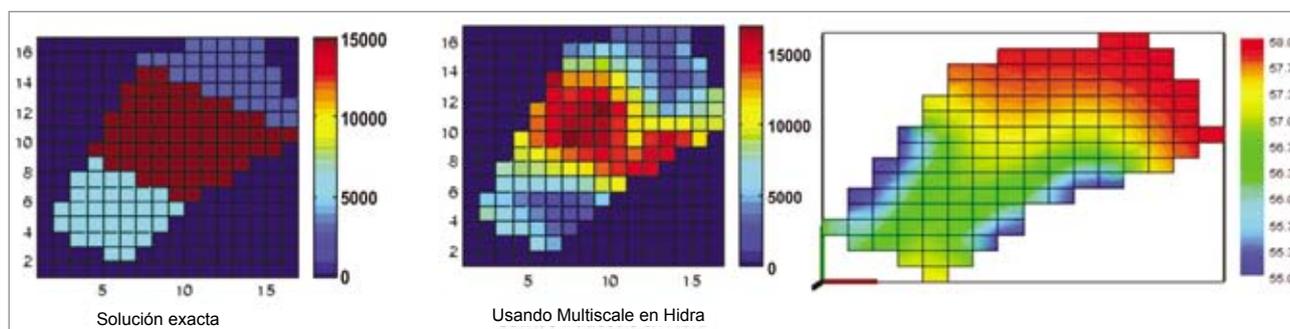


Figura 7. a) Resultados del problema por el método de prueba y error, b) Estimación de K con Multiescala, y c) Representación de (h) con Multiescala.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente trabajo no se dan resultados gráficos de todas las opciones que brinda el programa MFK_MS, sólo se muestran los considerados más representativos, figura 7 (Pérez, A. et al., 2002). Los experimentos realizados en el acuífero Ariguanabo usando MODFLOW-2000 con los dos optimizadores que se probaron se pudieron reproducir, tal y como se esperaba, las tres zonas del problema.

En la figura 8 se muestran dos diferentes calibraciones del acuífero del Valle de Querétaro (Gallardo, 2005). La de la izquierda usando MODFLOW-2000 usando el problema sintético descrito anteriormente (problema de prueba y error) y los gráficos de la derecha son la carga hidráulica como resultado de la calibración con multiescala y la estimación de la conductividad hidráulica. Obsérvese la similitud de estas curvas de nivel, que representan una buena estimación de las conductividades obtenidas por multiescala.

Las calibraciones realizadas usando MFK_MS mostraron, en general, que son más confiables aquellas que incluyen regularización, sea "multiescala" o regularización de Tíjonov.

En la figura 9 se grafican las cargas hidráulicas observadas contra cargas hidráulicas calculadas, los resultados de la simulación nos indica que los valores de carga hidráulica están subestimados. En la misma figura se muestra el ajuste del modelo mediante el reporte de estadísticos de los residuales entre valores calculados y observados. Se observa que la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMS) es mucho menor al 10%, esto nos indica que tiene buen ajuste (Waterloo Hydrogeologic, 2004), además son reportados otros estadísticos de interés.

CONCLUSIONES

MODFLOW ha demostrado ser una herramienta poderosa en la simulación de acuíferos y para la experimentación numérica. Las herramientas creadas a partir de cambios introducidos a MODFLOW-2000 permitirán, a partir de una amplia experimentación establecer comparaciones concluyentes de las técnicas propuestas y algunas existentes que permitan optar por adquirir o actualizar software profesional en la temática.

Las herramientas creadas, MFK_MS, se han usado y obtenido buenos resultados en problemas sintéticos

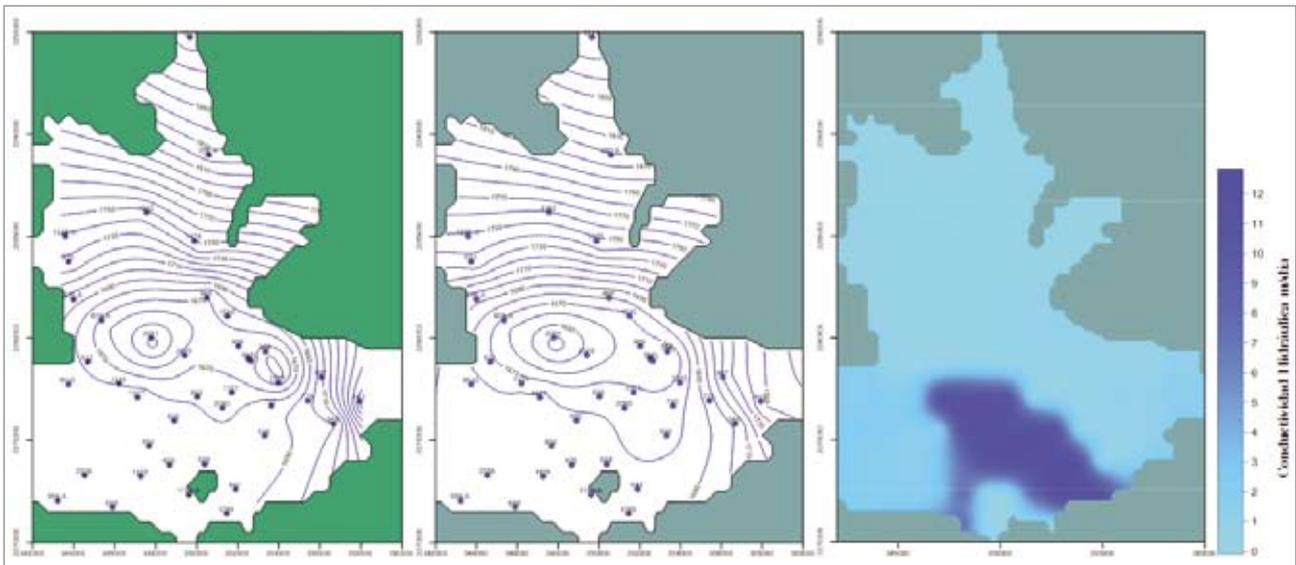


Figura 8. a) Resultados del problema por el método de prueba y error, b) Representación de (h) con Multiescala, y c) Estimación de K con Multiescala.

en los acuíferos Aeropuerto (Cuba) y Valle de Querétaro (México) de una sola capa.

Como conclusión podemos decir que el proceso de cálculo es muy rápido para las primeras mallas debido a que la dimensión de los espacios es pequeña y la función objetivo resultante es suave y convexa, lo que permite obtener una buena aproximación con un bajo costo computacional. El método nos permite obtener el mismo mínimo a partir de distintas aproximaciones iniciales.

Estos resultados pueden ser aplicados a casos reales.

El inconveniente fundamental es que aumenta considerablemente el número de parámetros a estimar, por lo que sería necesaria una adaptación de “multiescala” al problema con zonas.

Implementar una “multiescala” más automática, así como hacer comparaciones con simulaciones realizadas con otro software de estimación como PEST (Doherty J., 2003).

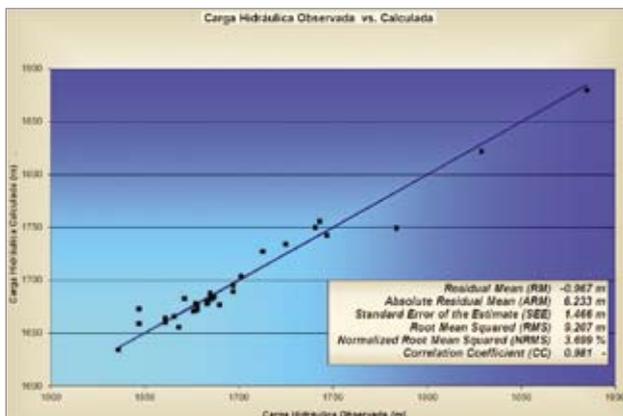


Figura 9. Estadísticos de la calibración en el acuífero Valle de Querétaro

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argus Interware, Inc. 1997. User's Guide Argus ONE. Argus Open Numerical Environments—A GIS Modeling System. Versión 4.0. Argus Holdings. Jericó, New York. USA.

Castellanos J. L, Gómez S., Guerra V. 2002. Triangle method for calculating corner of L-curve. Applied Numerical Mathematics. Vol. 43: 359–373.

Doherty J. 2003. Ground Water Model Calibration Using Pilot Point and Regularization. Ground Water. Vol. 41, no. 2:170–177.

Gallardo, P. 2005. Estimación de la conductividad hidráulica del acuífero del Valle de Querétaro mediante técnicas inversas. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 106 p.

Gómez S., Pérez A. D., Álvarez Rosa M. 1998. The Multiscale Optimization for aquifer Parameter Identification with noise data. Computational Methods in Water Resources XII. England. Computational Mechanics Publications. Vol. 2.

GUYSA, S.A. de C.V. 1996. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro. Geofísica de Exploraciones. México.

Nocedal J., Stephen J. Wright. 1999. Numerical Optimization. Springer Verlag. New York.

Pérez A., Castellanos L. 1999. Algoritmo de discretización para diferencias finitas en una región plana convexa. Reporte de Investigación. ICIMAF. ISSN 0138–8916. Habana, Cuba.

Pérez Ángel D., Gómez S. 2001. ESTIM Programa para la estimación de transmisividades en acuíferos confinados. Breve manual de usuario.

Pérez Ángel D. et al. 2002. Informe de resultados del convenio IIMAS-IMTA: Comparación de Métodos de Modelación Inversa para la caracterización de acuíferos. Jiutepec, Morelos.

Poeter, E. P. 1998. Documentation of UCODE, A computer code for universal inverse modeling, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 98-4080.

Waterloo Hydrologic, 2004. User's manual: Visual MODFLOW v.4.0, Waterloo Hydrogeology, Inc., Ontario, Canada.

Yeh, William 1986. Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem. Water Resources Research. Vol. 22, no. 2:95-108.

USGS. MODFLOW-2000. 2000. The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model User Guide to the Observation, Sensitivity, and Parameter-Estimation Processes and Three Post-Processing Programs. Open-File Report 00-184, Denver, Colorado.

DISEÑO DE REDES DE MONITOREO APOYADAS POR HERRAMIENTAS SIG Y MODELACIÓN GEOESPACIAL

MONITORING NETWORK DESIGN SUPPORTED BY GIS TOOLS AND GEOSPATIAL MODELING

Cano Casas, Lina¹ y Escobar Martínez, John Fernando²

Resumen

En el desarrollo de este trabajo se presenta la implementación de una metodología para la identificación de sitios potenciales de monitoreo de calidad de aguas superficiales en la cuenca del Río Grande (Colombia), a partir del uso de herramientas SIG y análisis multicriterio con el Método de las Jerarquías Analíticas (MJA). En la valoración de pesos en el análisis multicriterio se consideraron tres factores generales. Se realizó la ejecución del modelo de cuenca, integrado por los pesos de los criterios evaluados y por las fuentes de información cartográficas, utilizando herramientas de análisis espacial de ArcGIS. Los sitios potenciales se compararon con una red de monitoreo propuesta basada en el criterio de expertos. Aunque los resultados muestran concordancia en muchos casos, en otros, el método descarta los sitios propuestos, sugiriendo que el método puede servir como complemento en la selección de puntos de monitoreo basado en el criterio de expertos.

Palabras claves: Análisis multicriterio, red de monitoreo, calidad del agua, SIG.

Abstract

This work presents a methodology to identify potential sites for water quality monitoring in the Rio Grande catchment (Colombia), using GIS tools and a multi-criteria analysis based on the Analytical Hierarchy Process Method (AHP). Three general factors were considered in the multi-criteria valuation analysis. A layered model of the catchment, consisting of the weighed criteria and cartographical information sources, was run to locate the monitoring sites using spatial analysis tools from ArcGIS. The potential sites were compared to a previously proposed monitoring network based on expert's criteria. Although the results show good agreements in most cases, in others the method discarded the proposed sites, suggesting that the method may serve as a complement to expert-based site selection.

Keywords: Multicriteria analysis, monitoring network, water quality, GIS.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el soporte de la vida en la tierra. A pesar de ser una sustancia indispensable para todos los seres vivos, las actividades humanas han degradado su calidad hasta tal punto que ponen en peligro la supervivencia en el planeta. Por ello deben tomarse medidas que contribuyan a dar un uso sostenible y de esta manera se pueda garantizar el acceso futuro a este recurso invaluable.

Para evaluar el estado del recurso hídrico, las autoridades ambientales requieren determinar las tendencias en la calidad de los cuerpos acuáticos y la manera en la cual los ecosistemas son afectados por la descarga de contaminantes. Teniendo en cuenta que la información disponible para este propósito es limitada en la mayor parte de los casos, se requiere del diseño de programas y redes de monitoreo, que permitan recopilar la información necesaria y de esta manera determinar el cumplimiento de los objetivos de calidad establecidos para cada cuerpo de agua, según sus usos y los impactos ejercidos. Dadas las

limitaciones presupuestales para la implementación de medidas preventivas y correctivas tendientes a mejorar la calidad del recurso hídrico, se hace necesario efectuar un diagnóstico previo que permita identificar las zonas críticas y sobre estas realizar los mayores esfuerzos, así como realizar seguimiento y control.

Teniendo en cuenta la variabilidad en las condiciones de cada zona específica y la escasez de la información disponible para realizar el diseño, es necesario sistematizar la metodología con que se efectúa la localización de los sitios de monitoreo a fin de que sea general e independizarla de preferencias para cada caso en cuestión, teniendo en cuenta los objetivos para la ordenación del recurso hídrico.

En este artículo se presenta la implementación de una metodología enfocada en la identificación de los sitios potenciales para realizar vigilancia de la calidad de las aguas superficiales, a partir del uso de herramientas SIG y la modelación geoespacial en la cuenca del Río Grande (Colombia).

1 Msc. Ingeniería Civil. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Tel: (+574) 2105591, e-mail: lcano@udea.edu.co

2 Msc. en Medio Ambiente y Desarrollo. Candidato a PhD. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia, e-mail: jfescob@yahoo.com

Artículo enviado el 20 de enero de 2011

Artículo aceptado el 9 de marzo de 2011

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Grande se localiza en la subregión del norte de Antioquia, entre los 6° y 7° de latitud norte y 75° y 76° de longitud oeste. En la cuenca la temperatura oscila entre los 12°C y 17°C, con una temperatura promedio anual de 14°C. La precipitación anual varía entre los 2.000 mm y 2.500 mm (Corantioquia - Ecosistemas. 2005). El área total de la cuenca es de 1159 km², la longitud del cauce principal es de 75 km y el caudal promedio del Río Grande es de 35 m³/s.

De la cuenca del Río Grande se analizaron, como se muestra en la en la figura 1, las microcuencas de la parte alta del río Chico y de las quebradas San José, Amoladora, El Diablo, San Francisco, Quebradona, Piedrahita, Donmatías, La Torura, Don Diego, El Hato, San Juan, Bramadora y Oro Bajo.

Las microcuencas se seleccionaron a partir de los usos en las corrientes que puedan causar alteraciones en el recurso hídrico, y para ello se analizaron los cuerpos de agua que sirven como fuentes abastecedoras de agua potable para los principales centros poblados y cabeceras municipales, receptores de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales y fuentes abastecedoras de agua para la agricultura y acuicultura (Universidad de Antioquia – Corantioquia. 2009).

En la tabla 1 se presentan las áreas de cada una de las microcuencas, así como el uso principal del recurso. El área analizada representa el 43% del área total de la cuenca. En estas microcuencas se encuentran los municipios de Belmira, Donmatías, Entreríos, San Pedro de los Milagros, cuya población se muestra en la tabla 2.



Figura 1. Microcuencas analizadas pertenecientes a la cuenca de Río Grande.

Tabla 1. Características de las microcuencas analizadas

Microcuenca	Área (km ²)	Uso del agua
San Francisco	6,48	Acuícola
Río Chico	55,87	Receptor de vertimientos Consumo humano
San José	6,50	Acuícola
Amoladora	10,75	Acuícola
Quebradona	71,64	Consumo humano Receptor de vertimientos
El Diablo	14,51	Acuícola
La Piedrahita	10,93	Consumo humano Acuícola
Donmatías	21,67	Receptor de vertimientos
La Torura	82,33	Consumo humano Receptor de vertimientos
Pontezuela	7,09	Consumo humano
Don Diego	55,33	Acuícola
El Hato	55,08	Consumo humano Receptor de vertimientos
San Juan	17,53	Consumo humano
Bramadora	52,97	Receptor de vertimientos
Oro Bajo	25,58	Acuícola
Área total	494,96	

Tabla 2. Población abastecida en la zona de estudio

Microcuenca	Población centros poblados	Población cabecera municipal
San Francisco	114	Belmira (1.683 habitantes)
Río Chico	392	
San José	206	
Amoladora	337	
Quebradona	485	
El Diablo	240	Donmatías (11.397 habitantes)
La Piedrahita	241	
Donmatías	1.310	Entreríos (3.943 habitantes)
La Torura	2.293	
Pontezuela	-	San Pedro de los Milagros (10.765 habitantes)
Don Diego	1.488	
El Hato	1.811	
San Juan	1.085	Santa Rosa de Osos (14.703 habitantes)
Bramadora	682	
Oro Bajo	705	

METODOLOGÍA

Los modelos representan las características esenciales de un sistema y pueden ser herramientas valiosas para la gestión ambiental debido a que aumentan el entendimiento de las complejidades y de las singularidades de una situación dada y su respuesta a las decisiones de gestión u otros cambios (Saloranta, 2006).

Con el fin de identificar los sitios potenciales para realizar monitoreo de calidad de las aguas superficiales, se empleó el análisis multicriterio a través del método de las jerarquías analíticas (MJA), en integración con técnicas de modelación geoespacial. El análisis multicriterio es un enfoque general que se ha aplicado a una amplia gama de situaciones de gestión de los recursos naturales. La evaluación multicriterio es un término general para describir un conjunto de enfoques formales que buscan tener en cuenta criterios múltiples para ayudar a individuos o grupos a explorar las decisiones de importancia (Mendoza & Martins, 2006).

La integración de la tecnología SIG con modelos espaciales se convierten en una herramienta para la descripción, explicación, planificación o predicción, para aquellos procesos de naturaleza espacial, lo cual favorece la toma de decisiones (Gómez & Barredo, 2006).

A continuación se describe la implementación de la metodología seleccionada para la zona de estudio.

Identificación de los aspectos y criterios utilizados en el modelo

Esta primera fase incluye la identificación de los aspectos que permitieron analizar la zona de estudio y evaluar los posibles sitios para localizar las estaciones de monitoreo.

Una de las limitaciones encontradas para introducir algunos criterios de priorización considerados relevantes como: localización de vertimientos puntuales, sitios de captación de acueductos y concesiones de agua, fue la ausencia de información georeferenciada y la falta de actualización de esa información, por lo tanto no pudo ser tenida en cuenta dentro del modelo.

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario el procesamiento de diversas fuentes de información básica y temática referente a vías, cascos urbanos, red de drenaje y curvas de nivel, y fue extraída de la Cartografía básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:25.000.

A partir de la información disponible se consideraron tres aspectos generales a tener en cuenta en la asignación de los pesos para el análisis multicriterio:

- Aspectos antrópicos: involucran aquellas variables relacionadas con actividades humanas que pueden causar alteraciones en el recurso hídrico.

- Aspectos fisiográficos: se relacionan con los factores físicos que propician o impiden la localización de una estación de monitoreo en algún punto determinado de acuerdo a su accesibilidad.
- Aspectos de calidad del agua: son aquellos aspectos que involucran la calidad del recurso y su potencial de contaminación.

Cada uno de los aspectos generales agrupa los criterios de priorización de los sitios para realizar el monitoreo de calidad del agua, a través de una función de pesos ponderados. En la figura 2 se presentan los aspectos y criterios considerados para realizar el modelo espacial.

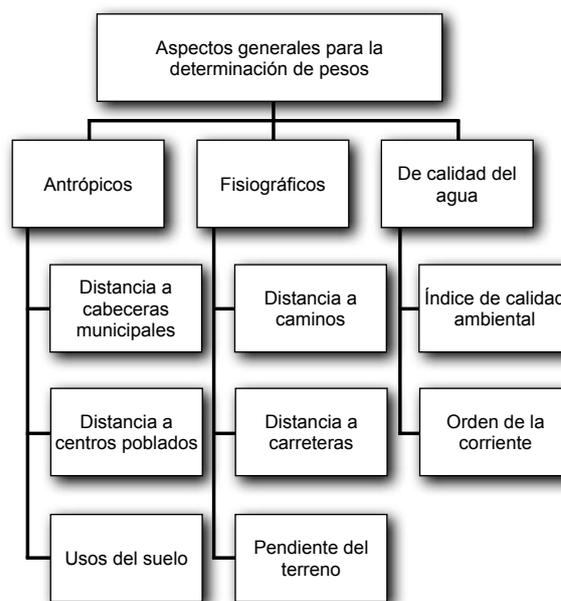


Figura 2. Aspectos y criterios empleados

Descripción de los criterios utilizados

- Distancia a centros poblados y a cabeceras municipales: estos criterios fueron considerados dado que la mayor parte de las corrientes cercanas a un asentamiento humano son receptoras de los vertimientos de aguas residuales domésticas. En la medida que una corriente esté más cerca de un centro poblado o cabecera, será mayor la posibilidad de que se encuentre afectada por la descarga de los vertimientos mencionados. La cabecera municipal es el área geográfica que está definida por un perímetro urbano y corresponde al lugar en donde se ubica la sede administrativa de un municipio, mientras que el centro poblado es una concentración de mínimo veinte viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural de un municipio (IGAC, 1996). Dado que la cabecera municipal concentra una mayor población que un centro poblado, se consideraron de manera separada dentro de los criterios utilizados.

- Usos del suelo: cada unidad de suelo en una cuenca tiene un potencial de contaminación asociado y depende fundamentalmente de su topografía, uso y las características de la vegetación (Vieux & Farajalla, 1994). Es por ello que en el análisis se consideraron los diferentes usos y tipos de suelos en la cuenca y su grado de afectación a la calidad del agua. Las áreas donde la actividad económica que se desarrolla pudiera representar una carga contaminante puntual o difusa, son las que requieren mayor vigilancia en la calidad del recurso hídrico.
- Distancias a caminos y a carreteras: dentro de los aspectos fisiográficos las distancias de las corrientes a las vías de acceso son parámetros habituales de consideración para localizar un sitio de muestreo. Si un sitio se encuentra muy alejado de una vía, requerirá largos tiempos de desplazamiento. Las carreteras son vías que permiten tener un mejor acceso a un sitio determinado por contar con unas especificaciones técnicas para la circulación de los vehículos, mientras que los caminos son vías no pavimentadas que en algunos casos pueden dificultar la accesibilidad a un lugar establecido.
- Pendiente del terreno: con este criterio se busca eliminar las zonas en la cuenca que sean logísticamente inaccesibles por tener pendientes extremadamente pronunciadas. Los sitios con altas pendientes no favorecen la ubicación de una estación de monitoreo de calidad del agua.
- Índice de calidad ambiental (ICA): este índice se usa como un concepto preliminar para diagnosticar el estado sanitario de las corrientes. El ICA es un índice general, es decir, se basa en el supuesto de que la calidad del agua es un atributo general de los cuerpos de agua, independiente del uso para el cual es destinada. Los parámetros involucrados en el cálculo del ICA son el porcentaje de saturación de oxígeno, coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fosfatos, temperatura, turbiedad, sólidos disueltos totales. El ICA es un número adimensional entre 1 y 100. Un valor alto es indicativo de una mejor calidad del agua (Hallock, 2001). Para el cálculo de este índice se contó con resultados de las jornadas de caracterización de las corrientes analizadas, llevadas a cabo entre agosto y septiembre de 2009 (Universidad de Antioquia – Corantioquia 2009).
- Orden de la corriente: los órdenes de corrientes de Horton han sido utilizados para el diseño de redes de monitoreo como base para dividir la red de drenaje en subdominios (Moreno et al, 2008). A medida que una corriente tenga más tributarios, su potencial de contaminación será

mayor y por tanto la calificación dada también será mayor.

Análisis multicriterio

Para realizar la evaluación de los pesos de cada uno de los criterios considerados en el análisis se utilizó el método de comparación por pares de Saaty (Gómez & Barredo, 2006). Mediante una encuesta se consultó, a 8 profesionales expertos en el área ambiental, sobre la valoración dada a cada uno de los criterios mediante la comparación en pares jerarquizados. La escala utilizada se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Escala de medida para la comparación entre pares, método de Saaty

Importancia o preferencia	Valor cardinal
Igual	1
Moderada	3
Fuerte	5
Muy Fuerte	7
Extremadamente fuerte	9

Fuente: (Gómez & Barredo, 2006)

La información obtenida con las encuestas fue procesada siguiendo la metodología propuesta y con ello se obtuvo un listado general de los criterios y sus respectivas valoraciones, para posteriormente ser sometida a un análisis espacial. Después de realizar el procesamiento de las encuestas, se obtuvo la matriz de comparación por pares de factores, según los criterios identificados previamente. Para obtener los pesos definitivos se procedió a realizar el promedio de los pesos de cada uno de los expertos consultados, que se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Pesos definitivos de los criterios analizados

Criterios	Pesos
Índice de calidad ambiental	0.10
Orden de la corriente	0.18
Usos del suelo	0.17
Distancia cabeceras	0.13
Distancia población	0.11
Distancia a caminos	0.07
Distancia a carretera	0.10
Pendiente terreno	0.15

Desarrollo del modelo espacial

Una vez definidos y valorados los criterios, se procedió a realizar el modelo en el que se combinaron las fuentes de información mediante técnicas de análisis espacial. Inicialmente fue necesario realizar la transformación de las capas temáticas de formato vecto-

rial a formato matricial. Una vez organizada la información, se creó el modelo total en formato matricial. En el procesamiento de información espacial es necesario dividir el espacio en unidades más pequeñas a través de un proceso denominado teselado. La teselación planar se conoce como la partición del espacio en celdas no superpuestas. Desde el punto de vista práctico, la finalidad de la teselación es la de crear registros para contener los datos para el procesamiento computacional y allí almacenar sus atributos (Lee et al, 2000). Para realizar la priorización de los sitios de monitoreo se dividió la red de drenaje en teselas, las cuales se obtuvieron al fraccionar la red de drenaje en segmentos de 500 metros, posteriormente se les realizó un buffer de 15 m, y sobre estas áreas se realizó el análisis.

Las actividades realizadas en el desarrollo del modelo fueron las siguientes:

- Introducción de las capas de información en el modelo espacial.
- Valoración de los atributos de cada capa de información mediante reclasificación: Cada una de las capas temáticas que corresponde a un criterio de análisis fue reclasificada dependiendo de las características que favorecen o impiden la localización de una estación de mo-

nitoreo, siendo 10 el valor dado a la característica más favorable y 1 a la más desfavorable.

- Integración de los criterios en la regla de decisión, donde se incorporan los resultados de la valoración entre criterios a partir de la consulta a expertos.
- Ejecución del modelo espacial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la ejecución del modelo espacial se realizó la priorización de los sitios para realizar el monitoreo de calidad del agua. Como resultado se obtuvo un mapa que muestra la valoración realizada a cada una de las teselas analizadas en función de los criterios considerados, según lo presentado en la figura 3.

Los resultados del modelo de priorización de sitios de monitoreo de calidad del agua en la cuenca del Río Grande, en las microcuencas analizadas muestran que las valoraciones obtenidas para los sitios de monitoreo se encuentran entre 2.31 y 8.02, siendo los sitios mostrados en rojo los más significativos para realizar los monitoreos y los sitios en azul los que no se consideran prioritarios. Como puede observarse en la figura 3, los sitios con los valores más altos se encuentran en las corrientes principales de las mi-

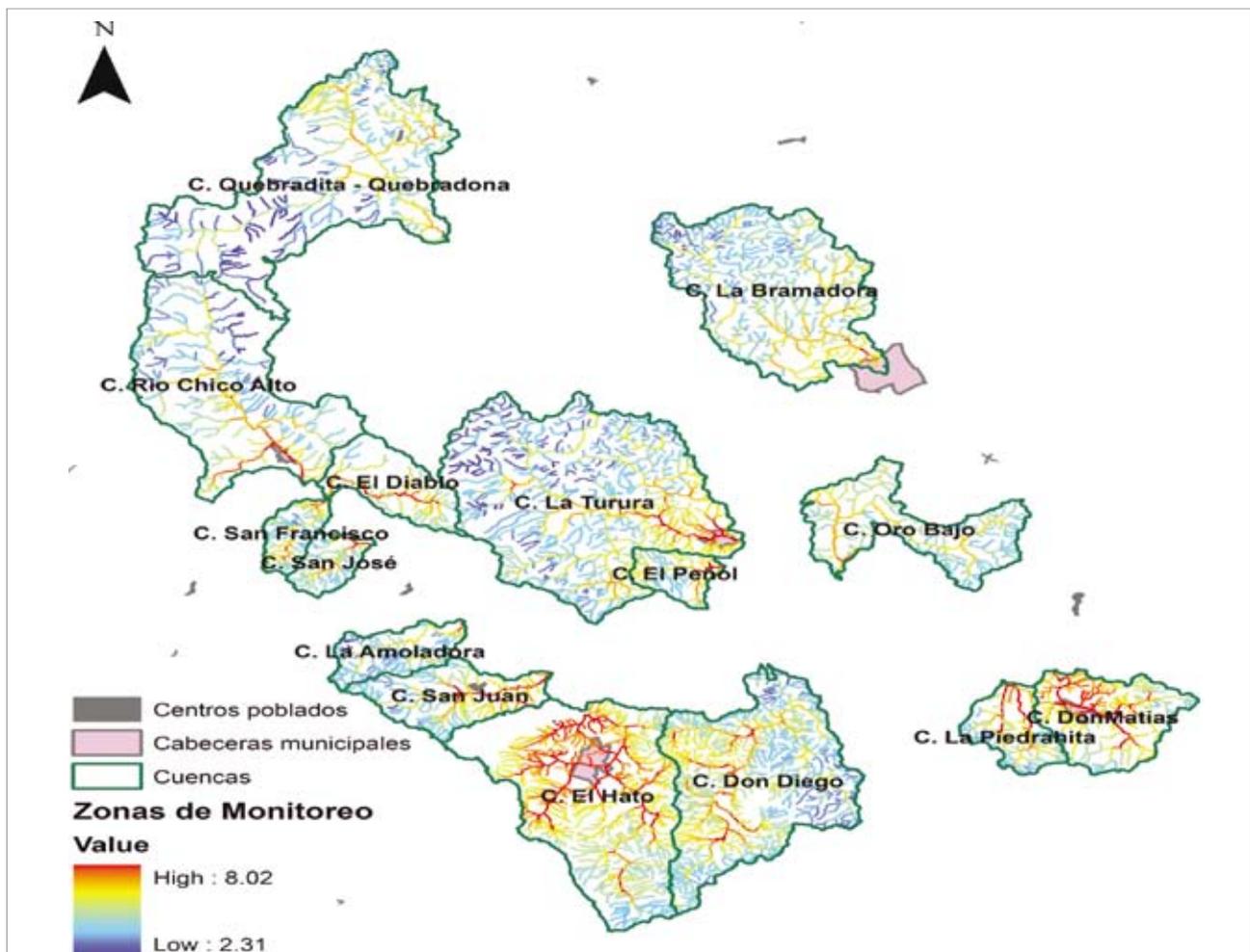


Figura 3. Resultados del modelo de priorización de zonas de monitoreo.

crocuencas, mostrando esto la importancia que tiene realizar seguimiento de la calidad del agua a las corrientes que tienen un mayor número de tributarios por el potencial de contaminación que pueden tener. Con el fin de realizar un análisis más detallado, se realizó una reclasificación de los resultados del para cuantificar el porcentaje de teselas que obtuvieron determinada valoración, en una escala de 1 a 10, siendo 1 las teselas que obtuvieron la calificación más baja y 10 las que presentaron los valores más altos, según lo presentado en la tabla 5. La distribución relativa de las teselas se presenta en la figura 4.

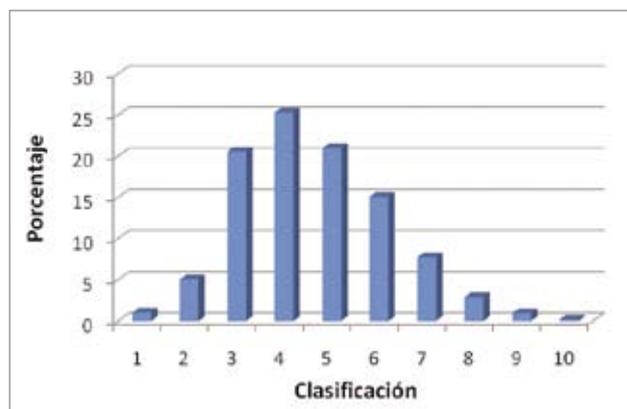


Figura 4. Distribución relativa de las teselas según su valoración

Tabla 5. Reclasificación de los resultados del modelo

Valoración		Clasificación	Porcentaje
Límite inferior	Límite superior		
2.31	2.88	1	1.03
2.88	3.45	2	5.07
3.45	4.02	3	20.60
4.02	4.59	4	25.33
4.59	5.17	5	20.97
5.17	5.74	6	15.11
5.74	6.31	7	7.75
6.31	6.88	8	2.93
6.88	7.45	9	0.97
7.45	8.02	10	0.22
Total			100

A partir de los resultados anteriores, correspondientes a los datos de salida del modelo, se puede identificar que la mayor parte de las teselas obtuvo una calificación intermedia, lo que implica que en estos sitios no es prioritario realizar un seguimiento y control de la calidad del agua. Por otro lado, las teselas con una calificación alta corresponden al 0.22% del total, mostrando el buen desempeño del modelo al destacar las zonas prioritarias para realizar monitoreo del recurso hídrico. Estas teselas con la mayor

calificación deben ser objeto de medición por la combinación de factores que deterioran la calidad del agua. A nivel de identificación de los sitios preferenciales para la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del agua, es de esperar que los lugares con mayor prioridad correspondan a un porcentaje bajo, debido al carácter agregado de muchos de los procesos contaminantes de la cuenca.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “Formulación del plan de ordenación del recurso hídrico y diseño de un programa de monitoreo y seguimiento a la calidad de cuerpos hídricos en las cuencas de influencia del sector eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná”, PORH, desarrollado por el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) de la Universidad de Antioquia para la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Corantioquia. Para validar los resultados arrojados por el modelo, se realizó una comparación de los resultados obtenidos con una red de monitoreo propuesta en el proyecto del PORH. Esta red propuesta fue planteada por los profesionales del proyecto, teniendo en cuenta los cuerpos de agua que sirven actualmente como fuentes abastecedoras de agua potable para los principales centros poblados, los cuerpos de agua receptores de vertimientos puntuales de aguas residuales provenientes de las cabeceras municipales, centros poblados y actividades industriales más importantes, corrientes de agua que tienen registradas dentro de la base de datos, de Corantioquia, concesiones de caudales superiores a 10 L/s, y que abastecen actividades económicas que podrían impactar la cantidad o calidad del recurso hídrico, tales como: industria, agricultura, minería y acuicultura, los cuerpos de agua asociadas a áreas donde la actividad económica que se desarrolla pudiera representar una carga contaminante difusa que afecte la calidad del agua de fuentes desde las cuales se abastece una población y proyección de nuevos usos del agua, según solicitudes en curso ante la autoridad ambiental (Universidad de Antioquia – Corantioquia. 2009). Finalmente, se realizó la calificación de la red de monitoreo propuesta en el marco del proyecto del PORH, a partir de la asignación de los valores generados por el modelo de priorización de zonas de monitoreo implementado en este trabajo, a cada uno de los puntos de la red, se utilizó para ello la estadística zonal y se evaluó la prioridad de realizar seguimiento de la calidad del agua, como se observa en la figura 5.

Según lo observado en la Figura 5, en la cuencas de las quebradas el Hato y Don Matías se encontraron los sitios con la mayor calificación, es decir que en las estaciones propuestas son consideradas de alta prioridad por los impactos que se generan sobre el recurso hídrico, además que, desde el punto de vista logístico, cuentan con buenas condiciones de accesibilidad (por la pendiente del terreno y la cercanía de vías de acceso al sitio). En segundo lugar de prioridad se encontraron estaciones ubicadas en las

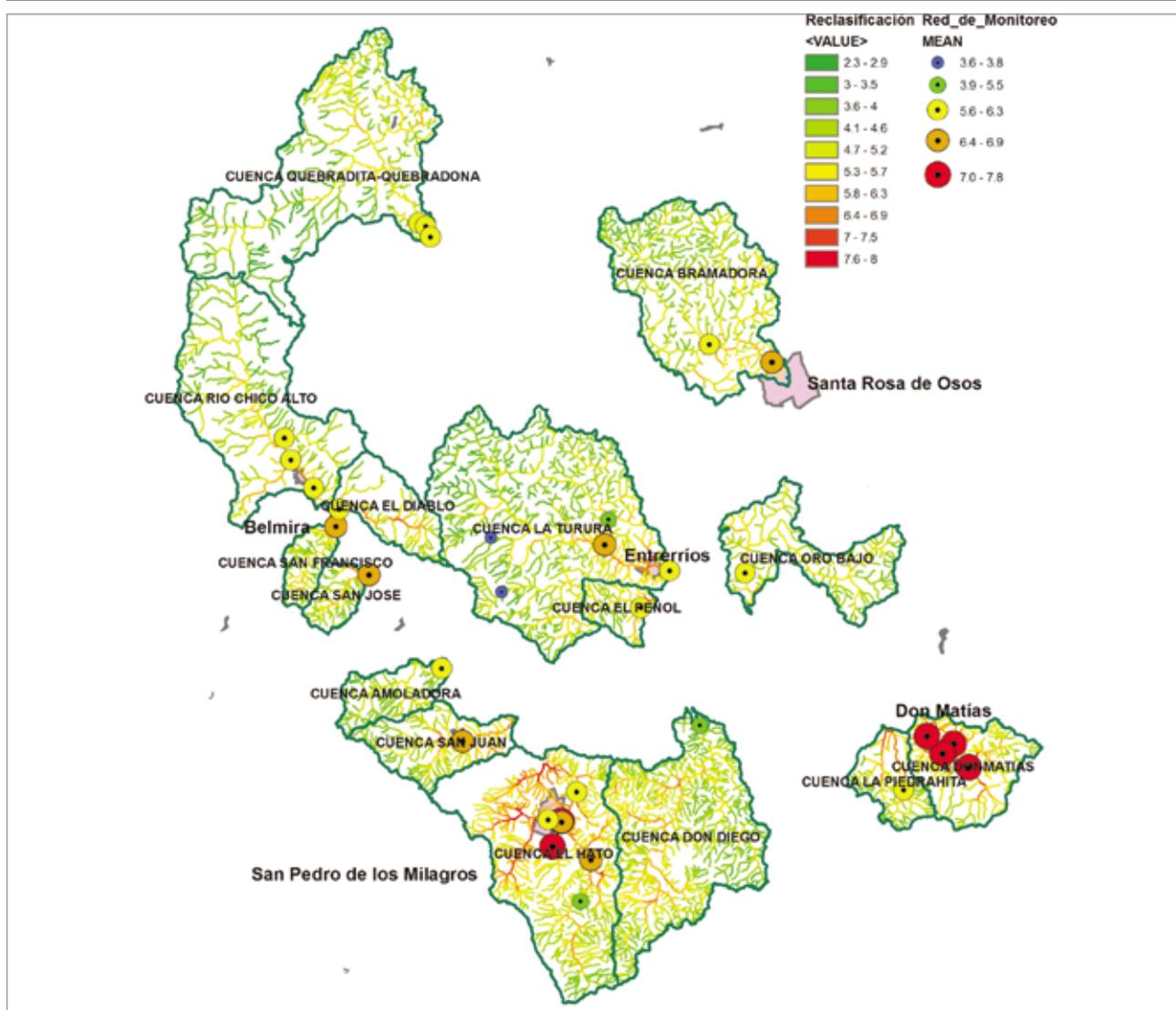


Figura 5. Calificación de la red de monitoreo propuesta en el proyecto del PORH utilizando la información del modelo espacial

cuencas de las quebradas San Juan, la Turura, San José, San Francisco, el Hato y Santa Rosa de Osos, con una calificación significativa. A las estaciones de monitoreo anteriormente descritas es necesario realizarles un seguimiento riguroso y permanente, con el fin de vigilar la calidad de la corriente y recopilar información que permita tener elementos de juicio que ayuden a la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico.

Los puntos restantes reflejaron una prioridad de media a baja según los criterios analizados, con calificaciones entre 3.6 y 5.5. Estos puntos, aunque presentan prioridad media y baja, son de interés ya que en muchos de los casos son los sitios de control para determinar la calidad del agua a la salida de la cuenca. En otros casos se encuentran en la parte alta de las cuencas, indicando los sitios en los que posiblemente se encuentran las bocatomas de los acueductos o alguna captación importante. Para estos sitios es necesario realizar un seguimiento, aunque no tan exhaustivo, con el fin de determinar las tendencias

de calidad del recurso hídrico y mantener el control que permita el cumplimiento de los estándares de calidad propuestos por la autoridad ambiental.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas para el análisis, la toma de decisiones cuenta con nuevas herramientas que permiten abordar la solución de problemas relacionados con la gestión del recurso hídrico. La implementación de la metodología para el diseño y evaluación de redes de monitoreo de calidad del agua descrita en este trabajo a partir de la utilización de herramientas SIG es una alternativa que puede ser empleada por las autoridades ambientales ya que es de fácil uso e involucra información que puede estar disponible, además de servir como complemento al criterio de expertos con base en la información disponible de la zona de estudio.

La definición de criterios de priorización y sus respectivas valoraciones son la base de la metodología

empleada. Es de gran importancia realizar el análisis con un amplio número de criterios con el fin de involucrar la mayor parte de las variables que tienen influencia sobre la calidad del recurso hídrico. En el modelo desarrollado se omitieron algunos criterios relevantes debido a que no fue posible contar con información relacionada con la localización de vertimientos puntuales y concesiones superficiales.

A pesar de las dificultades asociadas con la información deseada para desarrollar el modelo, la aplicación realizada permite identificar los sitios críticos a partir de diferentes criterios relacionados con aspectos fisiográficos, socioeconómicos y ambientales. Adicionalmente, el modelo tiene en cuenta las condiciones de accesibilidad, que en muchos casos se constituye en una limitante de tipo logístico para realizar monitoreo de calidad de agua.

La metodología de análisis multicriterio para la obtención de los pesos es flexible y permite su utilización en otras cuencas, dependiendo de la información que se encuentre disponible, el grado de detalle y el nivel de actualización de la misma. En la medida que la información sea más detallada, los resultados del modelo serán mucho mejores ya que la delimitación de las zonas potenciales para realizar monitoreo de la calidad será más precisa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a Corantioquia y a todo el equipo de trabajo del proyecto "Formulación del plan de ordenación del recurso hídrico y diseño de un programa de monitoreo y seguimiento a la calidad de cuerpos hídricos en las cuencas de influencia del sector eléctrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná".

REFERENCIAS

Corantioquia - Ecosistemas. 2005. Plan de ordenación y manejo de las cuencas de los Ríos Grande y Chico incluido todo su sistema de drenaje, hasta su desembocadura en el Río Porce, jurisdicción de los

municipios de Don Matías, Entreríos, San Pedro de los Milagros, Belmira y Santa Rosa. Medellín.

Gómez, M., & Barredo, J. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio. Alfaomega. México. 279p.

Hallock, D. 2001. A Water Quality Index for Ecology's Stream Monitoring Program. Washington: Washington State Department of Ecology. Environmental Assessment Program. 23p.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. 1996. Diccionario Geográfico de Colombia. Tomo 1. IGAC. Bogotá. 638 p.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC S.F. Planchas: 115-VI-C, 130-II-A, 130-I-B, 130-II-C, 130-I-D, 131-I-B, 131-III-B, 131-III-d, 147-I-B, 131-II-C, 131-IV-A, 131-IV-C.

Lee, Y., Li, Z., & Li, Y. 2000. Taxonomy of space tessellation. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55:139-149.

Mendoza, G., & Martins, H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230: 1-22.

Moreno T, A., Toro B, M., y Carvajal, L. 2008. Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad del agua en ríos. *Avances en Recursos Hidráulicos* 18: 57-68.

Saloranta, T. 2006. Highlighting the model code selection and application process in policy-relevant water quality modeling. *Ecological Modelling* 194 1-3: 316-327.

Universidad de Antioquia – Corantioquia. 2009. Formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná. Medellín.

Vieux, B., & Farajalla, N. 1994. Capturing the essential spatial variability in distributed hydrological modelling: Hydraulic roughness. *Hydrological Processes* 83: 221-236.

SENSORES PARA LA MEDICIÓN Y VALIDACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS A ESCALAS LOCAL Y REGIONAL A PARTIR DEL BALANCE DE ENERGÍA

SENSORS FOR THE MEASUREMENT AND VALIDATION OF HYDROLOGICAL VARIABLES AT LOCAL AND REGIONAL SCALES FROM ENERGY BALANCE

Carmona, F.^{1,2}; Rivas, R.^{1,3}; Ocampo, D.^{1,3}; Schirmbeck, J.¹ y Holzman, M.^{1,2}

Resumen

El manejo hidrológico de un país depende, en gran medida, del conocimiento de las cuencas hidrológicas existentes, del potencial de éstas y de la manera de gestionar adecuadamente los excedentes hídricos. A partir del estudio de una cuenca es posible desarrollar un manejo hidrológico adecuado, siendo necesario registrar información a partir de estaciones de modo de lograr medidas consistentes de las variables hidrológicas. Actualmente existe una disponibilidad de sensores que registran información hidrológica con errores inferiores al 10 %. En este sentido, el Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" (IHLLA) ha invertido una elevada cantidad de recursos en instrumentar la cuenca del arroyo del Azul (www.bdh.org.ar/azul) con la finalidad de lograr los conocimientos suficientes para una adecuada gestión de las crecidas. Además, se han llevado adelante importantes esfuerzos para conocer la evapotranspiración real, variable de difícil estimación, a partir de datos registrados por una estación de balance de energía (EBE). Sin embargo, la extensión de los datos puntuales a escala de cuenca no es sencilla y en general una simple extrapolación puede producir errores muy importantes. Una manera interesante de resolver estos problemas se obtiene asociando las medidas puntuales con datos captados por sensores a bordo de plataformas aerotransportadas, siendo el propósito principal poder extender los datos puntuales a una región logrando reproducir de forma adecuada las variaciones espaciales (uso del suelo, contenido de humedad, orografía, entre otras) existentes con una precisión aceptable. Es por ello que, en este trabajo, se describen las ecuaciones y el instrumental básico necesario para estimar, principalmente, la evapotranspiración a escalas local y regional resaltando la importancia de disponer de medidas reales de terreno. Se hace un detalle de cada sensor con el error asociado a la medida, la configuración de la EBE y además las formas de poder extender los datos puntuales a escala regional. Se presenta un registro de datos de radiación neta diaria del periodo 2006-2010 y se muestra la utilidad de la información registrada para la obtención de funciones de aplicación hidrológica. Se describen en detalle el balance de energía en situaciones de interés y se muestran ejemplos de aplicación en la estimación de la radiación neta y la evapotranspiración real con sus respectivas referencias bibliográficas para que los interesados puedan profundizar en los temas abordados.

Palabras clave: variables hidrológicas, balance de energía, evapotranspiración, radiación neta, plataformas aerotransportadas, sensores.

Abstract

Hydrological management of a country depends on, greatly, knowledge of hydrological basins, the potential of these and how to properly manage water surpluses. From the study of a basin is possible to develop an appropriate hydrological management of this, being necessary to record information from stations in order to make measurements of hydrological variables. Nowadays there is availability of sensors that record hydrological data with errors less than 10%. In this regard, the Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" (IHLLA) has invested significant resources to install systems on the Azul stream basin (www.bdh.org.ar/azul) in order to achieve sufficient knowledge for suitable management of floods. Moreover, significant efforts to know the actual evapotranspiration from data recorded by an energy balance station (EBS) have also been carried out. However, to extend the data points at the catchment scale is not straightforward and in general a simple extrapolation can produce very significant errors. An interesting alternative is to associate the specific measures to data collected by sensors on airborne platforms, being the main purpose to extrapolate the data point to a region reproducing the spatial variations (land use, moisture content, orography, etc.) with acceptable accuracy. Thus, in this work the equations and the basic instruments needed to estimate evapotranspiration at local and regional scales are described highlighting the importance of actual field measurements. There is a detail of each sensor and its error, the configuration of EBS and also ways to extend the data point to regional scale. A record of daily net radiation data for the period 2006-2010

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul) – Pinto 399 (B7000GHG), Tandil, Buenos Aires, Argentina, e-mail: facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

² Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (ANPCyT).

³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA).

Artículo enviado el 20 de febrero de 2011

Artículo aceptado el 8 de mayo de 2011

and the usefulness of the information for obtaining hydrological application functions are presented. The energy balance in situations of interest and examples of application in the estimation of net radiation and evapotranspiration with their respective references for those interested to delve into the topics are described.

Key words: hydrological variables, energy balance, evapotranspiration, net radiation, airborne platforms, sensors.

INTRODUCCIÓN

Actualmente es posible contar con sensores de terreno que permitan obtener información biofísica y meteorológica a fin de monitorear y/o evaluar, a partir del conocimiento del balance energético, el estado hídrico de un sistema determinado. Además, las medidas de terreno pueden ser asociadas con datos captados por sensores a bordo de plataformas aerotransportadas (PAT) con el propósito de extrapolar datos puntuales a una región determinada. En tal sentido, una Estación de Balance de Energía (EBE) puede ser instalada en un campo o parcela con una vegetación determinada, entre otras superficies de interés, permitiendo obtener la pérdida real de agua del sistema considerado.

Una EBE, o un conjunto de ellas, resulta fundamental a la hora de validar información de satélite (en ecuaciones de corrección atmosférica en el término de albedo, radiación neta, flujo de calor latente y flujo de calor en el suelo) y también para realizar modelos de flujo de superficie entre otras aplicaciones (p.e. experiencias internacionales como Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel-HAPEX, Field Experiment-FIFE, Solar Induced Fluorescence Experiment-SIFLEX y Anuncio de Oportunidades Satélite Argentino SAC-D).

Para conocer o determinar los sensores básicos que deben instalarse en una EBE es importante tener en cuenta los objetivos de la instalación de la misma y los procesos biofísicos y de intercambio de energía que se desarrollan en torno al sistema de estudio, siendo de mayor interés el sistema suelo-agua-planta (SAP) en cultivos, bosques, pasturas, entre otros.

El objetivo de este trabajo es presentar los sensores que dispone el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) para la medición de datos locales en una EBE y para la validación de datos captados desde PAT. Complementariamente se describe la configuración y disposición de sensores para el seguimiento local/regional de la evapotranspiración y se presentan ejemplos de aplicación logrados con las mediciones realizadas en los últimos 5 años.

BALANCE DE ENERGÍA

El Balance de Energía (BE) a nivel de superficie puede ser definido como la forma en la cual se distribuye la radiación neta en los distintos procesos biofísicos presentes. De acuerdo a la ley básica de conservación de la energía, el BE queda expresado como (Carmona et al., 2010):

$$Rn = G + H + Ph + \Delta S + D_h + E \quad (1)$$

donde Rn es la radiación neta, G es el flujo de calor en el suelo, H es el flujo de calor sensible, Ph es el flujo neto de energía asociado al proceso de fotosíntesis, ΔS es el almacenamiento de calor continuo al suelo-planta, D_h es la advección de flujo horizontal y LE es el flujo de calor latente asociado al proceso de evapotranspiración, siendo este último el término de conexión entre los balances de agua y energía (Brutsaert, 1984).

En la práctica, los flujos de energía asociados a la fotosíntesis, el almacenamiento de calor y la advección suelen despreciarse resultando la Ecuación 1 reducida a:

$$Rn = G + H + LE \quad (2)$$

El uso más común de la Ecuación 2 es para estimar el LE como término residual (Villa Nova et al., 2007; Sánchez et al., 2008), tanto a escala local como regional. A escala local el LE puede estimarse con cierta facilidad, a partir del BE, si se dispone de la instrumentación adecuada. Rn y G suelen medirse con sensores específicos instalados *Ad Hoc* mientras que H es más difícil de estimar, siendo en la generalidad de los casos calculado por medio de modelos de flujo unidimensionales (Schirmbeck y Rivas, 2007) ó con una instrumentación de alta complejidad y costo que mide la velocidad de viento y los contenidos de agua y de dióxido de carbono (*Eddy Covariance System*) (Castellvi y Snyder, 2010). La Figura 1 muestra el comportamiento general de los términos de la Ecuación 2 en una superficie húmeda y una seca. A escala regional, los términos del BE se obtienen espacialmente combinando información provista por las PAT, generalmente imágenes de satélite (IS) o en ciertas ocasiones imágenes obtenidas desde sensores a bordo de aviones, con datos locales (medidos en la EBE). Esto requiere de un esfuerzo extra porque hay que considerar las variaciones espaciales de la cobertura de la superficie y del estado hídrico, principalmente, para poder estimar píxel a píxel la Rn , el H y el G y así luego el LE como termino residual. Uno de los mayores inconvenientes que presenta la teledetección "cuantitativa" es poder obtener magnitudes diarias, o de mayor escala temporal, a partir de los datos instantáneos logrados desde satélite.

Radiación neta

La Rn es el término principal de la Ecuación 2, siendo el resultado neto de las contribuciones de radiación de onda corta y larga que entra y sale de la superficie, lo cual se expresa como:

$$Rn = Rs \downarrow - Rs \uparrow + Rl \downarrow - Rl \uparrow \quad (3)$$

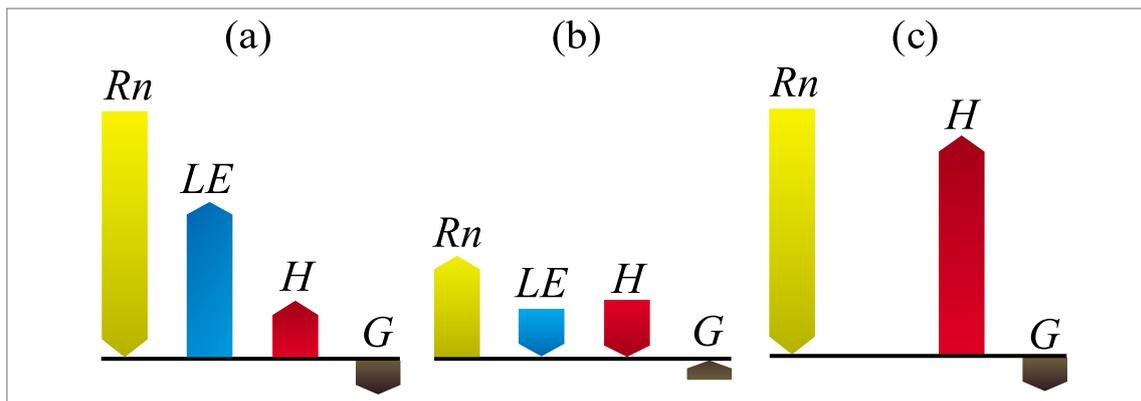


Figura 1. Magnitud de los términos de la ecuación de balance de energía en (a) una superficie húmeda de día, (b) una superficie húmeda de noche y (c) una superficie seca de día (modificado de Rouse (1979)).

donde $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente, $R_{s\uparrow}$ es la radiación de onda corta reflejada, $R_{l\downarrow}$ es la radiación de onda larga de la atmósfera hacia abajo y $R_{l\uparrow}$ es la radiación de onda larga emitida por la superficie. Para estimar la R_n localmente existen básicamente dos tipos de sensores; (1) sensores de R_n integrados y (2) sensores de R_n discriminados que permitan obtener los diferentes términos por separado. Los primeros de ellos dan un valor directo (o proporcional a la R_n , en mV), mientras que los segundos se componen por cuatro sensores, dos de ellos miden radiación de onda corta y otros dos, la radiación de onda larga (entrante y saliente en ambos casos), obteniéndose así la R_n a partir de la Ecuación 3. A escala regional la R_n suele estimarse a partir de IS como (Brutsaert, 1984; Ibañez Plana, 1998):

$$R_{n_i} = R_{s\downarrow} (1 - \alpha) + R_{l\downarrow} - e_s \sigma T_{rad}^4 \quad (4)$$

donde $R_{l\downarrow}$ puede obtenerse a partir de códigos de transferencia radiativa como por ejemplo LOWTRAN, MODTRAN, 6S, SMAC, entre otros, ó también a partir de la expresión $e_s e_a \sigma T_a^4$, R_{n_i} es la radiación neta instantánea (subíndice i) en cada píxel, α el albedo de superficie, e_s la emisividad de superficie, e_a la emisividad del aire, T_a la temperatura del aire, σ la constante de Stefan-Boltzmann y T_{rad} la temperatura radiativa de superficie. α , e_s y T_{rad} son obtenidas desde información de satélite, mientras que $R_{s\downarrow}$, T_a y e_a por medio de datos locales en el instante de la captura de la imagen.

Para obtener la R_{n_d} (el subíndice d indica valor diario) habitualmente se multiplica R_{n_i} por un factor que las relaciona (Seguin e Itier, 1983), lo cual puede introducir errores significativos en su estimación (Sánchez et al., 2008a). Rivas y Carmona (2010a) encontraron que la relación R_{n_d}/R_{n_p} , considerando el R_{n_i} a la hora de paso del satélite Landsat 5, varía significativamente a lo largo del día del año y presentaron una alternativa para la obtención de la R_{n_d} como función lineal de la R_n promedio entre las 10 y 11 am para días despejados, reduciendo el error de estimación.

Flujo de calor en el suelo

El G generalmente representa una fracción reducida del BE, más aún cuando la proporción de vegetación (Pv) es alta, aunque puede resultar una magnitud significativa en suelos desnudos principalmente. Dado que la conducción molecular es el principal mecanismo de transporte de calor en el suelo, G puede expresarse según la primera ley de Fourier como:

$$G = -K_T \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

donde K_T es la conductividad térmica molecular y el término entre paréntesis es el gradiente vertical de temperatura en los primeros centímetros del suelo. Habitualmente, a escala local, G se mide por medio de sensores de planchas metálicas enterrados en el suelo a escasa profundidad (7-8 cm) y configurados para entregar un valor directo generalmente en $W m^{-2}$ (aunque es posible que deba corregirse el valor entregado por el tipo de suelo y su contenido de humedad). A escala regional existen distintas formulaciones para estimar G , algunas de ellas como función del $NDVI$ (der término en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) (Moran et al., 1989), del $SAVI$ (der término en inglés *Soil Adjusted Vegetation Index*) y otras en función de la relación G/R_n (Choudhury et al., 1987). A escala diaria el G puede despreciarse, más aun en superficies con alta Pv , dado que el flujo de energía en el suelo suele compensarse entre el día y la noche.

Flujo de calor sensible

A diferencia de la R_n y el G , el H resulta más difícil de estimar y, por lo tanto, obliga a centrar todos los esfuerzos en él (Sánchez et al., 2008a). A partir de la analogía existente entre la ley de Ohm de la conducción eléctrica y la ecuación de transporte de calor Monteith (1973) desarrolló una simple ecuación para el cálculo del flujo de calor sensible entre dos niveles, siendo H proporcional a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional a la resistencia

aerodinámica entre dichos niveles. Este razonamiento constituyó el punto de partida para los llamados *modelos de resistencias de una y dos capas*. Si se considera, por ejemplo, un cultivo con cobertura vegetal completa, el H puede calcularse como (*modelo de una capa*):

$$H = \frac{\rho_a C_p}{r_{ah}} (T_o - T_a) \quad (6)$$

donde ρ_a es la densidad media del aire a presión constante, C_p es el calor específico del aire, r_{ah} es la resistencia aerodinámica del cultivo (función de la velocidad del viento y la altura de la vegetación), T_o es la temperatura aerodinámica y T_a es la temperatura del aire. En este caso la medida es obtenida indirectamente, donde la Ecuación 6 puede usarse localmente y también con datos de PAT para su estimación píxel a píxel. Localmente es necesario contar con un conjunto de sensores, entre ellos un anemómetro para medir la velocidad del viento (u), un sensor de T_a y un sensor de temperatura a la altura del dosel del cultivo para obtener T_o ó, en su defecto, un sensor de T_{rad} (aproximado a T_o por teledetección). A escala regional la T_{rad} es estimada desde datos de PAT y la relación existente entre los cocientes de magnitudes diarias e instantáneas de la Rn y el H puede utilizarse para conocer H_o (Itier y Riou, 1982, Sánchez et al., 2008a).

La aproximación de T_o por medio de la T_{rad} (obtenida por sensores a bordo de PAT) ha dado buenos resultados en los casos en que la cubierta era homogénea (Reginato, 1985; Zhan et al., 1996; Caselles et al., 1998). Sin embargo, para cubiertas heterogéneas se han observado diferencias significativas entre T_{rad} y T_o (Hall et al., 1992; Sun y Mahrt, 1995), lo cual indicó que el modelo de una capa no es aplicable para vegetaciones o cultivos dispersos. Con el fin de solucionar este problema, Shuttleworth y Wallace (1985) distinguieron dos niveles: uno correspondiente a la propia vegetación y otro al suelo que se encuentra por debajo de ella. Así se puede considerar un BE por separado del suelo y la vegetación, lo cual significó el punto de partida de los *modelos de dos capas*. El H total en este caso resulta:

$$H = H_c + H_s \quad (7)$$

donde H_c y H_s son los flujos de calor sensible parciales correspondientes a la vegetación y el suelo respectivamente. En éstos modelos existen dos tratamientos diferentes en función del esquema de asociación de las resistencias que se consideran; *el modelo de resistencias en serie* (Choudhury y Monteith, 1988; Shuttleworth y Gurney, 1990) y *el modelo de resistencias en paralelo* (Norman et al., 1995). Los modelos de resistencias en serie requieren como magnitudes de entrada ciertos parámetros (como la

resistencia del cultivo r_a^c y T_o ; para más detalles ver Sánchez et al., 2008b) difíciles de estimar mediante teledetección, resultando los modelos de resistencias en paralelo más adecuados para estimar el H a partir de datos captados por PAT. Lhomme y Chehbouni (1999) sugirieron un cambio en los modelos de resistencia en paralelo incorporando las proporciones de suelo y vegetación en cada píxel. Más tarde, con ésta misma idea, Sánchez et al. (2008b) ponderaron las contribuciones parciales del suelo y vegetación por sus respectivas áreas parciales de ocupación, obteniéndose buenos resultados en la región de Basilicata.

Finalmente, el LE puede obtenerse de forma directa por medio de lisímetros o por métodos indirectos que se clasifican en: métodos basados en el proceso de transporte, métodos basados en la medida de flujos turbulentos, métodos basados en el balance hídrico del suelo y métodos basados en el BE, como es el considerado en este trabajo (Rivas et al., 2009).

SENSORES Y ARREGLO EXPERIMENTAL

Estación de Balance de Energía

Desde el año 2006 en el IHLLA se ha comenzado a desarrollar una línea de investigación en el campo de la Teledetección, a cargo del Dr. Raúl Rivas, con enfoque principal a la estimación de la Evapotranspiración real a partir del BE, entre otras variables de interés relacionadas con el estado hídrico del sistema SAP, principalmente con aplicación en la región pampeana de Argentina. Es por ello que, el grupo de *Teledetección y Evapotranspiración* del IHLLA, ha aunado esfuerzos en comenzar a registrar datos locales por medio de una EBE para desarrollar y/o validar modelos a escala local y también regional usando como complemento datos de PAT.

La EBE fue inicialmente instalada sobre una parcela experimental en el campus de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (37° 19' S, 59° 05' O, 214 m), ubicada a 300 km al suroeste de la capital de Argentina. En el periodo 2006-2011 se han probado en la EBE distintas configuraciones de registro de datos. Además, los sensores instalados han ido variando, así como también su localización (en un radio de 50 km aproximadamente) y las cubiertas estudiadas de acuerdo a los objetivos de investigación de cada momento (Figura 2).

Desde fin del año 2009 la EBE se encuentra instalada en el establecimiento agrícola Laura Leofú (37° 14' S, 59° 34' O, 235 m) ubicado 50 km al oeste de la ciudad de Tandil, Argentina. En principio se instaló para registrar datos sobre un cultivo de soja de primera y luego ha sido trasladada sobre otras cubiertas, de acuerdo a los objetivos presentados y las cubiertas disponibles en el lugar. En los últimos dos años se ha mantenido el mismo arreglo experimental, es decir igual tipo, número y disposición de

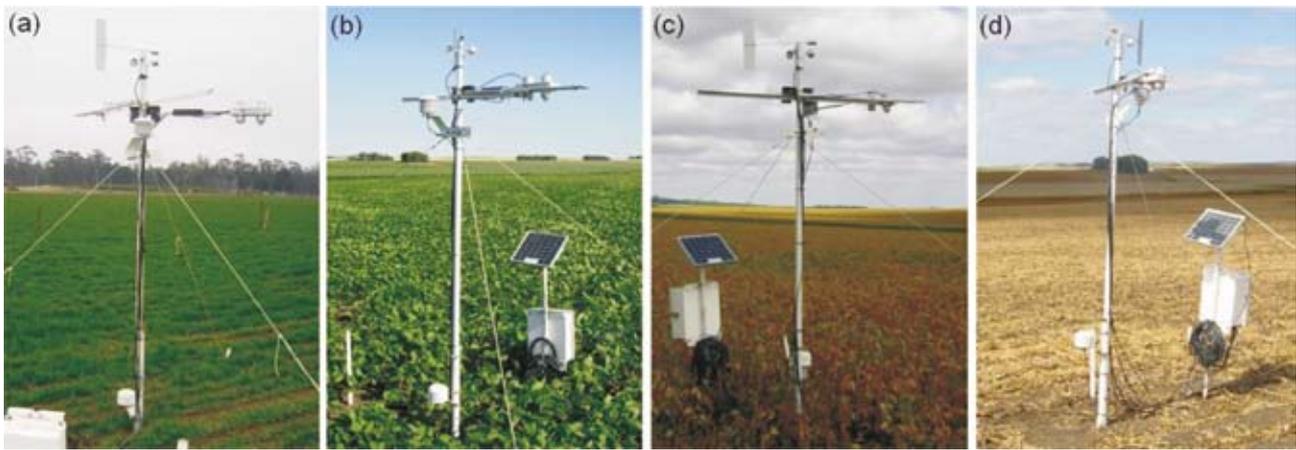


Figura 2. Estación de balance de energía instalada sobre: (a) un cultivo de avena de invierno, (b) una soja de primera, (c) una soja de segunda y (d) un rastrojo de soja.

sensores así como también la misma forma de almacenamiento de datos.

La EBE fue configurada para almacenar los valores promedio medidos por los sensores cada 15 minutos en un datalogger CR 10X (Campbell Scientific, Inc.) alimentado por una batería de 12 V conectada a un panel solar de 20 W. Cuenta con dos sensores de Rn (ambos a 2,15 m sobre la superficie), uno que discrimina la radiación entrante-saliente y otro integrado. El primero de ellos es un radiómetro neto CNR1 (Kipp & Zonen), el cual presenta un diseño que permite medir la radiación de onda corta y larga por separado. Está constituido por dos sensores de radiación de onda corta (piranómetros CM3up (R_{s1}) y CM3down (R_{s2}), rango espectral 0,305 - 2,800 μm) y dos sensores de radiación de onda larga (CG3up (R_{l1}) y CG3down (R_{l2}), rango espectral 5 - 50 μm), pudiéndose estimar la Rn_g con una precisión de $\pm 10\%$ (permite la aplicación de la Ecuación 3). El otro radiómetro neto instalado es un NR-LITE (Campbell Scientific, Inc.), consiste básicamente en una termopila que mide la suma algebraica de toda la radiación entrante y saliente de la superficie (rango espectral 0,2 - 100 μm). Presenta un fácil mantenimiento y una buena estabilidad pero es menos preciso que otros radiómetros convencionales. Sin embargo, el NR-LITE puede ser recalibrado a partir del CNR1 mejorando así la estimación de la Rn .

Para estimar la temperatura radiativa de superficie se instaló un sensor de alta precisión IRR-P 1505 (Apogee Instruments, Inc.), a la misma altura de los sensores de Rn , el cual mide la temperatura mediante la detección de la radiación infrarroja recibida (rango espectral 8-14 μm , ángulo de visión 22°). La T_{rad} observada es obtenida con una precisión de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ para valores entre -15°C y 60°C .

Para medir el G se instaló bajo suelo (a 0,08 m de profundidad) un sensor HFT3 (Campbell Scientific, Inc.), el cual consta de una placa de flujo de calor (una termopila) con un rango de medida de $\pm 100\text{ W m}^{-2}$ y una precisión de $\pm 10\%$.

Para medir la velocidad/dirección horizontal del viento se instaló el equipo MOII 034B (Campbell Scientific, Inc.) en la parte más alta de la EBE (a 2,4 m de altura). La u es medida con un anemómetro de tres cazoletas, presenta un rango de operación de 0 a 49 m s^{-1} con una precisión de $\pm 0,12\text{ m s}^{-1}$ para u inferiores a $10,1\text{ m s}^{-1}$ y de $\pm 1,1\%$ para u superiores. La dirección del viento es medida con una precisión de $\pm 4\%$ y una resolución de $0,5^\circ$.

Un sensor de temperatura y humedad relativa del aire (T_a y HR , respectivamente) CS215-L16 (Campbell Scientific, Inc.) fue instalado a la misma altura que los radiómetros. El sensor de T_a opera entre -40°C y 70°C con una precisión de $\pm 0,9^\circ\text{C}$, aunque la precisión mejora siendo $\pm 0,4^\circ\text{C}$ entre 5 y 40°C , y $\pm 0,3^\circ\text{C}$ a 25°C . La HR es obtenida con una precisión inferior o igual a $\pm 4\%$. También, un sensor de T_a Model 107 Temperature Probe (Campbell Scientific, Inc.) fue instalado para ser mantenido a la altura del dosel del cultivo y conocer la temperatura en el plano de flujo cero (T_o). Este sensor cuenta con una precisión de $\pm 0,4^\circ\text{C}$ en el rango de -24°C a 48°C .

Por último, para conocer la temperatura y humedad en los primeros centímetros del suelo se han enterrado cuatro sensores TC1047A (Cavadevices), a 0,05 m y 0,12 m de profundidad, y un sensor EC-10 H2O (Decagon Devices, Inc.), respectivamente. Los sensores de temperatura TC1047A tienen una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ (máxima) y el sensor de humedad de suelo (H_s) EC-10 H2O registra la humedad integrada de los primeros 10 cm de suelo con un error menor al 3%. Con esta información se puede corregir el valor del G debido a los efectos de humedad de suelo y también podría estimarse el calor específico de éste.

Además de los sensores descritos anteriormente, se dispone de datos registrados por una Estación Meteorológica (EM) y de sensores portátiles de terreno (SPT) de T_{rad} y H_s , para complementar la información registrada por la EBE. Los SPT permiten extender la medida puntual de la estación a escala

de parcela o mayor para su integración con información de PAT.

La EM (Figura 3) tiene dentro de un abrigo meteorológico un sensor para medir la temperatura del aire TC1047A y un sensor HIH3610 (Honeywell) para registrar la HR con un error de $\pm 2\%$. Además, la EM cuenta con otro sensor TC1047A, pero en éste caso para medir la temperatura en el suelo, un sensor de H_s EC-20 H2O (similar el sensor EC-10 H2O conectado en la EBE, pero con una longitud de integración de 20 cm), un sensor de radiación solar PAR (rango espectral 0,4 - 0,7 μm) y un pluviógrafo.



Figura 3. Estación meteorológica (delante) y Estación de balance de energía (detrás) instaladas sobre un rastrojo de soja.

Dentro de los SPT se disponen y utilizan regularmente cuatro sensores de T_{rad} : dos radiómetros Everest (precisión $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$) y dos radiómetros ST Pro Raytec (precisión $\pm 0,82\text{ }^\circ\text{C}$), una fuente de calibrado Everest (precisión $\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$) y un sensor Hydrosense Campbell para medir la H_s (a 12 y 20 cm, error de precisión $\pm 3\%$).

APLICACIONES Y DISCUSIÓN

En la sección anterior se han presentado los sensores que componen la EBE, así como también otros sensores complementarios, necesarios para descri-

bir el sistema SAP y generar modelos regionales de aplicación con información de PAT.

En los últimos años, con información obtenida a partir de instrumentación similar a la detallada en éste trabajo, se han realizado publicaciones de relevancia entre las que podrían mencionarse: validación de modelos para obtener el albedo desde satélite (ver p.e. Liang (2000)); elaboración y validación de ecuaciones LST (del término en inglés *Land Surface Temperature*) monocanal y split-windows (ver p.e. Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003)); ajuste de parámetros semiempíricos para modelos regionales de evapotranspiración (ver p.e. Rivas y Carmona (2010a)); además para la obtención de la conductividad térmica del suelo, generación de modelos de producción agrícola y validación de índices de estrés, entre otros.

A continuación se muestra el registro de datos del sensor CNR1 y tres aplicaciones que utilizan como base datos medidos en la EBE; en primer lugar algunos BE que nos ayudan a conocer el sistema SAP y poder generar modelos, en segundo lugar una ecuación desarrollada para estimar la Rn_d con IS, tanto para días despejados como nublados, y finalmente resultados de la aplicación de un modelo semiempírico para estimar el LE_d con IS correspondientes al sensor Thematic Mapper (TM, satélite Landsat 5).

Registro diario del sensor CNR1

En la Figura 4 se grafica la serie de datos de $Rs_{\downarrow d}$, $Rs_{\uparrow d}$, $Rl_{\downarrow d}$ y $Rl_{\uparrow d}$ (el subíndice d indica el promedio diario) para el periodo comprendido entre el 4 de agosto de 2006 (día juliano 216) y el 10 de marzo de 2010 (día juliano 69) registrados por el sensor CNR1. Las regiones en blanco de la gráfica corresponden a periodos en los cuales la EBE no estuvo midiendo, generalmente por cambios en el lugar de instalación, calibración y/o configuración. Como se observa, la $Rs_{\downarrow d}$ es el término principal que regula la Rn , siendo la $Rs_{\uparrow d}$ una fracción de esta ($Rs_{\uparrow d} = \alpha.Rs_{\downarrow d}$). Los términos de $Rl_{\downarrow d}$ y $Rl_{\uparrow d}$, si bien son los de mayor magnitud, dan como resultado, generalmente, una radiación de onda larga neta ($Rln_d = Rl_{\downarrow d} - Rl_{\uparrow d}$) pequeña comparada con la radiación de onda corta neta ($Rsn_d = Rs_{\downarrow d} - Rs_{\uparrow d}$).

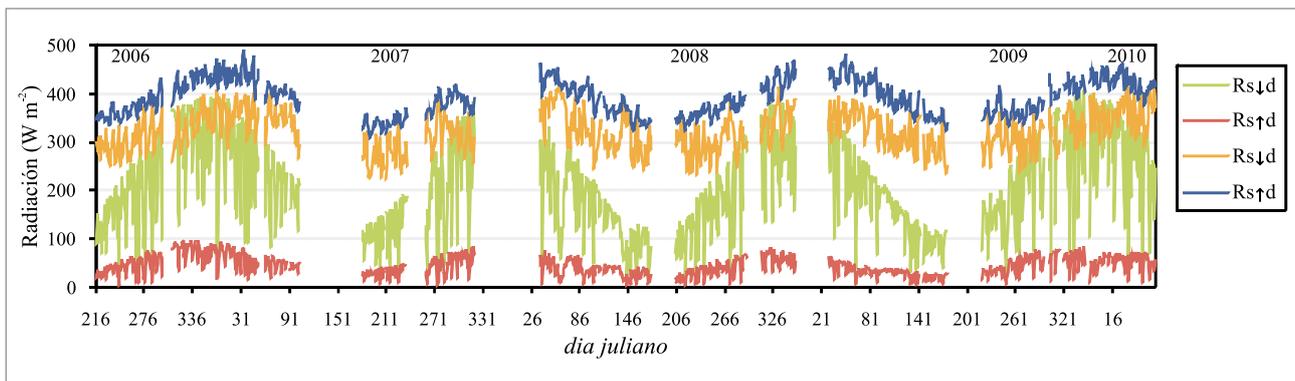


Figura 4. Serie de datos de los componentes de la radiación neta diaria registrados por el sensor CNR1 instalado en la Estación de balance de energía (tomada de Rivas y Carmona, 2010b).

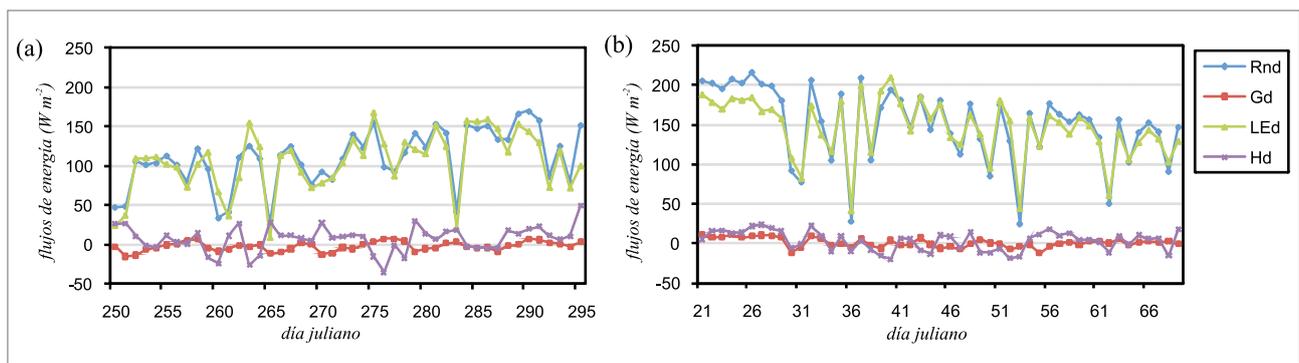


Figura 5. Balance de energía para cultivos de (a) avena con P_v máxima entre los días juliano 250-295 del año 2009 y (b) de soja de primera entre los días juliano 21-69 del año 2010 (Carmona et al., 2010).

Balances de energía bajo diferentes tipos de cultivos

En las Figuras 5-a y 5-b se muestran los términos del BE, promedios diarios, para una avena de primavera y una soja de primera.

En dichas figuras se evidencia claramente el peso de la LE_d en la Rn_d respecto al H_d y el G_d . Es importante notar que el G_d es muy pequeño y que para un cultivo con cobertura total podría despreciarse, siendo en éste caso menor al error de estimación de la Rn_d y el H_d .

Se observan mayores valores de Rn_d en la Figura 5-b con respecto a la Figura 5-a, producto del incremento de la Rs_d en el verano. Además, la distribución de la energía se da de manera diferente. Los valores de H_d son bajos en la soja pero no tanto en la avena de primavera, en donde en ciertos momentos el flujo de calor sensible parece tener mayor peso. Los fuertes descensos de las curvas de Rn_d y LE_d son consecuencia de la nubosidad, otorgando un carácter aserrado a éstas.

A continuación, en la Figura 6, se grafican los términos del BE (cada 15 minutos) para cuatro días no consecutivos con cielo despejado sobre un rastrojo de soja de primera (casi suelo desnudo). Como eje

secundario se grafica la H_s integrada en los primeros 0,10 m del suelo.

En la Figura 6 se puede observar que la Rn se distribuye en los diferentes procesos (LE , H y G) sobre el sistema SAP de acuerdo a, principalmente, el estado hídrico del suelo. Además, el G es relativamente pequeño en todos los casos y de signo cambiado entre el día y la noche. La energía resultante de ($Rn - G$) se distribuye, en cada instante, en diferentes proporciones para los procesos de LE y H , siendo el LE mayor cuando el suelo dispone de suficiente H_s (Figura 6-a) y tiende a cero cuando el suelo está cercano a su límite de sequedad (Figura 6-b, c y d), usándose en este caso la energía disponible en el proceso de H .

La forma de campana de la Rn en la Figura 6 es consecuencia de que se consideraron sólo días despejados, en caso contrario su forma estaría modulada por la nubosidad.

Estimación de radiación neta diaria a escala regional

A escala regional, el hecho de que el H sea el término más complejo de obtener en el BE no sólo ha

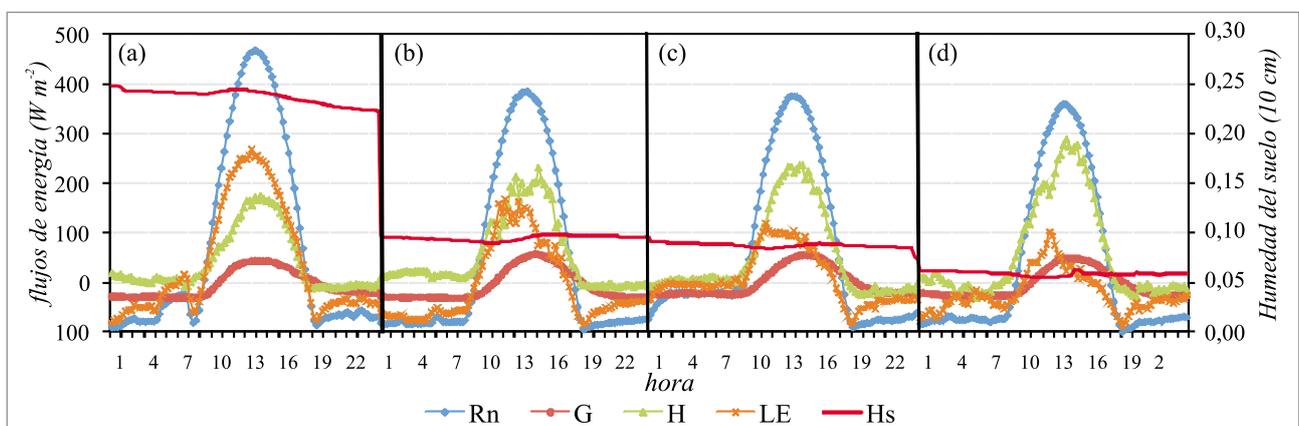


Figura 6. Comportamiento de los términos de la ecuación de balance de energía y Humedad del suelo cada para cuatro días despejados sobre un rastrojo de soja para los días (a) 16/04/2010, (b) 23/04/2010, (c) 26/04/2010 y (d) 29/04/2010.

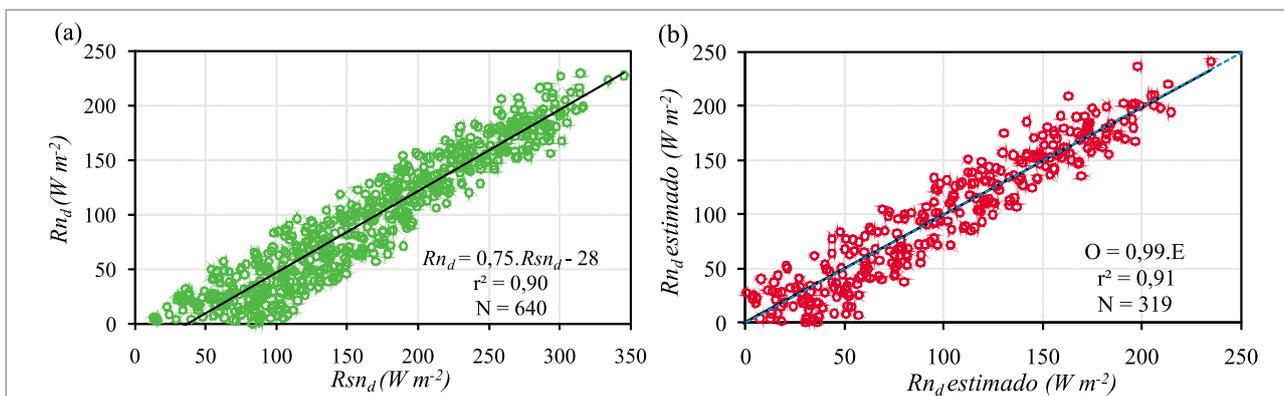


Figura 7. (a) Estimación de la Rn_d a partir de la Rsn_d y (b) validación de la función obtenida (tomado de Rivas y Carmona, 2010b). N es la cantidad de datos, r^2 el coeficiente de determinación, O las medidas observadas y las E medidas estimadas con la función desarrollada.

centrado gran cantidad de esfuerzos en su estimación, sino que a la vez ha dejado de lado por algunos investigadores, el estudio detallado en la estimación la Rn a escala diaria. Esto cobra relevancia si se hace notar que la Rn , generalmente, es el término de mayor peso en el BE, lo cual indica que sin una adecuada estimación resulta improbable estimar correctamente el LE . En este sentido, una aplicación de la EBE a escala regional puede obtenerse a partir del análisis de los datos de las componentes de la Rn presentados en la Figura 4. La Rn_d presenta una reducida variación temporal y dicha variación puede ser modelada a partir de una función lineal. Con los datos del sensor CNR1, Rivas y Carmona (2010b) consiguieron ajustar una función entre Rn_d y Rsn_d (siendo $Rsn_d = Rs_{i\alpha} \cdot (1 - \alpha)$). De esta manera, los autores logran estimar la Rn_d píxel a píxel por medio de la $Rs_{i\alpha}$ (dato local) y el α obtenido desde IS.

En la Figura 7-a y 7-b se muestran el ajuste lineal mencionado anteriormente y la validación de éste. Para la obtención de la función de Rn_d se utilizaron datos registrados en el periodo 2006-2010 (considerando tanto días despejados como aquellos con nubosidad), resultando $Rn_d = A \cdot Rs_{i\alpha} \cdot (1 - \alpha) + B$ (Figura 7-a), siendo A (adimensional) y B ($W m^{-2}$) dos coeficientes experimentales propios de la región.

En la Figura 8 se muestra un mapa de Rn_d logrado a partir del ajuste lineal mostrado en la Figura 7-a, para el día 23/02/2010. La $Rs_{i\alpha}$ ($311 W m^{-2}$) corresponde al valor medido en la EBE y el α fue calculado a partir de datos captados por el sensor TM a bordo de la PAT Landsat 5 (escena 225/86 del *World-wide Reference System*). Las variaciones de Rn_d observadas son función del α logrado con la IS.

La utilidad práctica de la estimación de la Rn_d a partir de imágenes resulta que, siempre que el albedo de la superficie no cambie o al menos no lo haga de forma significativa, se pueden obtener mapas con una única IS para una serie de días. Esto último permite utilizar imágenes captadas por sensores que presentan una resolución temporal media (semanal y quincenal), como por ejemplo aquellos a bordo de las PAT Landsat 5, SAC-C y CBERS entre otros.

Estimación de la evapotranspiración real a partir de un modelo semiempírico

Finalmente, se presenta una interesante aplicación de un modelo semiempírico para la estimación de la evapotranspiración real diaria, ó LE_{gr} , sobre pastura y soja (Figuras 9 y 10) a partir de datos locales medidos con una EBE. Los resultados corresponden a los publicados en Rivas y Carmona (2010a) donde se desarrolló un modelo lineal para estimar la Rn_d a partir de una función de la Rn_i obtenida desde IS (sensor TM en este caso), considerando días despejados, y se utilizó dentro del modelo de Seguin e Itier (1983) (en el cual se estimaron los parámetros experimentales propios del modelo para la región de estudio) para de este modo conocer la pérdida real de agua del sistema a nivel de píxel. Los mapas logrados utilizando esta metodología tienen un error del 19% (con un BIAS del 1%) y son similares a los obtenidos por modelos de mayor complejidad (Rivas y Carmona 2010a).

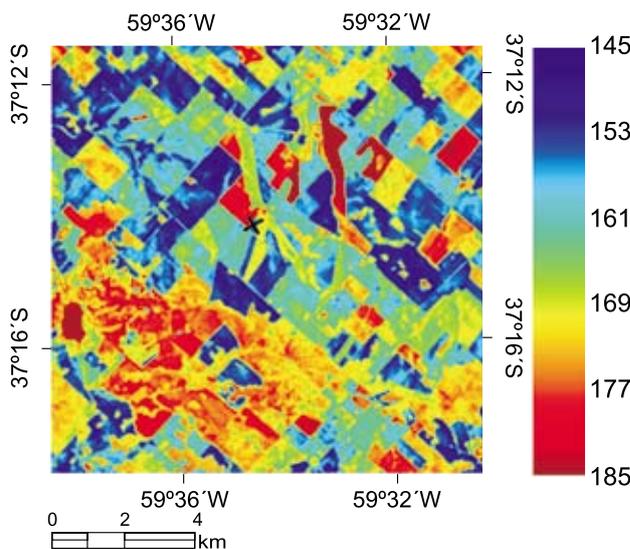


Figura 8. Mapa de Rn_d ($W m^{-2}$) logrado a partir de la función de la Figura 7-a utilizando el mapa de albedo obtenido con el sensor TM. La cruz en el centro de la figura marca la ubicación de la EBE.

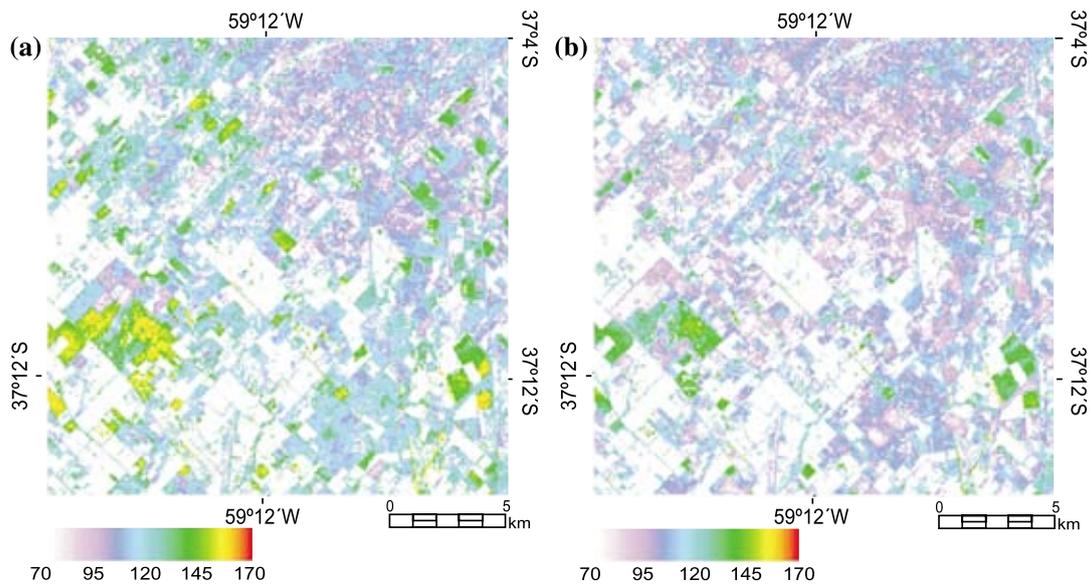


Figura 9. Mapa de evapotranspiración diaria ($W m^{-2}$) de áreas cubiertas con pasturas. (a) 3 y (b) 19 de marzo de 2007 (tomado de Rivas y Carmona 2010a).

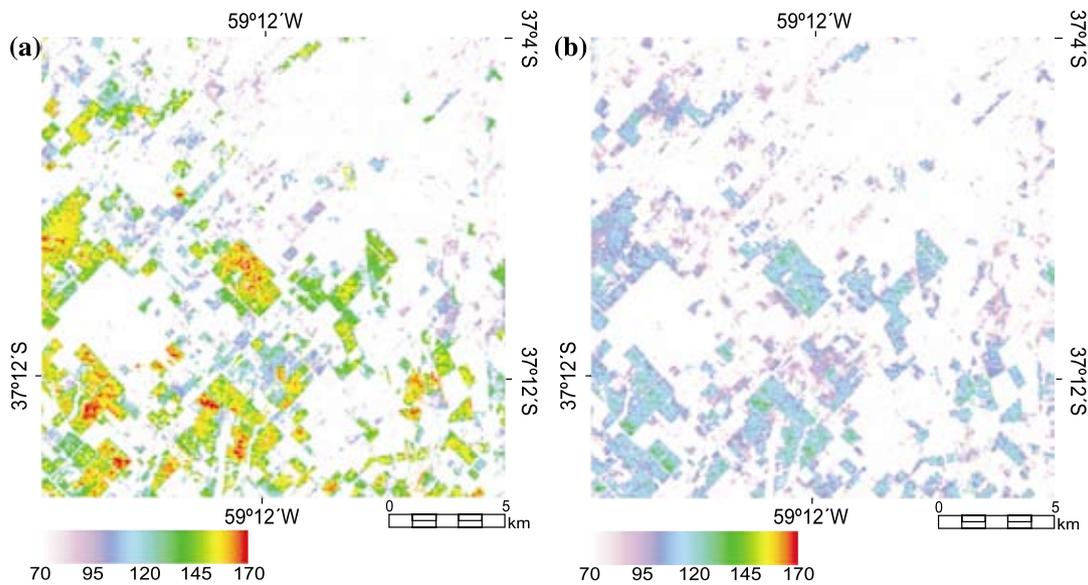


Figura 10. Mapa de evapotranspiración diaria ($W m^{-2}$) de áreas cubiertas con soja. (a) 3 y (b) 19 de marzo de 2007 (tomado de Rivas y Carmona 2010a).

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la necesidad de contar con instrumental específico con el fin de desarrollar, tanto a escala local como regional, modelos para estimar variables hidrológicas, en particular la evapotranspiración. Como es sabido, el estado hídrico de un sistema determinado puede ser abordado a través de dos enfoques diferentes; el balance de masas y el balance de energía, siendo el término de conexión la evapotranspiración (agua que se pierde desde la superficie de suelo, vegetación y cuerpos de agua a la atmósfera) o su equivalente flujo de calor latente que expresa la energía invertida en el proceso de evapotranspiración. El enfoque energético es particularmente útil para su uso con datos de sensores remotos, pudiéndose conocer el estado hídrico con

una correcta reproducción de las variaciones espacio-temporales presentes, aunque para ello primero debe analizarse el sistema a escala local y luego elaborar una metodología consistente para su uso a escala regional con la finalidad de lograr una precisión aceptable (errores del orden del 20%). El grupo de *Teledetección y Evapotranspiración* del Instituto de Hidrología de Llanuras dispone del instrumental necesario para la medición de los términos de la ecuación de balance de energía con fines hidrológicos. En este marco de trabajo se describieron las ecuaciones y el instrumental básico necesario, resaltándose la importancia de disponer de medidas reales de terreno. Se detallaron cada uno de los sensores con el error asociado a la medida, la configuración

de la estación de balance de energía y se presentaron ejemplos de caso de funciones desarrolladas para la extensión del dato puntual a escala regional utilizando información captada desde plataformas aerotransportadas.

Se presentó un registro de datos de radiación neta diaria del periodo 2006-2010 y la utilidad de la información registrada para la obtención de algoritmos de aplicación hidrológica. En general se observa que las medidas puntuales presentan errores inferiores al 10 % y que al extender el dato a toda una región el error puede llegar a un 20 % (en el caso de estimar la evapotranspiración real diaria). Sin embargo el error a escala regional impacta menos, dado que de esta forma se logra obtener información en zonas sin medidas de terreno. Los ejemplos de caso presentados son la resultante de trabajos previos realizados por el grupo y disponen de las referencias bibliográficas correspondientes para aquellos que deseen profundizar en la temática.

Por último, es importante remarcar que contar con instrumentación como la descrita en este trabajo, en una cuenca hidrológica, es elemental y de relevancia en cualquier estudio donde se desarrolle la incorporación de información captada desde satélite. El uso conjunto de información puntual (alta densidad temporal de información) y de satélite (alta densidad espacial de información) conllevan a un análisis más integral y consistente de un sistema y a la obtención de modelos más robustos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue realizado con fondos otorgados por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (PRH N° 0032 UNCPBA - ANPCyT) y el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Argentina (Proyecto 7 MINCyT/CONAE).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brutsaert, W. 1984. Evaporation into the atmosphere, Theory, History, and Applications. Cornell University. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 pp.

Carmona, F., Rivas, R., Ocampo, D., Schirmbeck, J. 2010. Instrumental de una estación de balance de energía: sus aplicaciones. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras – *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura*. Ed. M. Varni, I. Entraigas y L. Vives. Azul, Argentina.

Caselles, V., Artigao, M., Hurtado, E., Coll, C., Brasa, A. 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: Application to the Barrax area, Albacete, Spain. *Remote Sensing of Environment*, 63:1-10.

Choudhury, B., Idso, S., Reginato, R. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39:283-297.

Choudhury, B., Monteith, J. 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 114:373-398.

Castellvi, F., Snyder, R.L. 2010. A new procedure to estimate sensible heat flux using surface renewal analysis. A case study over grapevines. *Journal of Hydrometeorology*, 11 (2):496 - 508

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A. 2003. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D22), 4688, 9 pp.

Hall, F., Huemmrich, K., Goetz, S., Sellers, P. Nickeson, J. 1992. Satellite remote sensing of energy balance: success failures and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, 97:19061-19089.

Ibáñez Plana, M. 1998. Estimación de la evapotranspiración regional a partir de la Razón de Bowen radiativa. Universitat de València, Facultat de Física, Tesis Doctoral, 166 pp.

Itier, B., Riou, C. 1982. Une nouvelle méthode de détermination de l' evapotranspiration réelle par thermographie infrarouge. *Journal de Recherches Atmospheriques*, 16:113-125.

Lhomme, J., Chehbouni, A. 1999. Comments on dual-source vegetation atmosphere transfer models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94:269-273.

Liang, S. 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76:213-238.

Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. American Elsevier Publ. Co., N.Y., 205-234.

Moran, M., Jackson, R., Raymond, L., Gay, L., Slater, P. 1989. Mapping surface energy balance components by combining Landsat Thematic Mapper and ground-based meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 30: 77-87.

Norman, J., Kustas, W., Humes, K. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77:263-293.

Reginato, R., Jackson R., Printer, P. 1985. Evapotranspiration calculated from Remote Multispectral and Ground Station Meteorological Data. *Remote Sensing of Environment*, 18:75-89.

Rivas, R., Carmona, F., Ocampo, D. 2009. Estimación de la evapotranspiración real a partir de imágenes

- nes Landsat utilizando un modelo semiempírico. VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea, Santa Rosa, Argentina.
- Rivas R., Carmona F., 2010a. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. *Physics and Chemistry of the Earth*, Elsevier, Special Issue: Remote Sensing – Hafeez, in press/dec/2010.
- Rivas, R., Carmona, F. 2010b. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero*, 121 (4): 401-412.
- Rouse, W.R. 1979. Man-modified Climates en Gregory, K.J. y Walling, D.E. *Man and Environmental Processes*. Westview Press: Boulder 276 p.
- Sánchez, J.M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V.A. y Telesca, V. 2008a. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351, 58– 70.
- Sánchez, J.M., Kustas, W.P., Caselles, V. y Anderson, M.C. 2008b. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1130–1143.
- Schirmbeck, J., Rivas, R. 2007. Comportamiento de los términos del balance de energía en una pastura. *Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Rivas R. et al. (Ed.), Ed. Martín, 317-322.
- Seguin, B., Itier, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*, 351:58-70.
- Shuttleworth, W., Wallance, J. 1985. Evaporation from sparse crops: an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111:1143-1162.
- Shuttleworth, W., Gurney, R.J. 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 116:497-519.
- Sun, J., Mahrt, L. 1995. Relationship of surface heat flux to microscale temperature variations: application to BOREAS, *Boundary-Layer Meteorology*, 76(3):291-301.
- Villa Nova, N., Pereira, A., Shock, C. 2007. Estimation of Reference Evapotranspiration by an Energy Balance Approach. *Biosystems Engineering*, 96(4):605-615.
- Zhan, X., Kustas, W., Humes, K. 1996. An inter-comparison study on models sensible heat flux over partial canopy sources with remotely sensed surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 58:242-256.

NITRIFICACIÓN CON BAJO TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS Y BAJO ÍNDICE ENERGÉTICO

NITRIFICATION WITH SHORT SOLIDS RETENTION TIME AND SLOW ENERGY INDEX

Loaiza Navia, Jimmy¹; Martínez García, Laura²; Carlín G., Manuel F.³ y Esquivel E., Rodolfo⁴

Resumen

A finales de 2002, el sistema de aeración de la planta bajo estudio fue cambiado de oxígeno puro a burbuja fina, lo que implica que el volumen del reactor haya quedado pequeño, en el límite de los procesos convencional y de alta tasa. La literatura menciona que para lograr nitrificación plena se requiere mayor tiempo de retención de sólidos que el proceso de remoción de la fracción carbonácea. Por lo que el reto consistía en lograr la nitrificación con bajo tiempo de retención de sólidos en un tanque pequeño. En un primer intento el sistema de burbuja fina quedó corto, por lo que fue necesario rediseñar el sistema de aeración en estado estacionario con el programa de simulación GPS-X. Los resultados obtenidos a la fecha, han superado las expectativas, destacando además disminución en el consumo de energía.

Palabras clave: Lodos activados, Nitrificación, Simulación, Tiempo de Retención de Sólidos

Abstract

At the end of 2002, the aeration system of the wastewater plant under study was changed from pure oxygen to fine bubble, which implies that volume of the reactor has remained short, in the limit between conventional process and high rate process. The literature mentions that to achieve a full nitrification there is needed higher solids retention time than only carbonaceous removal process. The challenge was consisting of achieving full nitrification with low solids retention time in a same short tank. In the first attempt fine bubble system remained short, for what it was necessary to re-design via steady state simulation with GPS-X simulator program. The obtained results at date, has overcome the expectations, emphasizing in energy consumption decrease.

Key words: Activated sludge, Nitrification, Simulation, Solids Retention Time

INTRODUCCIÓN

Haciendo referencia a la literatura, el proceso convencional de lodos activados, comparado con las modalidades de alta tasa y oxígeno puro, incluyendo el proceso de nitrificación, presenta las siguientes características (tabla 1), en las cuales destaca el tiempo de retención de sólidos (SRT), el tiempo de retención hidráulico (HRT), la carga volumétrica (CV) y la relación F/M (Alimento/Microorganismos, por sus siglas en inglés).

La planta bajo estudio tiene capacidad de diseño de 432,000 m³/d, el arreglo consta de 4 clarificadores primarios, 5 reactores biológicos y 6 clarificadores secundarios, al inicio y final de cada etapa, se juntan las corrientes, además de pretratamiento. Los reactores biológicos están cubiertos con placa de concreto, ya que fueron diseñados para proceso de

oxígeno puro. Cada uno tiene un volumen de 19,120 m³ y está dividido en 4 celdas, a manera de flujo tipo pistón (figura 1), el tirante es 5.64 m, largo 82.35 m y ancho de 41.18 m; cada uno trata 86,400 m³/d, lo cual da un tiempo retención hidráulico (HRT por sus siglas en inglés) de solo 5.31 h. Los clarificadores secundarios tienen 66 m de diámetro y tirante de 4.57 m con fondo plano. El tratamiento de lodos incluye digestión anaeróbica y el desaguado con ayuda química, el lodo secundario purgado es previamente espesado.

La instalación original de la planta bajo estudio, en cuanto a aeración se refiere, incluía una planta de oxígeno de alta pureza, destacando un compresor de 3,360 kW (kilowatt) y otros equipos periféricos, con una demanda de 4,100 kW, adicionalmente cada reactor estaba equipado con 8 mezcladores super-

Tabla 1.- Características de las modalidades del proceso de lodos activados (Metcalf y Eddy, 2003)

PROCESO	SRT, d	F/M, g DBO/g SSV/d	CV, kg DBO/10 ³ m ³ /d	SSLM, g/m ³	HRT, h	Qr/Q
Convencional	5-10	0.2-0.5	20-40	2,000-4,000	5-8	0.25 - 0.75
Oxígeno puro	3-8	0.25-1.0	100-200	3,000-8,000	1-3	0.25 - 0.50
Alta tasa	3-8	0.4-1.5	100-1,000	3,000-6,000	2-4	1.00 - 1.50

1,2: Asistente Técnico SADM, 2, 3: Administrador de Proceso y Superintendente PTAR DN, Monterrey, México. jloaiza@sadm.gob.mx;

Artículo enviado el 22 de febrero de 2011

Artículo aceptado el 8 de mayo de 2011

ficiales, 2 de 93 kW más 6 de 56 kW, es decir, 522 kW más por concepto de mezclado en cada reactor. Haciendo un balance de energía, la potencia total instalada en aeración era de 6,715 kW, es decir que a cada reactor le correspondían 1,343 kW. Hay que mencionar que durante los primeros años de operación el flujo promedio era apenas 65% del diseño, por cual era suficiente operar con solo 3 reactores, utilizando por lo tanto menos energía.

PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Expresado en los términos más fundamentales, el proceso de lodos activados consiste en la puesta en contacto del agua residual con un cultivo mixto de microorganismos bajo condiciones aerobias, lo que permite a los organismos utilizar, como fuente de carbono, la materia orgánica del agua residual, para su desarrollo y crecimiento. Lo anterior implica un proceso con biomasa suspendida.

La materia orgánica (substrato) entra al reactor donde se mezcla en condiciones aerobias con el retorno de lodos (gran cantidad de microorganismos), donde tiene lugar la transformación de la biomasa, debiendo mantenerse constante la concentración del licor mezclado a través de la tasa de retorno y purga de lodos. El licor mezclado pasa luego al clarificador final, donde tiene lugar la separación por gravedad. En el fondo se concentra la fase sólida (lodo), y vía bombeo de retorna al inicio del reactor, mientras que el efluente clarificado (sobrenadante) es recuperado en la canaleta perimetral con calidad acorde al permiso de descarga.

Crecimiento de heterótrofos

La remoción de contaminantes (materia orgánica), se define a través del crecimiento de organismos heterótrofos, que utilizan parte del carbón orgánico, para su crecimiento (síntesis), mientras que otra parte es oxidada (CO_2), liberando energía para su metabolismo. Estos organismos son capaces de agruparse, formando bio-flóculos, con buenas características de sedimentación. Al contenido líquido del reactor se le refiere como licor mezclado y a su concentración como sólidos suspendidos de licor mezclado (SSLM).

La eficiencia en la remoción de contaminantes (utilización del substrato), es función de la facilidad para ser adsorbida, absorbida, sintetizada y oxidada por la biomasa heterótrofa (X_{HB}). Cuanto más eficazmente se puedan combinar estas condiciones, tanto más eficiente resultará el tratamiento. Un parámetro importante a considerar es el tiempo de retención de sólidos (SRT, siglas en inglés), que garantiza el tiempo para que los microorganismos puedan desarrollarse y reproducirse, este tiempo puede ser ajustado a fin de mantener constante la concentración del licor mezclado. Cuando se alcanza estado estacionario, una masa equivalente a la producción de lodo debe

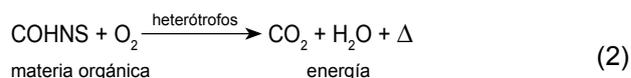
ser desalojada diariamente del sistema (purga de lodo), con lo que se mantiene constante el inventario de sólidos.

En el proceso de lodos activados, los organismos llevan a cabo la conversión de la materia orgánica en biomasa heterótrofa (1), oxidación (2) y decaimiento (3), según las relaciones estequiométricas.

Síntesis celular:



Oxidación del substrato:



Decaimiento:



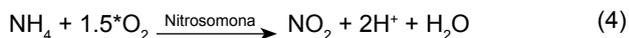
Crecimiento de Autótrofos

La demanda "total" de oxígeno se puede separar en dos etapas, carbonácea y nitrogenada. Es posible distinguir una fracción medible, asociada a la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitratos (nitrificación), este proceso está definido a través del crecimiento de organismos autótrofos. El Nitrógeno Total Kjaldall (NTK) es la suma del nitrógeno amoniacal (libre é ionizado, NH_3 y NH_4), y el nitrógeno orgánico (degradable), soluble y particulado; el cual es degradado a NH_3 , vía amonificación, como producto final, si no está prevista la nitrificación.

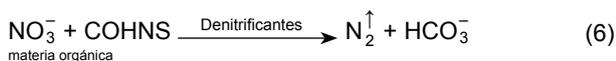
Las bacterias autótrofas tienen habilidad para utilizar el carbón inorgánico (bi-carbonatos) como fuente de substrato y proveen su energía a partir de la oxidación del amoníaco. Tales organismos normalmente están presentes en el licor mezclado, aunque en menor proporción. La oxidación se alcanza cuando el tiempo de retención de sólidos (SRT) es mayor, y se requiere que la planta tenga capacidad para suministrar el oxígeno suplementario. Esto se logra una vez ejercida la demanda carbonácea y se da en presencia de alcalinidad. El nivel mínimo de oxígeno disuelto (OD) es 2.0 g/m³, sin embargo, la nitrificación parece inhibirse si el OD es menor a 1.0 g/m³.

Durante el proceso se produce acidez mineral; si la alcalinidad no es suficiente, el descenso del pH inhibe la nitrificación. Por cada kg de amoníaco que se oxida, se consumen 7.14 kg de alcalinidad (CaCO_3), 4.33 kg de O_2 , se producen 0.15 kg de células nuevas y se consumen 0.09 kg de carbón inorgánico (CO_2). La temperatura adecuada para que se de el proceso pleno debe ser mayor a 15°C.

Las bacterias autótrofas del género *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* son las responsables para llevar a cabo esta conversión que se realiza en dos etapas consecutivas. En la primera, el amoníaco se convierte en nitrito (4), requiriendo mayor cantidad de oxígeno, y en la segunda, el nitrito se convierte en nitrato (5):



Estrictamente, la nitrificación no representa la remoción del nitrógeno, es solo un cambio de forma con la consiguiente eliminación de la demanda de oxígeno y toxicidad asociados al amoníaco; para remover el nitrógeno se requiere la de-nitrificación, que tiene lugar en ambiente anóxico, donde el nitrato (NO_3) es reducido a nitrógeno gas (N_2) por organismos heterótrofos, lo cual requiere sustrato orgánico soluble. Cuando ocurre la de-nitrificación, la alcalinidad y la demanda de oxígeno se acreditan. Sin embargo, este proceso parece no operar con oxidación de amonio intermedia; la condición de estabilidad se alcanza cuando la oxidación es mayor a 90%, a fin de tener todo el nitrógeno oxidado disponible para de-nitrificación, la cual se describe mediante la ecuación (6):



ANTECEDENTES

Como se mencionó anteriormente, la planta bajo estudio fue diseñada con un sistema de oxígeno puro, sin embargo, al poco tiempo de operación, la planta de oxígeno fue desactivada por diversas razones, dando lugar a un sistema de difusores de fondo de burbuja fina con sopladores centrífugos solo en los primeros 4 trenes, ya que durante ese tiempo se estableció un contrato de suministro de agua trata-

da con una empresa generadora de energía, hasta por 38,000 m³/d, por lo cual se decidió mantener el proceso original (oxígeno puro) para atender este contrato; aislando el reactor 5 y el secundario 2 y adquiriendo oxígeno líquido a un proveedor externo, almacenándolo en los tanques existentes para luego ser gasificado e inyectado al reactor 5.

El tratamiento terciario que el usuario le da al agua consiste en un ablandamiento con cal en frío, así como otros procesos avanzados para calderas, torres de enfriamiento, generación de vapor, agua contra incendio, etc. Con el efluente del tren 5, ligeramente más ácido por acumulación de CO_2 bajo la cubierta del tanque, el usuario observó mayor consumo de cal, por lo que solicitó efectuar pruebas con ambos efluentes (burbuja fina y oxígeno puro del tren 5), solicitando posteriormente se le envíe agua de los trenes equipados con burbuja fina, a pesar de que el NH_3 tenía valores del orden de 20 a 25 g/m³, en lugar de los 2 g/m³ acordado.

El reto que se presentaba consistía en efectuar un diseño para el reactor 5, con capacidad para nitrificar, con el mismo tipo de difusores de burbuja fina y mismo tipo de sopladores, es decir, sin incrementar energía para satisfacer la calidad que requería el usuario.

En la figura 1 se observa el diagrama esquemático del reactor 5 asociado al clarificador secundario 2, para lo cual se implementó un sistema independiente de retorno y purga de lodos. Este tren independiente operó con flujo menor al nominal, en virtud del volumen que demandaba el usuario, así como por el costo del oxígeno.

De acuerdo con lo anterior (volumen del reactor y flujo nominal), se estaría en el rango bajo del tiempo de retención hidráulico (5.31 h) para un proceso convencional y muy próximo a los procesos de oxígeno puro y alta tasa, mismos se requieren menor edad de lodo, respecto al convencional. Sin embargo, no había que perder de vista que el objetivo era la nitrifica-

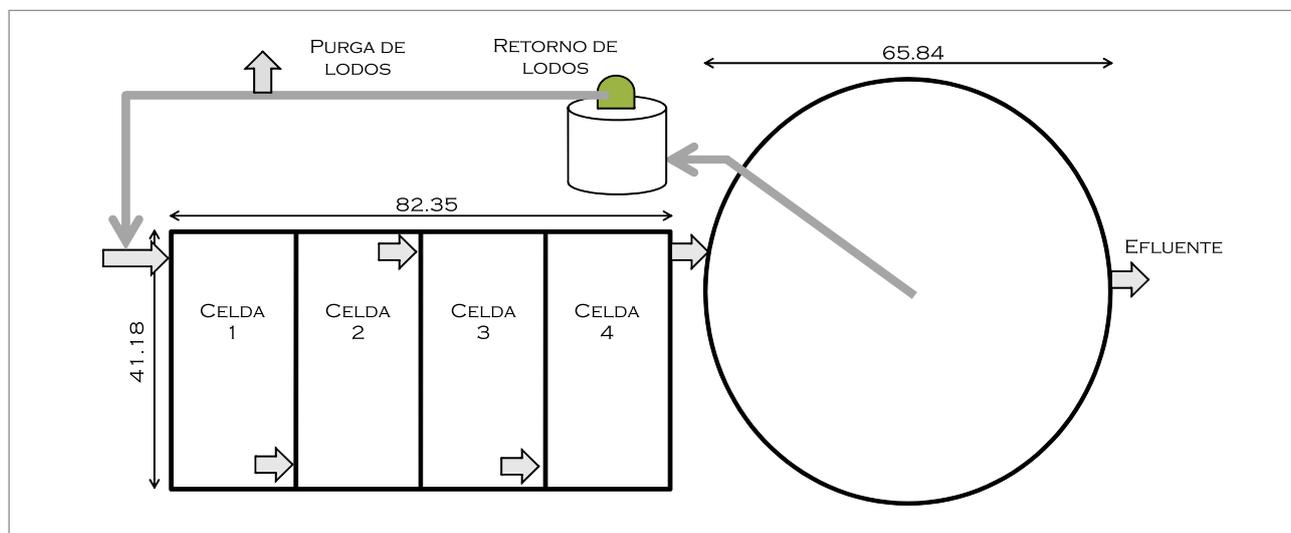


Figura 1. Esquema del reactor 5 asociado al clarificador secundario 2

ción, la cual, en un proceso oxígeno puro era factible de alcanzar, pero con un proceso entre convencional o de alta tasa, no había garantía de lograrlo.

Los otros 4 trenes, equipados con 660 difusores de fondo de burbuja fina y dos sopladores centrífugos de 336 kW por tren, presentaron serias limitaciones, (baja densidad de difusores respecto al fondo del orden de solo 6%), que derivaron en bajos niveles de OD, abultamiento de lodo, pobres características de sedimentación y nula capacidad de alcanzar la nitrificación, afectando finalmente la calidad del producto que requería el cliente.

METODOLOGÍA

La tarea fue analizar el requerimiento de oxígeno para el tren 5, considerando el mismo tipo de difusores de burbuja fina Minipanel™ dúplex, tipo tubular con membrana de EPDM (Etileno Propileno Di.-Monómero) con área activa de 0.47 m², pero con diseño escalonado, adoptando densidades adecuadas y dentro del rango de mayor eficiencia de transferencia de oxígeno. Para optimizar la distribución de aire en las 4 celdas, se realizó una calibración y simulación del proceso en estado estacionario con el programa GPS-X de Hydromantis, tratando de ajustar la concentración de NH₃ del efluente, en función del aire de dos sopladores y la distribución de difusores en cada celda, dando finalmente un arreglo de difusores como el mostrado en la figura 7.

Para lo anterior se consideró la calidad histórica del efluente primario, (tabla 2), la cual difiere algo con los datos del diseño original, principalmente en el contenido de NH₃, cuyo valor fue 14 g/m³, cuando en realidad el valor real es más del doble, lo cual demanda mayor cantidad de oxígeno, constituyéndose en un reto adicional, ya que el equipo de aeración para los restantes cuatro trenes, se basó en la caracterización de diseño.

Tabla 2. Efluente primario considerado en la calibración del modelo

BOD	201	g/m ³
COD	460	g/m ³
TSS	127	g/m ³
NTK	42.5	g/m ³
NH ₃	33	g/m ³

Al no disponer de coeficientes cinéticos ni estequiométricos propios, para la calibración se tomaron al-

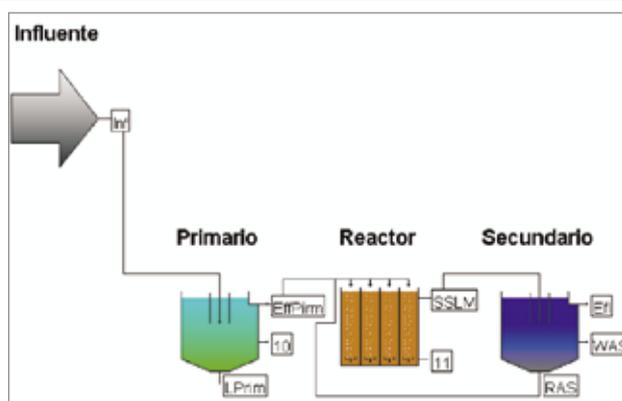


Figura 2. Esquema del tren 5 y secundario 2

gunos de la literatura (Gernaey et. al), aplicando en su caso, corrección por temperatura, mientras que otros parámetros fueron “pre-establecidos” del modelo ASM1 (Henze et. al). La temperatura del licor mezclado varía de 20 a 28°C. (tabla 3)

CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Para subsanar deficiencias observadas en los otros 4 trenes equipados con difusores de burbuja fina, durante septiembre de 2002, se llevó a cabo una simulación en estado estacionario con el programa GPS-X, con el fin estimar la nitrificación a través de la concentración de NH₃ en el efluente y predecir la producción de lodo. El esquema utilizado se muestra en la figura 2, (Hydromantis Tutorial).

El modelo fue calibrado según el ASM1 (modelo de lodos activados 1), ver gráficas en figuras 3 y 4; a partir de los datos de diseño, (volumen y forma del tanque, flujo tipo pistón de 4 celdas del mismo tamaño), capacidad de bombeo de retorno y purga, así como de información rutinaria de operación disponible (Bitácoras de Operación) incluyendo la caracterización del influente real, sólidos suspendidos de licor mezclado y de retorno, eficiencia de transferencia de oxígeno, vía curvas características de los difusores instalados (del fabricante), etc. El clarificador secundario fue modelado tipo unidimensional, es decir, como Simple1d.

Con esta información, se procedió a efectuar el balance de materia (calibración) alrededor del reactor, según los criterios mostrados en la tabla 4.

Como se puede ver, el tiempo de retención de sólidos (SRT) de solo 5 días, está más identificado con el proceso de alta tasa que con el convencional (ver

Tabla 3. Estimación de coeficientes cinéticos y estequiométricos (20°C) (Henze et. al)

Tasa crecimiento heterótrofos (μ_H)	6.00	d-1	Rendimiento heterótrofo (Y_H)	0.40	gSSV/g bDQO
Tasa decaimiento heterótrofos (b_H)	0.12	d-1	Rendimiento autótrofo (Y_A)	0.12	gSSV/g NOx
Tasa crecimiento autótrofo (μ_A)	0.75	d-1	Coef. velocidad media (Ks)	20.00	g/m ³

Tabla 4. Balance de materia alrededor del reactor

Tiempo retención de sólidos	5.00	d	SSVLM	3,165.81	g/m ³
Prod. biomasa, base SSV	12,106.08	kg SSV/d	F/M (base DBO)	0.29	d-1
Prod. biomasa, base SST	14,261.45	kg SST/d	Yh_obs (base SST)	0.82	gSST/gDBO
SSLM de diseño (Xtss)	3,729.46	g/m ³	Yh_obs (base SSV)	0.70	gSST/gDBO
Volumen reactor	19,120.00	m ³	Conc. RAS	8,500.00	g/m ³
Tiempo de retención	5.31	h	Masa base seca	14,261.45	kg/d
Relación SSV/SS	0.80		Volumen de purga	1,677.82	m ³ /d

tabla 1). Típicamente se menciona que, para la nitrificación, deben darse ciertas condiciones, como ambiente aeróbico, temperatura mayor a 15°C, presencia de alcalinidad para soportar el proceso y un tiempo de retención de sólidos preferentemente mayor a 8 días.

Para el requerimiento de oxígeno se consideró la demanda de las fracciones carbonácea y nitrogenada, ya que el objetivo era alcanzar nitrificación plena. Como se pueden observar las gráficas de comportamiento del tren 5 (figura 3), se alcanzó a remover la DBO, SST y NH₃ (nitrificación con bajo tiempo de retención de sólidos). A lo cual habrá que añadir la buena eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE) de los difusores aunado a menor consumo de energía.

La distribución del aire en cada celda fue uno de los mayores desafíos, ya que es la forma de poder asegurar el flujo de aire a cada difusor para obtener la eficiencia de transferencia de oxígeno, además, todas las bajantes son de 304 mm y no se dispone de medición individual de aire. Sin embargo, se pudo aproximar vía monitoreo de concentración de OD en cada celda, y además se tuvo a la mano los datos rutinarios de operación.

RESULTADOS OBTENIDOS

La calibración del modelo inició tratando de aproximar la producción de lodo (SSLM) y variando la relación DQO_{PART}/SSV del influente; los parámetros

por ajustar durante la simulación fueron el flujo de aire y la densidad de difusores en las 4 celdas para alcanzar la concentración de NH₃ requerida, lo cual predijo una distribución escalonada, la primera celda con 38% del aire, la segunda y tercera con 25% y la cuarta 12%, esta fue la distribución para los difusores de aire. El arreglo de muestra en la figura 6.

Se observó que con la densidad escalonada de difusores y la sumergencia de los mismos (5 m) y a baja tasa de aire por área de membrana (64 m³/m²/h), se obtuvo una eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE) de 35% y una eficiencia estándar de aeración de 5.12 kg O₂/kW/h, es decir, buen rendimiento.

La cantidad de difusores resultó ser el doble del diseño de los otros trenes y requiriendo prácticamente la misma cantidad de aire de 25,787 m³/h, por lo que se determinó usar 2 sopladores centrífugos similares a los otros trenes, de 12.893 m³/h vs 69 kPa, con 7 etapas de compresión y con motor de 336 kW.

Durante la simulación no se consideró la hidrodinámica del reactor, ya que éste fue modelado como un reactor de flujo tipo pistón de 4 celdas, con una distribución de 25% en volumen cada una (WERF, 2003)

También se verificó la condición de operación del clarificador secundario (tabla 6), como se había mencionado, se disponen de seis unidades de alimentación central de 65.84 m de diámetro con fondo plano y canaleta periférica interna, cuyo mecanismo consiste en 10 tubos de succión de PVC por brazo, con sendas válvulas excéntricas para controlar la tasa retorno y la concentración del lodo de retorno; lo cual da

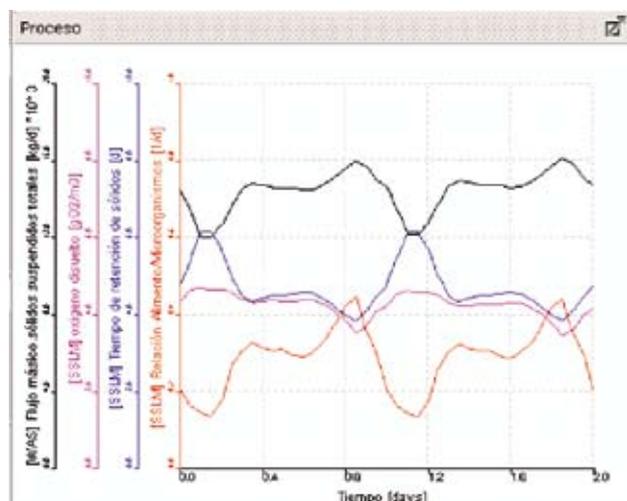


Figura 3. Características del efluente

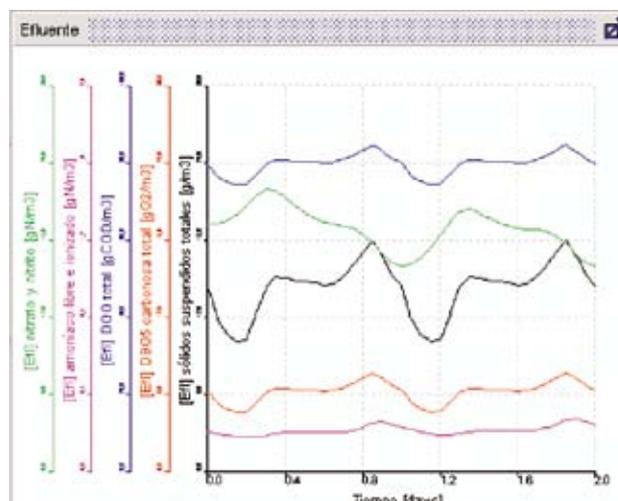


Figura 4. Variables de proceso

Tabla 5. Requerimiento de oxígeno y dimensionamiento del sistema de aeración

Req. actual de oxígeno	28,072.24	kg/d	Volumen para transf. O ₂	25,786.80	m ³ /h
Alpha	0.65		Cantidad teórica difusores	853.06	Difusores
Beta	0.95		USAR	860.00	o.k.
Concentración OD	2.00	g/m ³	Factor de actualización	1.11	Ratio
Elevación del sitio	365.76	m	Flujo de aire en la succión	28,685.16	m ³ /h
Altura int. de difusores	0.61	m	Potencia estimada actual	655.98	kW
Req. estándar oxígeno	2,479.02	kg O ₂ /h	N° equipos en operación	2.00	en oper
OTE estimado	0.35		USAR:	336.00	kW
Tasa de aire	64.00	m ³ /m ² /h,	Eficiencia estándar aeración	5.12	kg O ₂ /kW/h

una capacidad individual de 72,000 m³/d, para una carga superficial de 21 m³/m²/d y flujo de sólidos de 5.10 kg/m²/h.

Al operar el tren 5 con 86,400 m³/d, el clarificador 2 estaría trabajando con sobrecarga hidráulica del 18%, con flujo de sólidos de 6.91 kg/m²/h y carga hidráulica superficial de 25.46 m³/m²/d, o sea, en la parte alta del rango (Metcalf & Eddy, 2003), ver tabla 6, aún así, la calidad del efluente clarificado no parece haberse afectada y ha sido aceptable, ver tabla 7.

Una vez que arrancó operaciones el tren 5 (agosto de 2003) con el nuevo arreglo de difusores, fue monitoreado con la misma frecuencia que los otros trenes, habiendo obtenido un comportamiento aceptable. En las figuras 5 y 6 se muestra el comportamiento histórico del DBO₅ y NH₃ de enero de 2003 a diciembre de 2010, base en promedios mensuales. La frecuencia de muestreo fue tres veces a la semana (lunes, miércoles y viernes).

El nitrógeno amoniacal muestra un cambio notorio en su tendencia a partir de la puesta en operación del tren 5 con el sistema nuevo de difusores de fondo, lo cual también es evidenciado con la concentración de NO₃, cuyo promedio era alrededor de 10 mg/L en los otros trenes, mientras que en el tren 5 estaba entre 1 a 3 ppm, lo anterior resume el objetivo del presente trabajo.

Cabe mencionar que anterior a este cambio, el proceso del tren 5 era el original (oxígeno puro), adquiriendo éste a un proveedor externo, pero a una tasa menor de 36 Ton/d (diseño original), en parte por su alto costo.

Según los datos presentados, fue posible disolver la cantidad de oxígeno necesaria (28 Ton/d) con solo dos sopladores centrífugos de 336 kW, con capacidad de 12,743 m³/h (c/u) y que, aunado a la mayor cantidad de difusores y su densidad obtenida de la modelación en combinación con la aceptable eficiencia de transferencia de oxígeno de los difusores de fondo de burbuja fina tipo tubular.

En cuanto a la producción de lodo y su purga para el tren 5, se implementó una derivación desde la línea de retorno (independiente) hacia el cárcamo de retorno de lodo de los demás trenes, por lo que no hay restricción para purgar la cantidad que sea necesaria, según los cálculos anteriores.

Cabe mencionar que a lo largo de los años 2005 a 2008, se tuvieron ciertos problemas de mantenimiento con los sopladores centrífugos, lo cual demeritó algo los niveles de NH₃ en el efluente, sin embargo a la fecha, se retomó nuevamente el objetivo, que debe ser alrededor de 2 mg/L, según datos de diseño original.

CONCLUSIONES

Considerando lo expuesto en el presente trabajo, el lograr la nitrificación con prácticamente la mitad de energía que requería el sistema original, con el mismo volumen de tanque (pequeño para un proceso entre convencional y alta tasa) y a plena capacidad de flujo, además del antecedente del bajo desempeño de los otros trenes ya equipados con burbuja fina, constituyó un reto que además, desafió el bajo tiempo de retención de sólidos.

Tabla 6. Revisión del clarificador secundario

Relación Qr/Q	0.75	Ratio	Diámetro teórico	65.73	m
Flujo de sólidos	6.91	kg MLSS/m ² /h	USAR	65.84	m
Área requerida para espesar	3,393.45	m ²	Tirante en la parte cilíndrica	4.57	m
Carga hidráulica superficial	25.46	m ³ /m ² /d	Tiempo de retención hidráulico	4.32	h

Tabla 7. Comportamiento del tren 5 (Bitácora de Operación)

Parámetro	Influente				Efluente			
	SST	DQO	DBO ₅	NH ₃	SST	DQO ₅	DBO	NH ₃
Prom	165.30	548.71	206.26	35.39	12.65	49.90	13.23	3.07
Desv Std	62.47	136.55	48.87	5.44	7.89	15.36	6.88	3.86

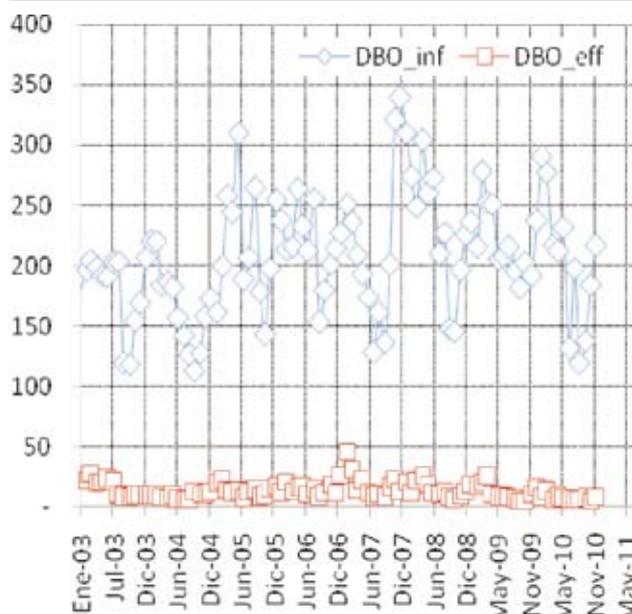


Figura 5. Récord de DBO, influente y efluente

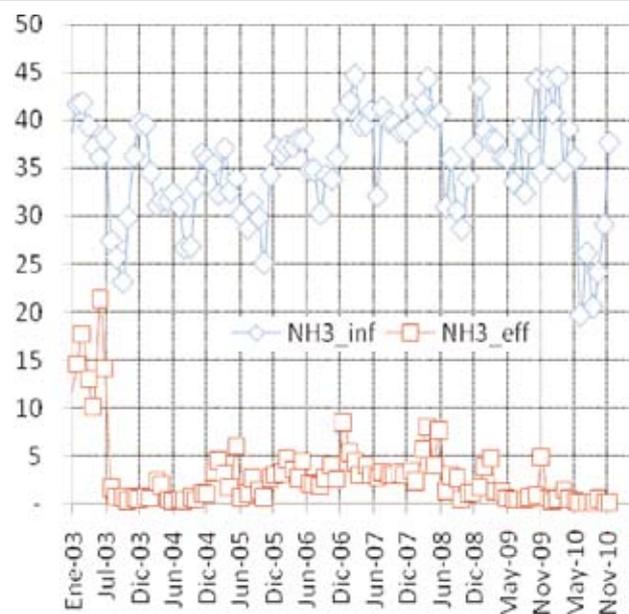


Figura 6. Récord de NH₃, influente y efluente

Cabe resaltar la contribución de dos aspectos importantes, la forma del reactor (tipo pistón) y la temperatura de proceso, muy apropiada para el crecimiento autótrofo (nitrificación). Sin embargo, estas mismas condiciones también se tenían en los trenes restantes.

La potencia para aeración con este nuevo arreglo quedó en 672 kW por reactor, que con respecto a la potencia original (1,343 kW por reactor) da un ahorro en consumo de energía destacable. Sin embargo, es importante mencionar que la vida útil de los difusores de burbuja fina (membrana EPDM) es alrededor de cinco años, por lo que habrá que considerar la reposición de los difusores como parte del costo de operación.

En vista de los resultados obtenidos, el Organismo Operador decidió homologar el diseño del tren 5 para los demás trenes de la planta, a fin de que toda la planta tenga la misma eficiencia y calidad del efluente clarificado.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo fue necesaria la aportación de los Auxiliares y Operadores de Proceso de la planta bajo estudio, a quienes se les reconoce por su tiempo, dedicación y esfuerzo. Así mismo se hace patente el agradecimiento al Ing. Emilio Rangel Woodyard, Director General del Organismo Operador, así como también al Ing. Juan Emilio García, Coordinador Ejecutivo, al Dr. Gerardo Bermejo Acosta, Coordinador de Saneamiento y al Ing. Jorge Bernal Pérez, Gerente de Tratamiento, por las facilidades y apoyos otorgados para la realización del presente trabajo.

El objetivo del presente manuscrito es divulgar las experiencias, a fin de que a otros organismos opera-

dores les sean de utilidad, ya que el agua constituye uno de los mayores activos de la Humanidad, tenemos que cuidarla.

BIBLIOGRAFÍA

Bitácoras de operación diaria y resultados de laboratorio de control, disponibles desde 1996 a la fecha de la planta bajo estudio y memoria de cálculo original.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (01-06-1997) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (17-07-1998) Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Gernaey K.V., Van Loosdrecht M.C.M., Henze M., Lind M. and Jorgensen S.B. (2004). Activated sludge wastewater plant modelling and simulation: state of the art, Environmental & Software, vol 19, pp 763-783

Henze M., Gujer W., Mino T. and Van Loosdrecht M.V. (2002) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA Publishing, London, UK, 130 p

Hydromantis, Inc., Tutorial GPS-X version 5 (2007), 1685 Main Street West, Suite 302, Hamilton, Ontario, Canada L8S 1G5, Tel +1 905 522 0012, Fax +1 905 522 0031, www.hydromantis.com

Loaiza Jimmy y Fall Cheikh (2010) "Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca, N.L." Revista Ciencia UANL / VOL. XIII, N° 1, Enero - Marzo 2010, pag 46-54

Metclaf & Eddy, Inc., Tchobanoglous G., Burton F. and Stensel D. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal & Reuse", Mc Graw Hill, 4ta edition, 2003

Petersen B., Gernaey K., Henze M. and Vanrollegheem P.A. (2002). Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial WWTP, Journal Hydroinformatics IWA 4, pp 15-38

WERF (2003), Methods for wastewater characterization in activated sludge modelling, Water Environment Research Federation (WERF), Alexandria, VA, WERF publication N° 9 WWF3, pp 596, 1er Ed.

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y SU RELACIÓN CON EL USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CAHOACÁN, CHIAPAS, MÉXICO

ESTIMATE OF WATER EROSION AND ITS RELATIONSHIP TO LAND USE IN THE COHOACAN RIVER BASIN, CHIAPAS, MEXICO

Santacruz De León, Germán¹

Resumen

En los últimos años en la costa de Chiapas se han presentado graves procesos de erosión debido a los cambios de uso de suelo. Por la magnitud de la problemática se han realizado estudios que muestran el papel clave que juega la cobertura vegetal en el proceso erosivo de la lluvia. El objetivo de esta investigación es estimar la erosión hídrica, además de analizar los efectos de las modificaciones en el uso de suelo de la cuenca del río Cahoacán localizada en la costa chiapaneca. Se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS); para estimar el factor de erosividad (R) se empleó la metodología propuesta por Cortés (1991), se usaron datos de precipitación media mensual y media anual de 5 estaciones que se encuentran dentro de los límites de la cuenca y de 10 estaciones que se encuentran fuera de ella pero próximas a sus límites; los valores de R, al igual que las demás variables consideradas en la EUPS, se analizaron con apoyo del ArcView 3.2. Se establecieron tres escenarios, uno bajo condiciones actuales de uso de suelo, otro considerando las modificaciones de la vegetación en la cabecera de la cuenca; finalmente un tercero en el que se mantenían las condiciones de uso de suelo en la cabecera a la vez de que se realizaban prácticas de conservación en la misma, para lo cual se dividió en 13 microcuencas. Los resultados revelaron que en condiciones actuales de uso de suelo, las pérdidas van desde 16,270 ton/ha/año hasta valores de 20,000 ton/ha/año, presentándose valores mínimos de 13.317 ton/ha/año. Los valores encontrados son muy superiores a los reportados para el estado de Chiapas en la bibliografía consultada. Se concluye que de seguir las alteraciones de los bosques, los valores actuales de pérdida de suelo pueden incrementarse hasta en un 900%. De modificarse la tendencia actual de deforestación y con buenas prácticas agrícolas en las zonas donde se realiza agricultura de temporal y de riego, la pérdida de suelo se reduciría en un 60 % con respecto a la actual.

Palabras clave: Chiapas, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, erosión hídrica, río Cahoacán, uso de suelo.

Abstract

In recent years, serious erosion processes on the coast of Chiapas have been present due to changes in the land use. Because of the magnitude of the problem, studies have been done and they show the vegetation played an important role during the water erosion process. The objective of this research was to estimate water erosion, beside to analyze the effects of changes in the land use on the basin of the Cahoacan River, located in the Chiapas coast. The Universal Soil Loss Equation (USLE) was used; in order to estimate the erosivity factor (R), the methodology proposed by Cortés (1991) was applied. It was used average monthly and annual precipitation data of 5 stations located within the limits of the basin as well as of 10 stations located outside but close to its limits; R values, as well as the other variables considered in the USLE, were analyzed with the support of ArcView 3.2. Three scenarios were established, one under present conditions of land use, another considering vegetation modifications at the headwater basin and finally a third one in which they held the land use conditions in the headwaters basin and conservation practices were done in the same, to which was divided into 13 watersheds. The results showed that in current conditions of land use, losses range from 16,270.00 tons/ha/yr to values of 20,000.00 ton/ha/year, presenting minimum values of 13.31 ton/ha/year. The values are much higher than those reported for the state of Chiapas in the reviewed literature. It could be conclude that if the changes of forests continue, the current values of soil loss can be increased up to 900%. If the current trend of deforestation is modified and good agricultural practices were applied in areas with agricultural temporary and with irrigation, soil loss will be reduced to lower values by 60% at present.

Keywords: Chiapas, Universal Soil Loss Equation, water erosion, Cahoacan River, land use.

¹ Profesor-Investigador del Programa "Agua y Sociedad". El Colegio de San Luis, A.C. Parque de Macul # 155, Col. Colinas del Parque. San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78299. México. Tel. (444) 8 11 01 01 ext. 6109, e-mail: gsantacruz@colsan.edu.mx

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras, es responsable de la erosión de 440 millones de hectáreas de tierras de las 747 millones que sufren erosión en Asia; de 227 millones de hectáreas de las 497 millones que son afectadas por este fenómeno en África; de 123 millones de hectáreas de 243 millones en América del Sur; de 115 millones de 219 millones en Europa, 106 en América del Norte y América Central, Bifani (1984). Este mismo autor indica que un fenómeno íntimamente ligado a la erosión es el de sedimentación; es así como el proceso de erosión por acción del agua suele medirse por el volumen de sedimentos que arrastran los ríos. El Ganges, el Brahmaputra, el río Amarillo arrastran anualmente 1,451 millones, 726 millones y 1,887 millones de toneladas métricas respectivamente, volúmenes que significan 1,518, 1,090 y 2,804 toneladas métricas por kilómetro cuadrado, en comparación, el Mississipi, el Amazonas y el Nilo arrastran sólo 97, 63 y 31 toneladas métricas por kilómetros cuadrados de cuenca (Holeman, 1968).

La erosión de suelos en México es un problema ambiental muy serio que afecta a gran parte del territorio nacional en diferentes grados de severidad. La implementación de métodos para predecir la pérdida de suelo por erosión en México no ha sido muy extensa, se han realizado numerosas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de cuenca hidrográfica y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas utilizando parcelas de erosión o lotes de escurrimiento, pero pocos estudios se han enfocado a la predicción de la erosión con fines de planeación y diseño de prácticas de conservación de suelos (Montes *et al.* 1998).

Ahora bien, en Chiapas y en particular en la costa de Chiapas, que es en donde se ubica la cuenca en estudio, ha sufrido en los últimos años, graves procesos de erosión hídrica, provocando pérdidas humanas y materiales. Baumann (1999), indica que el análisis de los diferentes estudios y diagnósticos que se han realizado sobre el proceso de erosión en las cuencas hidrográficas de la Costa de Chiapas, demuestra una situación preocupante. Destaca una serie de problemas en relación al impacto humano y los cambios de uso de suelo en la zona, lo que acelera el proceso erosivo, la deforestación, la extensión de cultivos anuales y pastizales en zonas de laderas, el manejo deficiente de cultivos, la falta de medidas de conservación de suelo. Las características naturales muestran que cada uno de los factores del clima (alta pluviometría), topografía (pendientes pronunciadas), geología, aumentan el potencial natural de erosión, llegando a niveles extremos en su acción conjunta. Debido a la magnitud de la problemática mencionada se han realizado estudios por organismos gubernamentales e instituciones de investigación, estos se basan principalmente en diagnósticos visuales de diferentes cuencas hidrográficas (SERNyP 1997) y en

algunos casos mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo con base en la cartografía existente (Gómez *et al.* 1997). Existe divergencia en los resultados obtenidos, sin embargo todas éstas investigaciones indican el papel clave que juega la cobertura vegetal en disminuir o acrecentar el proceso erosivo de la lluvia en combinación con una topografía pronunciada.

La región del Soconusco, presenta problemas crecientes de erosión que tiene su causa principal en formas no adecuadas de uso de suelo, destaca la erosión que se presenta en la zona cafetalera (600 a 1400 msnm) que se manejan sin árboles de sombra (Richter, 1993). Arellano (1994) usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, estimó que en el 89 % del territorio chiapaneco se presentaban condiciones de erosividad de lluvia de extrema a muy extrema con valores de erosividad anual R mayores de 10,000 MJmm/hahaño. Del mismo modo concluye que en poco más del territorio estatal, el potencial de erosión hídrica es de extremo a muy extremo.

Los resultados obtenidos por diversos investigadores, permiten ver la importancia de realizar mayores estudios que permitan diagnosticar la erosión hídrica a nivel de cuenca, así como poder inferir que puede ocurrir en caso de presentar la tendencia de degradación del suelo. En tal sentido, el objetivo de esta investigación fue estimar la erosión hídrica con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y analizar los efectos de los cambios en el uso de suelo en el proceso de erosión hídrica en la cuenca del río Cahoacán.

La ventaja de la EUPS es que el índice de erosividad permite considerar de modo más preciso las diferencias de pluviosidad de una tormenta a otra, o de una estación a otra. Sin embargo, en la práctica es muy difícil tener los datos que permitan estimar el índice de erosividad, esto debido a la escasez y mala distribución de los pluviógrafos. Lo anterior ha dado lugar a la búsqueda de modelos que realicen una predicción en función de parámetros proporcionados por la red pluviométrica. Para el caso que aquí se estudia se usará la expresión generada por Cortés (1991), ésta ecuación y los argumentos de este último se detallan más adelante.

Gracia (1997), indica que la versión original de la ecuación universal fue concebida para aplicaciones a nivel de parcelas, por lo que tiene limitaciones para aplicarse a grandes áreas como es el caso de las cuencas. Lo que implica evaluar algunos parámetros de forma diferente al del parámetro original, este es el caso de por ejemplo de S y L; sin embargo los criterios para la realización de esta estimación no son uniformes ni completamente probados. El mismo autor indica que los factores K, SL, C y P pueden tomarse en cuenta siguiendo el mismo procedimiento del criterio original y que siempre el factor R es motivo de discusión. Existen numerosos criterios para determinar este factor, los cuales básicamente emplean la precipitación media anual, argumentando claramente

que no existe información pluviográfica que permita estimar el factor R. Por ejemplo, Barrios y Quiñónez (2000) estimaron el factor R a partir de registros mensuales de lluvia, usando datos de seis estaciones climatológicas cercanas al área de la cuenca motivo de su estudio, los mismos autores realizaron la distribución espacial de R mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

METODOLOGÍA

La cuenca hidrográfica del río Caohacán se ubica en la Región Hidrológica No. 23, Costa de Chiapas y en la Región Administrativa No. 11 denominada Frontera Sur. Se ubica dentro de la zona socioeconómica denominada Soconusco (Figura 1). La cuenca del río Caohacán, queda ubicada dentro del área de los municipios de Cacaohatán, Tuxtla Chico, Metapa, Frontera Hidalgo y mayormente en el municipio de Tapachula. En algunos casos el río que da formación a esta cuenca, sirve de límite entre municipios.

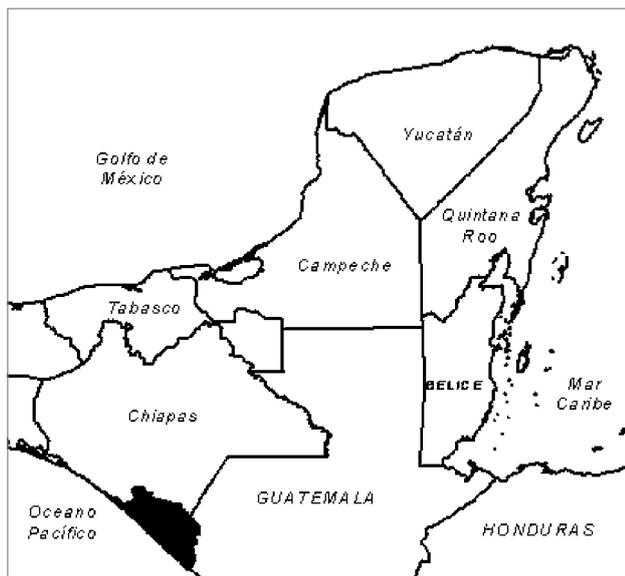


Figura 1. Localización de la zona socioeconómica del Soconusco, Chiapas.

Fuente: ECOSUR, 1999.

El río Cahocacán es el que da origen a la cuenca del mismo nombre, este río tiene su origen en el volcán Tacaná y es la corriente más cercana a Guatemala, su peculiar disposición hace que la cuenca se desarrolle en forma íntegra dentro del territorio mexicano. La longitud total del río a lo largo de su cauce principal es de aproximadamente 72.0 km, su cuenca total es de aproximadamente 277.0 km², hasta donde se ubica la estación hidrométrica, se puede decir que se trata de una corriente muy angosta, con sus afluentes secundarios dirigidos casi todos en la misma dirección de la corriente principal, esto es de norte a sur.

Para estimar la erosión hídrica en la cuenca se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Gracia (1997), indica que una de las principales difi-

cultades para el uso de la ecuación universal, radica en la inconsistencia de las unidades empleadas, ya que el criterio original considera unidades inglesas, por lo que la transformación al sistema métrico no es trivial, el mismo autor propone como alternativa para resolver este problema el determinar todos los factores en unidades inglesas y calcular la pérdida de suelo empleando la ecuación 1.

$$A = (224.2) R K SL C P \quad (1)$$

Lo que permite que A se obtenga en toneladas métricas por kilómetro cuadrado por año.

En México y en muchas otras regiones del mundo se tiene poca información sobre la intensidad de lluvia, por lo que se han desarrollado modelos empíricos alternativos para la estimación de R en función de otros parámetros de la lluvia, por ejemplo el de Lal (1976) y el de Ferro *et al.* (1991). Para estimar el factor R se emplea la metodología propuesta por Cortés (1994), cuya ecuación ($r^2=0.96$) es:

$$R = Y = 2.4619 P + 0.00606 P^2 \quad (2)$$

Donde:

R = Factor de erosividad de Wischmeier.

P = Precipitación media anual.

Para determinar dicho valor se usaron los datos de precipitación media mensual y la precipitación media anual de 5 estaciones que se encuentran dentro de los límites de la cuenca del Caohacán, así como los datos de 10 estaciones que se encuentran en las cuencas con las que limita esta última (Figura 2).

El factor de erodabilidad del suelo, K, es un factor que toma en cuenta el tipo de suelo. Para su determinación se consideró la metodología de la FAO (1980) que utiliza unidades de suelos de acuerdo a su clasificación y considera tres tipos de textura superficial del suelo, además se consideró lo establecido por Arellano (1994). Para determinar el factor de cobertura del suelo, C, se consideró la información cartográfica en formato vectorial.

El factor de prácticas de conservación del suelo, P, que es considerado como una variable independiente en la EUPS, contempla prácticas de conservación del suelo tales como: cultivos en curvas de nivel, cultivos en terrazas. En el caso de la cuenca en estudio se consideró que no se realiza alguna de éstas prácticas y por lo tanto éste factor toma el valor de P= 1. Este considerando lo asumen Barrios y Quiñónez (2000), para la cuenca que ellos estudiaron y Montes *et al.* (1998), asumen que los factores C y P de la EUPS pueden considerarse con valores unitarios y usar únicamente los factores R, K, LS.

El factor de longitud y grado de la pendiente, LS, considera el efecto de la topografía sobre la erosión.

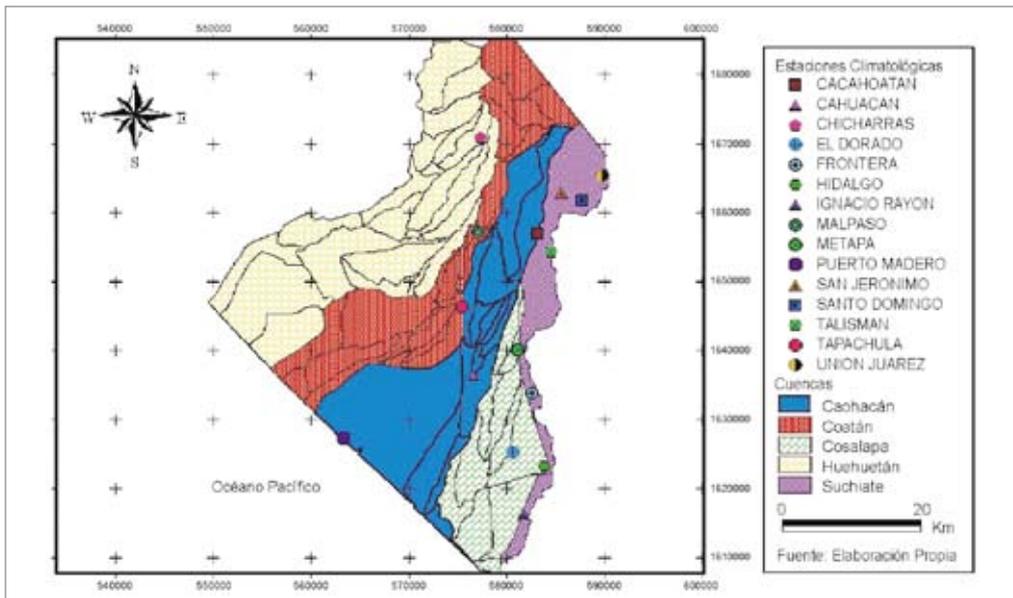


Figura 2. Estaciones climatológicas consideradas en el cálculo de R en la cuenca del río Caohacán.

Para su determinación se empleó la ecuación 3 (Gracia, 1997; Montes *et al.* 1998; McCool *et al.* 1987; Foster *et al.* 1977).

$$LS = (x / 22.13)^m (0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2) \quad (3)$$

Donde:

x = Longitud del tramo de pendiente S, en metros.

S = Pendiente en porcentaje (5, 10, 20 %)

m = exponente que depende del grado de pendiente del terreno.

El exponente m, en función de la pendiente del terreno asume los valores siguientes: m = 0.5 si S ≥ 5 %; m = 0.4 si 5 > S > 3 %; m = 0.3 si 3 ≥ S ≥ 1 %; m = 0.2 si S < 1 %. Esta fórmula se aplica para pendientes

menores del 9% y longitudes de declive inferiores a los 350 metros (Edeso *et al.* 1995) y en este caso se aplicó para las microcuencas 3 a 9. En el caso de las microcuencas 1 y 2, en las que las condiciones anteriores no se cumplen, se empleó el criterio de Mintegui (1988) citado por Barrios (2000), que también es utilizado por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid) (Edeso *et al.* 1995), así como para analizar una microcuenca andina venezolana (Barrios, 2000). Para la aplicación del criterio citado se consideró el comportamiento de las pendientes en grados o porcentajes (Figura 3).

Se establecieron tres escenarios, uno bajo condiciones actuales de uso de suelo, otro considerando modificaciones vegetales en la cabecera de la cuenca y finalmente un tercero en el que se mantenían

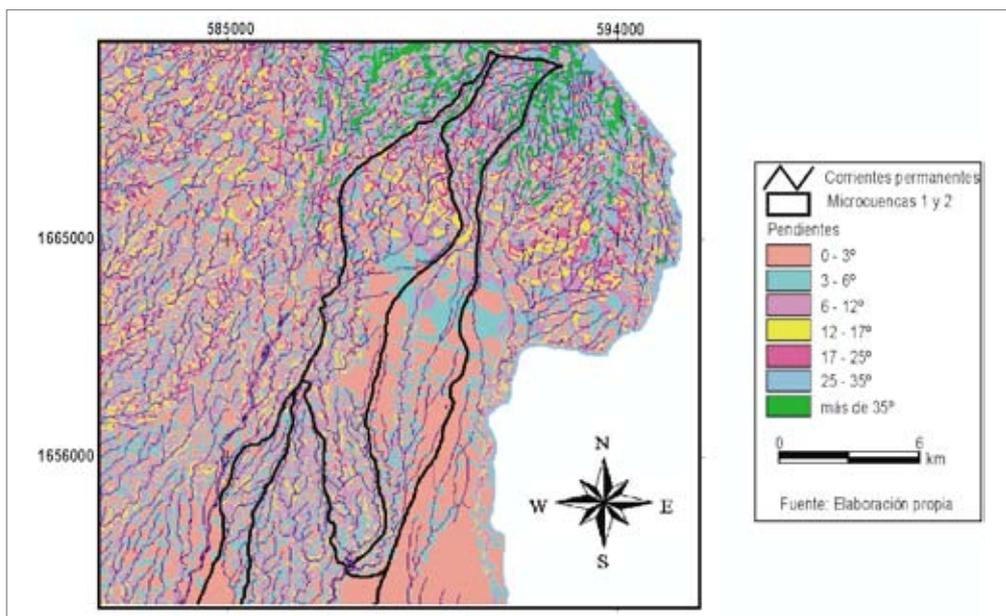


Figura 3. Tipos de pendientes en las microcuencas 1 y 2 para definir el factor LS.

las condiciones de uso de suelo en la cabecera de la cuenca y se realizaban prácticas de conservación en la misma, para lo cual la cuenca se dividió en 13 microcuencas (Figura 4)

RESULTADOS

De acuerdo con la tabla 1, R asume un valor mínimo de 13,543.28, que corresponde a la estación El Dorado y un valor máximo de 162,740.401 que corresponde a la estación Santo Domingo.

Los valores de isoerosividad van desde los 160,000 MJ*mm/ha*h*año hasta valores mínimos de 20,000 MJ*mm/ha*h*año. En la cabecera de la cuenca se presentan erosividades altas y en las partes bajas

que pueden ser consideradas de acumulación de sedimentos se presenta valores bajos, menores a los 20,000 MJ*mm/ha*h*año (Figura 5).

Los valores del índice de erodabilidad K, varían desde 0.013 hasta 0.030, valores considerados como medios (Figura 6). Al interior de la cuenca del río Cahoacán se presentan zonas urbanas hasta zonas de bosque mesófilo de montaña (Figura 7); en algunos casos no se puede asociar valores factor de cobertura (C) a algunos tipos de vegetación tal es el caso de las áreas consideradas como perturbadas y la vegetación de dunas costeras. El valor máximo de este factor corresponde a la agricultura de riego con 0.56 y el mínimo al área de laguna intermitente con un valor de 0.003.

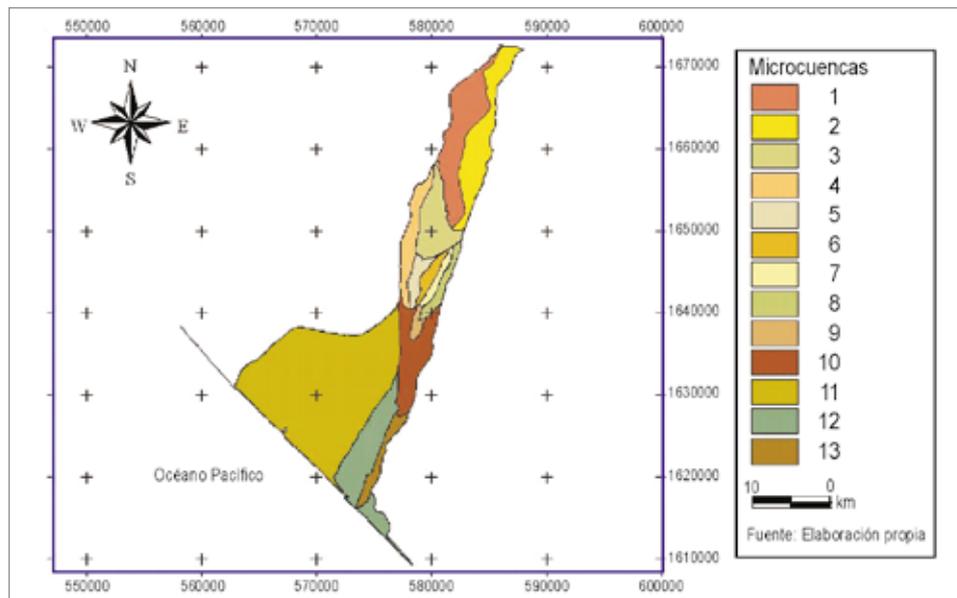


Figura 4. División en microcuencas de la cuenca del río Cahoacán.

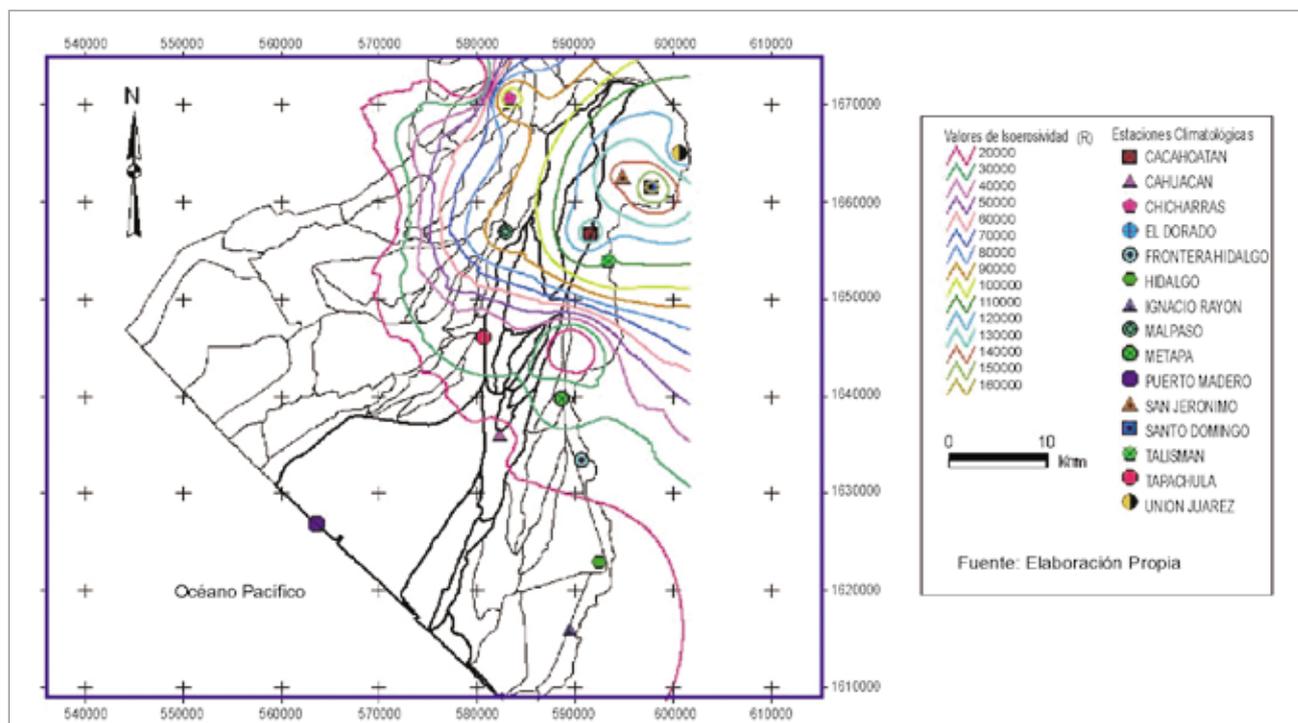


Figura 5. Estaciones climatológicas, cuencas y valores de isoerosividad (R).

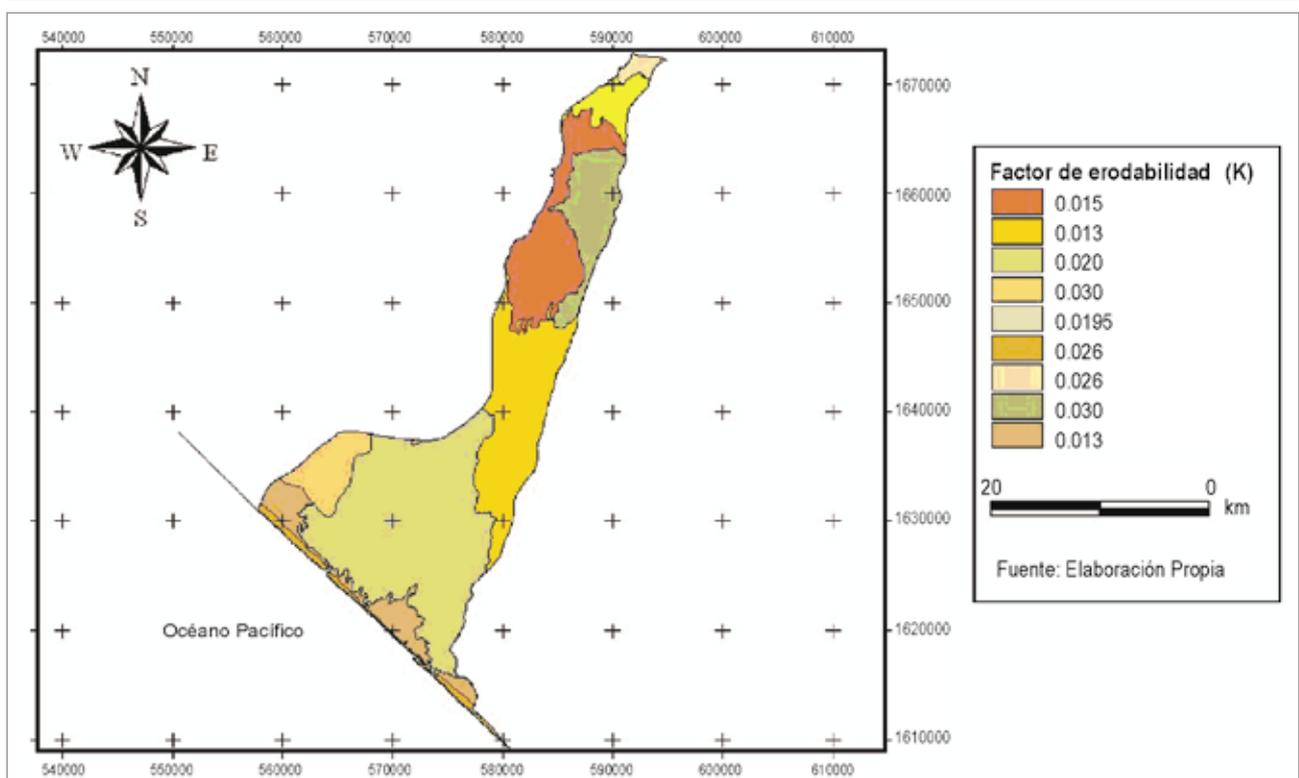


Figura 6. Factor de Erodabilidad (K) en función del tipo de suelo, en la cuenca del río Caohacán.

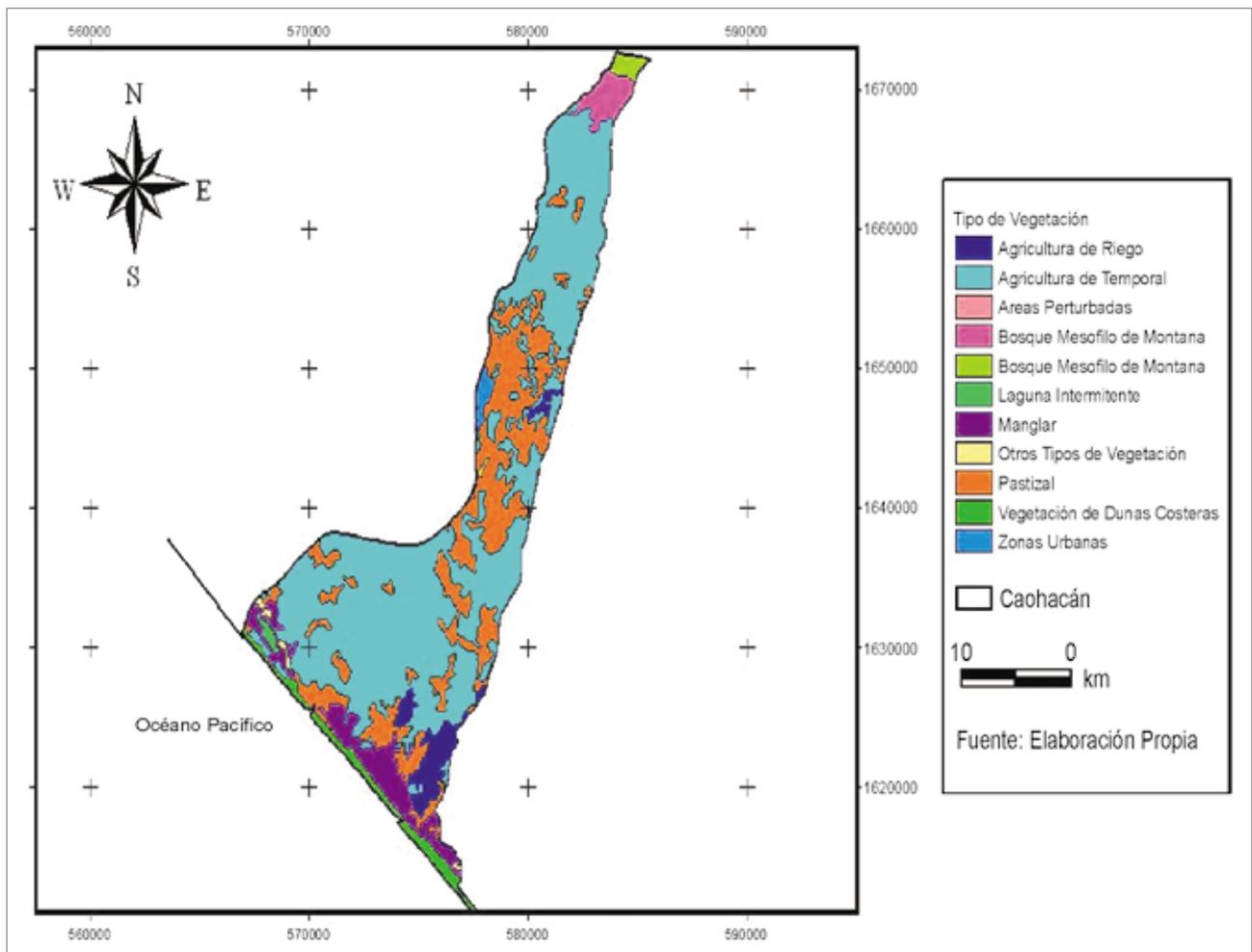


Figura 7. Tipo de vegetación para definir el factor C, en la cuenca del río Caohacán.

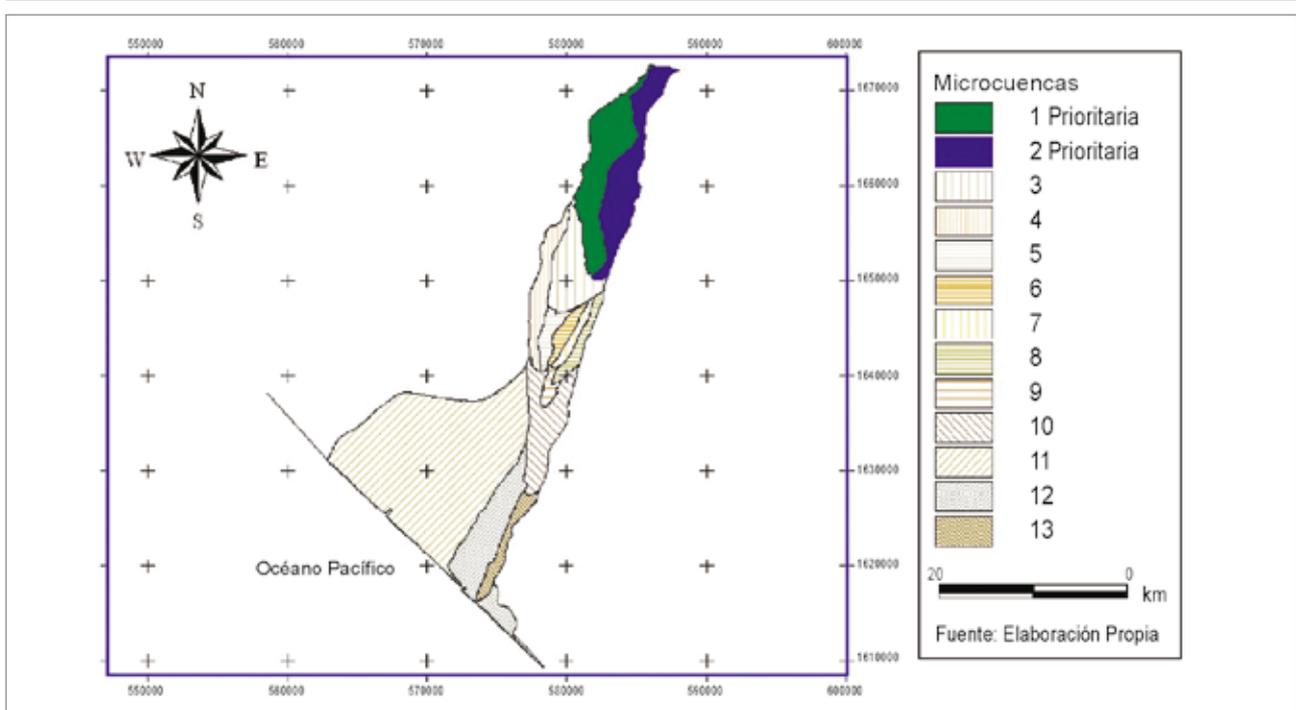


Figura 8. Microcuencas prioritarias para el control de la erosión hídrica.

El cálculo de la cantidad de material erosionado en toneladas por hectárea por año se realizó para nueve microcuencas, las cuales se ubican por arriba de los 60 msnm, considerando que en las restantes se deposita el material erosionado (Tabla 2). La tabla 2 permite ver que en las partes altas de la cuenca (microcuencas 1 y 2) se presenta la mayor cantidad de pérdida de suelo, con valores que van de los 16,270.8 toneladas por hectárea por año en una sección de la microcuenca 1, hasta valores de 20,025.6 toneladas por hectárea por año en la microcuenca 2; en contraste, se tienen valores mínimos de 13.317 ton/ha/año en la microcuenca 9. Es importante mencionar que en la parte alta existen áreas de bosque mesófilo de montaña, pero se presentan las mayores pendientes del terreno además de presentar superficies considerables de agricultura de temporal. Los valores encontrados son superiores a los reportados en la bibliografía consultada; por ejemplo, Arellano (1994) reporta para Chiapas una pérdida de suelo de 500 ton/ha/año, sin embargo las condiciones de la cuenca analizada (topografía accidentada, prácticas agrícolas inadecuadas y precipitación pluvial) propician que se pierda grandes cantidades de suelo. Reynoso *et al.* (1998), encontraron que en las cuencas del río Vadoancho y Novillero, en la región del Soconusco, que 9.5% de la superficie tiene valores de erosión moderados (20 – 80 ton/ha) y sólo un 1.0 % presenta valores mayores a 80 ton/ha. Por otro lado, Retureta y Ascanio (1998), encontraron, pérdidas de suelo de 16,925.50 ton/ha/año en áreas agrícolas, de 7,245.50 ton/ha/año en las áreas ganaderas y 123.72 ton/ha/año en la parte forestal, todo ello en la subcuenca del río Atopa en el estado de Veracruz, en la cual se tienen precipitaciones de 1,676 mm hasta

2,000 mm, muy similares a las presentes en el área que aquí se estudia.

Montes *et al.* (1998), reportan para una cuenca en el estado de Querétaro valores que van de 20 a 80 ton/ha/año; si bien las condiciones físicas y climáticas no son similares a la cuenca estudiada, esto permite ver que cada uno de los factores considerados en la ecuación son determinantes en mayor o menor grado del valor obtenido; sin embargo para este caso los que mayor influencia presentan son el índice de erosividad (R), el factor que integra la pendiente y la longitud del cauce considerada (LS), así como el factor de cobertura de suelo.

Tabla 1. Factor de erosividad (R) a partir del modelo propuesto por Cortés (1991).

CLAVE	ESTACION	R (MJ*mm/ha*h*año)
7018	Cacaohatan	134928.92
7019	Caohacan	18259.63
7057	Chicharras	105852.47
7045	El Dorado	13543.28
7068	Frontera Hidalgo	26956.52
7163	Hidalgo	18118.03
7078	Ignacio Rayón	14700.38
7191	Malpaso	94608.05
7117	Metapa	37187.46
7136	Puerto Madero	18282.95
7146	San Jerónimo	142653.53
7157	Santo Domingo	162740.40
7166	Talisman	109519.55
7164	Tapachula	32721.68
7172	Unión Juárez	115564.35

En la tabla 3, se presentan los resultados para el segundo escenario, en el que se proponen condiciones severas para la cuenca, es decir, que el área boscosa (valores de C igual a 0.06) se convierta en zona de agricultura de temporal (con valores de C igual a 0.56), sin prácticas de conservación del suelo, con valores de P iguales a 1; en el que se considera además que las zonas de pastizal (valores de C igual a 0.07) continúan bajo el mismo régimen sin alteraciones. La tabla 4 permite ver que si se continúan las modificaciones en la cubierta vegetal de la parte alta de la cuenca, esto es, de continuar con las alteraciones de los bosques, los valores actuales de pérdida de suelo pueden incrementarse hasta en un 900%, lo cual es muy grave. Puede observarse en la misma tabla que modificando una sección de la microcuenca 1 y una sección de la microcuenca 2, es decir variando la cobertura vegetal de bosque mesófilo a agricultura de temporal, la pérdida de suelo en estas secciones pasa de 3,425.8 ton/ha/año a 31,973.8 ton/ha/año para la microcuenca 1 y para la microcuenca 2 se incrementa de 3425.8 ton/ha/año a 31,973.8 ton/ha/año; esto permite ver la importancia de la cobertura vegetal. Sin embargo, con acciones antropogénicas esta tendencia puede ser revertida e ir modificando (disminuyendo) los valores de pérdida de suelo.

En el tercer escenario se simula que no existen modificaciones vegetales en la cabecera de la cuenca

Tabla 2. Pérdida de suelo en ton/ha*año, en las microcuencas en las que se divide la cuenca del Río Caohacán. Condiciones actuales.

R	LS	K	C	P	A (ton/ha/año)
Microcuenca 1					
120000	18.3	0.026	0.06	1	3425.8
130000	14.9	0.015	0.56	1	16270.8
100000	2.5	0.03	0.56	1	4200.0
Microcuenca 2					
120000	18.3	0.026	0.06	1	3425.8
120000	14.9	0.02	0.56	1	20025.6
100000	1.5	0.015	0.56	1	1260.0
Microcuenca 3					
70000	1.49	0.0138	0.3925	1	565.43
Microcuenca 4					
80000	1.49	0.0165	0.249	1	492.96
Microcuenca 5					
40000	0.91	0.013	0.215	1	101.69
Microcuenca 6					
50000	0.71	0.013	0.276	1	127.93
Microcuenca 7					
50000	0.32	0.013	0.3692	1	77.96
Microcuenca 8					
50000	0.90	0.013	0.369	1	217.02
Microcuenca 9					
30000	0.25	0.013	0.1355	1	13.31

Tabla 3. Pérdida de suelo en ton/ha/año, en las microcuencas en las que se divide la cuenca del Río Caohacán. Modificaciones antropogénicas.

R	LS	K	C	P	A (ton/ha/año)
Microcuenca 1					
120000	18.3	0.026	0.56	1	31973.8
130000	14.9	0.015	0.56	1	16270.8
100000	2.5	0.03	0.56	1	4200.0
Microcuenca 2					
120000	18.3	0.026	0.56	1	31973.8
120000	14.9	0.02	0.56	1	20025.6
100000	1.5	0.015	0.56	1	1260.0
Microcuenca 3					
70000	1.49	0.0138	0.3925	1	565.43
Microcuenca 4					
80000	1.49	0.0165	0.249	1	492.96
Microcuenca 5					
40000	0.91	0.013	0.215	1	101.69
Microcuenca 6					
50000	0.71	0.013	0.276	1	127.93
Microcuenca 7					
50000	0.32	0.013	0.3692	1	77.96
Microcuenca 8					
50000	0.90	0.013	0.369	1	217.02
Microcuenca 9					
30000	0.25	0.013	0.1355	1	13.31

Tabla 4. Pérdida de suelo en ton/ha/año, en las microcuencas en las que se divide la cuenca del Río Caohacán. Con prácticas de conservación de suelo.

R	LS	K	C	P	A (ton/ha/año)
Microcuenca 1					
120000	18.3	0.026	0.06	1	3425.8
130000	14.9	0.015	0.56	0.4	6508.3
100000	2.5	0.03	0.56	0.3	1260.0
Microcuenca 2					
120000	18.3	0.026	0.06	1	3425.8
120000	14.9	0.02	0.56	0.4	8010.2
100000	1.5	0.015	0.56	0.3	378.0
Microcuenca 3					
70000	1.49	0.0138	0.3925	0.3	169.63
Microcuenca 4					
80000	1.49	0.0165	0.249	0.3	147.89
Microcuenca 5					
40000	0.91	0.013	0.215	0.3	30.50
Microcuenca 6					
50000	0.71	0.013	0.276	0.3	38.37
Microcuenca 7					
50000	0.32	0.013	0.3692	0.3	23.39
Microcuenca 8					
50000	0.90	0.013	0.369	0.3	65.10
Microcuenca 9					
30000	0.25	0.013	0.1355	0.3	3.99

y con prácticas de conservación de suelo; es decir, se propone que se detengan las acciones de deforestación y que en las partes altas de la cuenca, en donde actualmente se realiza agricultura de temporal sin prácticas de conservación de suelo, se realicen éstas; además que las áreas de pastizal se mantengan y que en la parte media de la cuenca en donde se realicen actividades agrícolas de temporal o de riego se realicen las citadas prácticas de conservación. Los resultados se presentan en la tabla 4. En la misma puede observarse que si se modifica la tendencia actual de deforestación y con prácticas agrícolas (cultivos en fajas, con valores de P igual a 0.4 o 0.3) en las zonas donde se realizan actividades agrícolas de temporal y de riego, la pérdida de suelo disminuye hasta valores del orden de las 8,010.2 toneladas de suelo por hectárea por año, con valores menores en un 60% a los actuales; presentándose valores máximos de 8,010.2 ton/ha/año y valores mínimos de 3.99 ton/ha/año.

Esto da una idea precisa hacia donde deben orientarse los esfuerzos y las inversiones económicas de los órganos de gobierno; es importante indicar aquí que las soluciones de tipo técnico siempre deben ir acompañadas con soluciones de carácter social para que tengan impactos positivos. Es importante no ver los números en forma "fría" y considerar que la técnica por sí sola solucionará estos graves problemas de pérdida de suelo.

Por otro lado, la deforestación podría incrementar la erosión. Por ejemplo, en Malasia, las corrientes procedentes de zonas forestales ya explotadas llevan de ocho a 17 veces más carga de sedimentos que antes de explotarlas (Falkenmark y Chapman, 1989). La pérdida real de suelo, sin embargo, depende en buena medida del uso que se le da a la tierra después de que los árboles han sido ya talados. La erosión superficial de praderas bien conservadas, en bosques sin una carga ganadera excesiva y en zonas con agricultura de conservación es de baja a moderada (Bruijnzeel, 1990).

El aporte de sedimentos a la cuenca baja no puede adscribirse de una forma sistemática a los cambios en las prácticas de uso de la tierra en la cuenca alta. Los impactos humanos sobre el aporte de sedimentos podrían ser substanciales en regiones con unas condiciones geológicas estables y tasas de erosión natural bajas. En regiones con tasas de precipitación altas, terrenos con fuertes pendientes y altas tasas de erosión natural, sin embargo, el impacto del uso de la tierra podría ser despreciable, como en la parte de cabecera de la cuenca del Cahocacán. Es importante tener presente que lo que aquí realmente interesa es el valor de erosión hídrica, el aporte de sedimentos finos es un valor que se requiere en caso de que se desee construir alguna obra de almacenamiento (presa) en el área de estudio, sin embargo es necesario indicar que la cuenca del río Cahocacán no presenta las características físicas necesarias para la construcción de tal obra hidráulica.

CONCLUSIONES

Los valores de precipitación media anual son muy grandes en la parte alta de la cuenca, provoca valores de erosividad muy altos en la zona de montaña del orden de los 130,000 MJ*mm/ha*h*año; la precipitación media anual disminuye en las zonas planas cercanas al área de costa, generándose valores de 20,000 MJ*mm/ha*h*año en esta zona. Con estos valores y en las condiciones actuales de uso del suelo se tiene que los valores de erosión hídrica, determinados mediante la EUPS, van desde las 16,270.8 toneladas por hectárea por año en una sección de la microcuenca 1 y hasta valores de 20,025.6 en la microcuenca 2; presentándose valores mínimos de 13.317 ton/ha/año en la microcuenca 9. Los valores encontrados son altamente superiores a los reportados en la bibliografía consultada, en otras regiones y en estimaciones realizadas para el estado de Chiapas.

Suponiendo que continuarán las condiciones de degradación de la cuenca, es decir que se aumentará el área agrícola de temporal, las condiciones que facilitan el fenómeno de erosión se incrementarían, ocasionando un aumento del aporte de sedimentos y de las consecuencias que esto trae consigo. De continuar con las alteraciones de los bosques los valores actuales de pérdida de suelo pueden incrementarse hasta en un 900%, lo cual es muy grave; modificando una sección de la microcuenca 1 y una sección de la microcuenca 2; es decir, variando la cobertura vegetal de bosque mesófilo a agricultura de temporal, la pérdida de suelo en estas secciones se incrementa considerablemente; esto permite ver la importancia que representa la cobertura vegetal (que se puede decir que depende de las acciones antropogénicas) en la pérdida total del suelo en la cuenca. De modificarse la tendencia actual de deforestación y con prácticas agrícolas (cultivos en fajas, con valores de P igual a 0.4 o 0.3) en las zonas donde se realizan actividades agrícolas de temporal y de riego, la pérdida de suelo se ve ampliamente disminuida, con valores menores en un 60% a los actuales; presentándose valores máximos de 8,010.2 ton/ha/año hasta valores mínimos de 3.99 ton/ha/año. Las microcuencas a las que se les debe poner mayor atención a corto plazo son la 1 (Azul) y 2 (Verde), que son las que presentan la mayor erosión debido a las condiciones topográficas (pendientes fuertes) y a la presencia de prácticas agrícolas no amigables para el ambiente (Figura 8).

BIBLIOGRAFÍA

- Arellano M. J. 1994. *La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas. Evaluación y principios tecnológicos para su control*. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irri-gación. Chapingo, México.
- Barrios, A. 2000. *Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles*

- con IDRIS, aplicación en una microcuenca andina. *Revista Forestal Venezolana* 44(1) 2000, 57-64.
- Barrios A. G. y Quiñónez E. 2000. *Evaluación de la erosión utilizando el modelo (R)USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los Andes Venezolanos*. *Revista Forestal Venezolana* 44(1) 2000, 65-71.
- Baumann J. 1999. *Factores determinantes en el proceso hidrológico erosivo en las cuencas hidrográficas de la Costa de Chiapas*. En Memoria del IX Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4 Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. ANEI. Culiacán, Sinaloa.
- Bifani P. 1997. *Medio Ambiente y Desarrollo*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México.
- Bruijnzeel, L.A. 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state-of-knowledge review*. Paris: UNESCO International Hydrological Programme.
- Cortés T. H. 1991. *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México.
- ECOSUR. 1999. *Agricultura integrada, ganadería y desarrollo rural de la región del Soconusco, Chiapas*, México. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. México.
- Edeso, J.; Marauri, P. y Merino, A. 1995. *Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión*. *Lurralde: investigación y espacio*. No. 18: 257-291.
- FAO. 1980. *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. UNESCO/PNUMA. Roma, Italia.
- Falkenmark, M., y Chapman, T. (eds). 1989. *Comparative hydrology. An ecological approach to land and water resources*, Paris, Francia. UNESCO.
- Ferro V., G. Giordano y M. Lovino M. 1991. *Isoerosivity and erosion risk map for Sicily*. *Hydrological Sciences Journal*. 36 (6) 549-564.
- Gómez R. E., F. A. Galván y L. Morales. 1997. *Influencia de la cuenca hidrológica en el aporte de sedimentos en las lagunas del sistema costero Chantuto-Panzacola*, Chiapas. Reporte para SEMARNAP, PRODERS-Región Costa de Chiapas. Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa. México.
- Gracia S. J. 1997. *Pérdida de suelo en cuencas*. Capítulo 17 del Manual de Ingeniería de ríos. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
- Holeman N. 1968. *The sediment yield of major rivers of the world*. *Water Resource Research*. No. 4.
- Kirkby M. J. y R.P. Morgan. 1984. *Erosión de suelos*. Editorial Noriega-Limusa. México.
- Lal R. 1976. *Soil erosion on alfisol in western Nigeria, Effects of rainfall characteristics*. *Geoderma*. 19: 389-401.
- Maner, S. B. 1958. *Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area*. *Trans. Am. Geoph. Union*, 39:669-675.
- McCool D.K., L.C. Brown, G.R. Foster, C.K. Mutchler y L.D. Meyer. 1987. *Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation*. *Transactions of ASAE* 30(5); 1387-1396
- Montes M., M. Domínguez y E. Ventura. 1998. *Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando SIG*.
- Retureta A. A. y G.M. Ascanio. 1998. *Obtener y aplicar factores de la ecuación universal por uso del suelo en la subcuenca del río Atopa municipio de Coatepec, Veracruz, México*. En Memorias del 29º Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo: La Investigación Edafológica en México 1997 – 1998. División: Diagnóstico, Metodología y evaluación del recurso suelo, Disciplina: Génesis, Morfología y clasificación de suelos. Tapachula, Chiapas. México.
- Reynoso D. F., M.J. Oropeza, B.J. Ríos y M.R. Medina. 1998. *Erosión hídrica en dos cuencas de la Región Soconusco, Chiapas*. En Memorias del 29º Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo: La Investigación Edafológica en México 1997 – 1998. División: Aprovechamiento del recurso suelo, Disciplina: Conservación del suelo. Tapachula, Chiapas. México.
- Richter M. 1993. *Cambios Hidrológicos en la Zona Cafetalera del Soconusco*. En Investigaciones Eco-geográficas sobre la Región del Soconusco, Chiapas. CIES. México.
- SERNyP. 1996. *Condiciones ecológico-ambientales, perspectivas y estrategias de desarrollo en la Región Hidrológica No. 23 y cabeceras municipales de la Costa de Chiapas*. En Programa de Desarrollo Sustentable Costa de Chiapas. SEMARNAP-INE.

PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA CONSUMO HUMANO EN EL ESTE DE LA PAMPA, REPUBLICA ARGENTINA

PLANNING AND MANAGEMENT OF GROUND WATER FOR HUMAN CONSUMPTION IN EAST OF LA PAMPA, REPUBLIC ARGENTINA

Schulz, Carlos J.¹; Balestri, Luis A.² y Dornes, Pablo F.¹

Resumen

El agua subterránea en el este de la provincia de La Pampa constituye, por estar situado en una región geográfica particular, una fuente muy importante para el abastecimiento de su población, industria y recursos agrícola-ganaderos, dado que allí se concentra el 80% de la población.

La región en estudio, está enmarcada en el extremo occidental de la llanura pampeana donde la variabilidad de las precipitaciones juega un papel de gran importancia, convirtiéndola en una región de suma fragilidad.

Como resultado, para la planificación y gestión del agua subterránea en áreas de llanura, es fundamental tener en cuenta el concepto de región hídrica. Se llega así a la conclusión de que, por diversos motivos, la problemática hídrica en esta área en los últimos 30 años no ha tenido las respuestas científicas ni políticas que satisfagan armónicamente las necesidades de los usuarios y a partir de allí vislumbrar las soluciones integrales, fundamentalmente de carácter interprovincial.

Palabras claves: La Pampa, Gestión, Agua Potable

Abstract

Groundwater in the east of La Pampa province constitutes, as a result of its particular geographic location, a very important component in the supply of water to people, industry, agriculture, and livestock, since 80% of the population is concentrated in this area.

The study area is located in the west fringe of the llanura pampeana where precipitation plays a role of great importance due to their great variability, becoming a region of remarkable fragility.

As a result, to implement politics of designing and management of groundwater in flat areas it is critical to consider the concept of hydrological region. Thus, it can be concluded due to several reasons, that the hydrological issues in this area during the last 30 years have not adequately considered neither the scientific nor the politics aspects, to satisfy the user's necessities and from there glimpse overall solutions, fundamentally at the interprovincial level.

Keywords: la pampa, water, management

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de la gestión de un recurso hídrico subterráneo, dentro de un contexto geográfico en particular, hay que tener muy en cuenta las particularidades hidrogeológicas. Para el caso de la región pampeana, en particular en zona de llanura, la hidrodinámica del agua subterránea posee una importancia esencial y, a partir de allí el concepto de cuenca como unidad de gestión hídrica deja de tener influencia y se lo tiene que reemplazar por el concepto de región hídrica como manejo integral en la planificación y gestión de los Recursos Hídricos

En particular el caso del área en estudio, el Este de La Pampa, responde a este razonamiento. A la hora de definir modelos de gestión para esta región se plantea una confusión mayor por ser la región una zona de muy débil equilibrio hidrológico, donde una pequeña desviación de los regímenes pluviométricos normales alteran considerablemente el ciclo hídrico y también se ve potenciada por la falta de definición

de un concepto de acuífero interprovincial, temática poco discutida, así como tampoco incorporada en las legislaciones vigentes. Esto ocasiona graves consecuencias a la hora de la toma de decisiones de índole regional principalmente en la proyección de obras hidráulicas, más aún si no se tiene en cuenta que los límites físicos políticos entre las provincias no necesariamente reflejan una identidad de límites con los de un acuífero.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la provincia de La Pampa se encuentra ubicada en el centro de la República Argentina, entre los paralelos 35° y 39° latitud S y los meridianos 63° y 69° Longitud Oeste. Su territorio de 143.440 Km² se extiende entre la extensa llanura pampeana y los primeros contrafuertes andinos, estando integrada por paisajes muy diversos dado a que es un área de transición con influencias del dominio Pacífico y Atlántico. Así tenemos que en el Oeste y sudoeste el paisaje es casi "patagónico", mientras que en el noreste es similar

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPam, Avda Uruguay 151, Santa Rosa, La Pampa, e-mail: cjschulz@exactas.unlpam.edu.ar

² Facultad de Ciencias Veterinarias. UNLPam.

Artículo enviado el 13 de marzo de 2011

Artículo aceptado el 8 de mayo de 2011

a la llamada "pampa húmeda" y es, precisamente, donde se encuentra enmarcada el área del estudio, ubicada en la zona Centro-Este de la Provincia de La Pampa, República Argentina (Fig. 1).

Esta región reúne todo un conjunto de particularidades geomorfológicas, geoquímicas, hidrológicas y ecológicas únicas en el contexto de toda la región, en donde las posibilidades del aprovechamiento de las aguas subterráneas está condicionada por dos variables: 1.- el **espacio**, distribuido en tres aspectos fundamentales que son a) Factores Climáticos, b) Factores Geológicos (Estructurales y Litológicos) y c) Geomorfología y 2.- el **tiempo**, dependiente del primer factor, fundamentalmente de la lluvia.

ACUÍFERO PAMPEANO: MODELO DE LA GESTIÓN IMPROVISADA

El acuífero que provee de agua a la región considerada en este trabajo, el este de La Provincia (Fig. 1), es el Pampeano, uno de los acuíferos con mayor injerencia en el ámbito de la llanura central de nuestro país, cuya superficie aproximada de 1.900.000 Km² e involucra a varias de las provincias argentinas económicamente más activas e importantes, desde el punto de vista industrial, agrícola-ganadero y con el mayor porcentaje de la población (Schulz, 1998).

Las pendientes topográficas en la zona de la llanura donde se encuentra este acuífero oscilan entre 1/1000 a 1/10000. Las geoformas suaves, la incertidumbre en la recarga y la variación en los últimos 30 años en los regímenes de lluvia contribuyen a que haya aumentado la incertidumbre en la gestión del agua. Una precipitación ligeramente por encima de valores medios no permite que los excesos puedan ser drenados por el flujo subsuperficial, el nivel

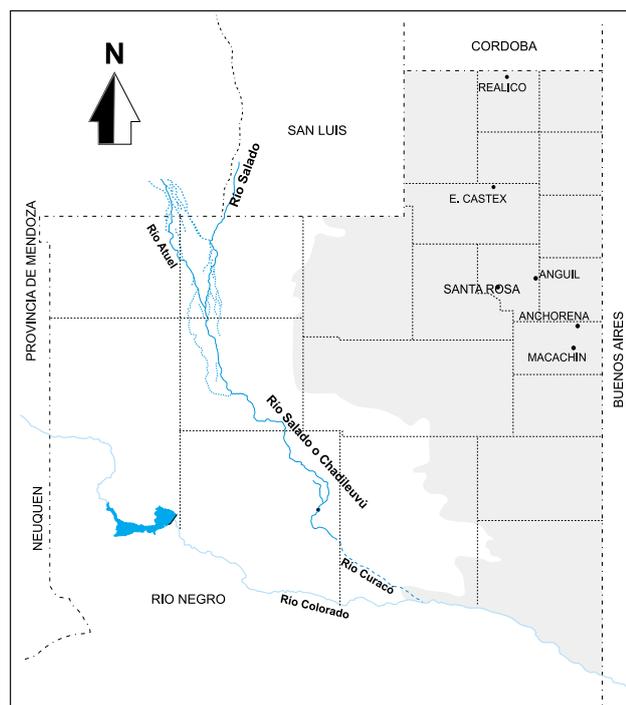


Figura 1. Ubicación del área de estudio (sin escala)

freático se eleva y alcanza la superficie del terreno por donde escurren hacia los bajos que cuando se llenan, producen escurrimientos superficiales en algunos casos, cuando no inundaciones temporarias en otros. Por otro lado, un ciclo negativo en las precipitaciones perturba el sistema hídrico con una baja de los niveles piezométricos, ocasionando la seca de lagunas y un consumo excesivo por parte de la población y de otros usos.

Esta fragilidad en el sistema hidrodinámico se traslada a la calidad del agua donde la fluctuación de determinados elementos presentes en el agua subterránea ven incrementados sus valores hasta convertir al agua en no apta para consumo humano. Este es el caso del Arsénico, Flúor, Selenio, Vanadio, y otros elementos.

No obstante la importancia y la extensión señalada, este acuífero, salvo en casos puntuales, no tiene la suficiente investigación como para tener un conocimiento y conceptualización hidrogeológica más acabada y detallada, fundamentalmente en lo que concierne a su hidrodinámica, procesos y fenómenos de recarga, procesos geoquímicos que se llevan a cabo en el mismo, etc.

Como consecuencia de este desconocimiento generalizado, enormes superficies de la región de la llanura pampeana, que contienen importantísimas reservas de agua subterráneas, son desechadas como fuentes de provisión de agua potable debido a la presencia de Flúor y Arsénico, en guarismos levemente superiores a los permisibles para consumo humano (Ley 1027 Prov. de La Pampa).

Esta realidad pone de manifiesto la importancia que tendría este acuífero, donde de poder gestionarse con un conocimiento adecuado y sobre todo teniendo en cuenta la amplia zona occidental de esta región con características de zona semiárida, se solucionarían grandes problemas de abastecimiento en lugares donde se hacen ingentes esfuerzos para el abastecimiento de pequeñas comunidades.

Estos servicios, gestionados por Cooperativas y/o Municipios en su gran mayoría, generalmente desprotegidos de los organismos estatales de aplicación, carecen de un sustento técnico-científico no solamente en lo que hace a su explotación, sino también en el monitoreo y control de la calidad del recurso, lo que lleva en numerosas ocasiones a la sobreexplotación del recurso o a proveer agua no apta para consumo humano.

También un factor relevante, que contribuye la falta de gestión en esta región, es la anarquía de criterios técnicos que existe en la construcción de las perforaciones, fundamentalmente rurales, donde las mismas se llevan a cabo sin ningún razonamiento hidrogeológico, falta absoluta de conocimiento de la hidrodinámica e hidroquímica y ausencia de la participación de los organismos de aplicación del ámbito provincial. Ello trae como consecuencia que los datos y características de dichas perforaciones y/o

captaciones que obran en poder de los concesionarios del servicio nunca llegan a formar parte de bases de datos oficiales y mucho menos del conocimiento público.

Implementar una propuesta estratégica de gestión es la deuda que se tiene en toda el área, lo que implica la necesidad de estructurar estrategias participativas que posean la cualidad de ser sostenibles en el tiempo y el espacio. Esto sólo puede ser conseguido con la participación de la mayor cantidad de los actores involucrados en estas tareas, fundamentalmente en regiones como esta, subhúmedas y semiáridas.

Es por eso que los estudios del acuífero Pampeano, donde muchos conceptos de la hidrología clásica por sí mismo no pueden explicar por ahora la hidrodinámica del agua subterránea, nos crea un problema aún mayor y nos obliga a un conocimiento regional aún más acabado. Es aquí donde cobra dimensión en la zona de llanura el concepto de región hídrica, concepto que excede el concepto de cuenca hidrogeológica y engloba una serie de elementos característicos de la llanura como divisiones políticas, áreas con agua de características químicas similar, regiones geomorfológicas afines y otras que hacen que el funcionamiento hidráulico de las aguas subterráneas jueguen un papel de suma importancia en la calidad del agua.

Por otra parte, en las llanuras no hay una división de las aguas definida con claridad, lo que complica aún más el establecimiento de un orden hidráulico. Las divisorias, en mucho de los casos, es dinámica y depende de la distribución espacial, magnitud y duración de los eventos de las lluvias. (Usunoff, E; Varni, M; Weinzettel, P y Rivas, R. 1999)

Las pendientes oscilan entre 1/1000 a 1/10000. Las geoformas suaves, la incertidumbre en la recarga y el incremento en los últimos 30 años en los regímenes de lluvia contribuyen a que se hayan elevado los niveles freáticos. En años húmedos, como estos últimos, la precipitación excede la evapotranspiración y como estos excesos no pueden ser drenados por el flujo subsuperficial, el nivel freático se eleva hacia la superficie del terreno donde escurren hacia los bajos que cuando se llenan, producen escurrimientos superficiales.

Este término está poco incorporado en la hidrogeología clásica y en las legislaciones vigentes y, además resistidos por muchas autoridades de aplicación de ámbitos provinciales.

DEMANDA PARA USOS URBANOS

Se engloban en esta categoría los usos domésticos, comerciales, de pequeñas industrias, y públicos o municipales (parques, escuelas, hospitales, etc.).

Se hace necesario mencionar las limitaciones que se han tenido, inherentes a la escasa disponibilidad de datos complementarios a la información brindada por los Censos Nacionales de Población.

Del análisis de los censos de población, se puede deducir que se ha producido en la de población un crecimiento sostenido, presentando picos de desarrollo a la par de las decisiones políticas y económicas que se implementaron en el área. De todas formas estos picos nunca alcanzaron los valores que se preveían para la Provincia en general.

Actualmente la cobertura en el Servicio de Abastecimiento de Agua Potable en la Provincia de la Pampa es del orden del 90%, lo cual significa que unos 270.000 habitantes tienen acceso al agua potable por red pública. Este porcentaje (superior a la media nacional que se ubica por debajo del 80%), es aún más importante si se considera el número de localidades, por cuanto puede decirse que en La Pampa no hay ninguna que no tenga acceso al agua potable, lo que convierte a nuestra provincia en un modelo a nivel nacional en este sentido (Castro et al., 1998).

Sin embargo, también es cierto que algunas localidades no cuentan con una fuente propia de buena calidad, por lo que en esas localidades se cuenta con un sistema de potabilización mediante equipos de ósmosis inversa que abastecen de agua exclusivamente para cocinar y beber, utilizando el agua de red para el resto de los usos.

DOTACIONES

El sistema de dotación para la Provincia de La Pampa está basado en la **ley n° 1027 y decreto n° 193 reglamentario estableciendo el régimen de interés público provincial para asegurar la conservación y uso racional de las fuentes de agua potable**. El mismo en su artículo 14 reglamenta los consumos para las áreas residenciales y propone lo siguiente.

- a) De 9.000 a 18.000 litros/mes, se facturarán los primeros 9.000 litros al costo mínimo y el exceso a un costo incrementado en un 50 % respecto del mínimo.
- b) De 18.000 litros/mes a 30.000 litros/mes, se facturarán los primeros 9.000 litros al costo mínimo, los siguientes 9.000 litros al costo incrementado en un 50 % respecto al mínimo y el exceso a un costo incrementado en un 100 % respecto del mínimo.
- c) Más de 30.000 litros/mes, se facturarán los primeros 9.000 litros al costo mínimo, los siguientes 9.000 litros al costo mínimo incrementado en un 50 % los 12.000 litros siguientes al costo mínimo incrementado en un 100 % y el exceso a un costo incrementado en un 200 % respecto al mínimo.

FORMAS JURÍDICO ECONÓMICAS DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO. LA COOPERATIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS

Hernández Muñoz (1993, 749) describe las distintas formas de gestión de los servicios de abastecimiento de agua potable, encuadrándolas en tres grandes grupos: a) **Gestión directa**: Se presenta cuando un

organismo del Estado, que bien puede ser la administración central, entidades descentralizadas o una empresa pública, realiza la gestión del servicio. En la República Argentina ésta fue originariamente la principal forma de prestación, asumiendo el Estado, la mayoría de las veces el provincial, esta función empresaria, b) **Gestión mixta**: La prestación está a cargo de un organismo donde participa el Estado asociado con particulares; y, c) **Gestión indirecta**: El servicio está a cargo de un ente privado, es hoy probablemente la principal forma de prestación en las grandes ciudades de la República Argentina, como consecuencia del profundo proceso de privatización vivido con posterioridad a la sanción, en 1989, de la Ley de Reforma del Estado.

En el marco de la gestión indirecta, en la República Argentina se presentó un caso especial de organización cuando, en muchas localidades pequeñas, ante la imposibilidad de su atención por el Estado, los vecinos se agrupan como cooperativa de consumidores para auto prestarse el servicio.

Un segundo caso, ocurre cuando el Estado financia o construye la infraestructura necesaria, para posteriormente concederla a una cooperativa de usuarios preexistente, normalmente constituida para la prestación del servicio eléctrico. Es el caso de La Pampa, fomentando inclusive, en algunos casos, la creación de las cooperativas.

La década pasada, caracterizada por una profunda modificación teleológica del Estado que incentivó un agudo proceso privatizador, recibió un notorio impulso la gestión indirecta. A pesar de que en su anexo la Ley de Reforma del Estado preveía una preferencia cooperativa en las privatizaciones de la electricidad, gas, agua y saneamiento, la tónica que se impuso mediante los marcos regulatorios y los pliegos de privatización fue la de las empresas lucrativas. Las cooperativas de usuarios se encontraron en desventaja frente a la potencia del capital lucrativo que, en muchos casos, presenta un origen transnacional. La preferencia legal se transformó en un texto muerto (Balestri, I. A. 1997).

En la ciudad de General Pico, segunda en cantidad de habitantes de la Provincia de La Pampa, se produjo el único proceso privatizador donde la cooperativa de servicios públicos local logró imponer sus condiciones frente a capitales privados, transformándose en la prestadora del servicio, con notorias mejoras frente a la actividad que realizaba el municipio local.

Las cooperativas de usuarios de agua potable o cooperativas de servicios públicos, ya sean específicamente creadas, concesionadas en forma directa o a través de un proceso licitatorio, constituyen un objeto digno de estudio. La hipótesis que sustentamos es que se trata de una alternativa de gestión que ofrece verdaderas ventajas frente a las otras formas enunciadas en párrafos anteriores.

Desde la experiencia de la Cooperativa Eléctrica de Punta Alta (Pcia. de Bs. As) en 1926, pionera de este

tipo de entidades asociativas de usuarios de un servicio público para auto prestárselo, el cooperativismo de servicios públicos ha estado en permanente crecimiento. Iniciado a fines del siglo XIX, el movimiento se consolida en la década del 20 y su origen se encuentra en la lucha por abaratar el costo de electricidad suministrada por empresas extranjeras. Las cooperativas eléctricas se multiplicaron y el movimiento se extendió. Aparecieron cooperativas de teléfonos, de gas, de agua potable, de desagües cloacales, de desagües pluviales y de transporte. Algunas de ellas se transformaron en multiactivas, es decir, prestadoras de más de un servicio de esta naturaleza y, en la búsqueda de escala, también incursionaron por otros negocios (plantas lácteas, comercialización de miel, criaderos de cerdos, salud, etc.).

Las cooperativas de servicios públicos, son sujetos de derecho con todos los alcances de este concepto. El objetivo no es la realización de aportes con el propósito de repartirse las ganancias, sino el organizar y prestar servicios a sus asociados basándose en el esfuerzo propio y la ayuda mutua. Son entidades solidarias que, por el mecanismo de la asociación, procuran obtener un menor precio y una mayor calidad. Su finalidad no es el lucro en la entidad, sino el mayor beneficio en el servicio al asociado.

La cooperativa es intrínsecamente incapaz de producir lucro. Los que obtienen un provecho o una ganancia son los asociados. La misma consiste en un ahorro de gastos o en la eliminación de un quebranto. Esta razón condiciona la existencia de la entidad solidaria, ya que si sus asociados, individualmente o a través de terceros, pueden lograr las mismas ventajas que logran cooperando, no habría necesidad alguna de cooperativa.

Puede ocurrir que la cooperativa obtenga excedentes, pero a través del mecanismo legal del retorno queda garantizada su finalidad de no lucro. El excedente eventual tiene un claro destino, fijado por la propia ley de cooperativas y, cada asociado recibirá la parte que le corresponda según las operaciones que haya realizado. Por dichos motivos se afirma que los usuarios asociados obtienen un precio justo.

Aunque existen desarrollos teóricos interpretando como innecesaria la concesión, en la práctica, todas las prestaciones cooperativas están basadas en este contrato. El mismo está asentado sobre la existencia de tres sujetos bien diferenciados: a) El Estado, supuestamente titular del servicio y tutor del bien común, b) El usuario, cliente o consumidor, destinatario final del servicio, a quien por su carácter general y con frecuencia débil, debe el Estado proteger, y c) El concesionario, a quien el Estado debe autorizar a prestar el servicio con arreglo a determinadas condiciones que eviten el abuso en detrimento del usuario. Es evidente que este enfoque no toma en cuenta las cooperativas, donde los sujetos segundo y tercero son coincidentes y no cabe esperar el abuso por parte de las cooperativas. No obstante, el contrato de concesión es el único utilizado y aparece como un

“arbitrio jurídico adecuado para lograr la prestación del servicio sin que el Estado pierda su carácter de titular.” (Cracogna, 1987, 51).

En Argentina existía consenso en torno a la necesidad de privatizar. La ineficiencia demostrada por las empresas del Estado había llevado a la población hasta el hastío. Una larga propaganda acerca de las ventajas de un cambio profundo en el sistema caló hondo en el inconsciente colectivo. “El pueblo estaba preparado para el cambio. La historia iba a demostrar, sin embargo, que no todos los dirigentes lo estaban. El momento histórico permitía ensayar una transformación que asegurara una participación protagónica de los usuarios a través de mecanismos apropiados, pero lamentablemente esto no fue posible.” (Carello, 1994, 88) “Particularmente coincido en que se perdió una posibilidad histórica de asignar a las cooperativas un papel trascendente en el proceso de transformación. No existió, en rigor, ni voluntad política en el Gobierno para asignárselo, ni el cooperativismo estaba preparado para exigirlo, con otros fundamentos que los doctrinarios y los de su honrosa historia.” (Carello, 1994, 89). Esas fueron las características del proceso de privatizaciones en Argentina, pero no fue la situación de la provincia de La Pampa, donde hubo una única licitación para privatizar servicios de distribución de agua potable y saneamiento urbano adjudicada a la cooperativa de General Pico. En el resto de las localidades, si la prestación no es municipal, el servicio está a cargo de una cooperativa.

DISCUSIÓN

Por todo esto se puede afirmar que, un elemento básico a tener en cuenta es la importancia del agua en la zona de estudio como recurso vital para el mantenimiento de la vida; como recurso económico; como recurso social con implicaciones culturales, recreativas, educativas, etc.; y como recurso polifuncional, por las prestaciones que ofrece a los más diversos sectores productivos. Todo ello verifica la trascendencia de la existencia de un recurso con importantes limitaciones en cantidad y calidad. Así, parece evidente que debiese existir un objetivo global que tienda, por medio de estrategias adecuadas, a la preservación de los recursos hídricos en cantidad y calidad, en términos temporales y espaciales. Luego, ¿por qué esta situación no se tiene en cuenta?

A partir de estos conceptos, la respuesta pasa por variadas causas, como que la población local no percibe claramente los problemas ambientales ligados a la gestión del agua y sus implicaciones. Ello es así porque los fenómenos de degradación del agua en muchas ocasiones son de lenta manifestación física. Asimismo, no existe una difusión importante y continua que se traduzca en una educación ambiental efectiva y eficiente. Además, los recursos hídricos, a no ser que el mercado les asigne una importancia determinante por la existencia de posibilidades de

negocios de alta rentabilidad, no presentan una relevancia que los haga merecedores de la atención de las autoridades. Por último, no existen las adecuadas investigaciones ni las suficientes actuaciones técnicas para detener los procesos de degradación del recurso o incrementar su preservación, en tanto que el único aspecto que tiende a crecer exponencialmente es el de los aprovechamientos. Por lo tanto, es casi imposible hablar de integralidad, cuando cada sector productivo o social hace con el agua lo que mejor le parece o, por lo menos, tiende manifiestamente a defender sus propios intereses. Esto último no debería extrañar, salvo que esa estrategia lleva implícita la degradación de los recursos hídricos, una menor eficiencia de aprovechamiento y un impacto ambiental muy importante. Por lo expuesto se entiende que la importancia de la planificación hidráulica es una realidad conocida que viene cobrando cada vez mayor relevancia por el creciente aumento de demanda para las distintas actividades a que se ve sometida y, que en muchas ocasiones supera la oferta disponible. Esta planificación nos permitirá confeccionar un esquema de ordenación de los recursos teniendo en cuenta los objetivos prefijados.

REFERENCIAS

- Aguilera Klink, F.; Pérez Moriana, E. y Sánchez García, J. 1998. Valoración Ambiental del Agua Subterránea en un Contexto Insular: el caso de Tenerife (Islas Canarias). *Agricultura y Sociedad*, 86, 223-247.
- Balestri, L. A. 1997. La Competitividad de las Cooperativas de Servicios Públicos. Santa Rosa (La Pampa). *Factor Económico*, 7, 99-104.
- Castro, E, Schulz, C. y Mariño, E., 1998. El agua Potable en la provincia de La Pampa. Consecuencias por problemas en Flúor y Arsénico. *Actas de la 2º Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*. Instituto de Geología y Minería. Universidad Nacional de Jujuy. Jujuy. pág.43-55.
- Carello, I. A. 1994. La Experiencia Privatizadora Argentina y las Cooperativas. Intercoop. Buenos Aires. 140 pag.
- Cracogna, D. 1987. Naturaleza y Régimen Jurídico de las Cooperativas de Servicios Públicos. Intercoop. Buenos Aires. 155 pag.
- Hernández Muñoz, A. 1993. Abastecimiento y Distribución de Agua. Paraninfo. Madrid. 793 pag.
- Schulz, C. 1998. La planificación hidrológica como base del código de aguas de la pampa, XVIII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Santa Fe, Argentina.
- Usunoff, E; Varni, M; Weinzettel, P y Rivas, R. 1999. Hidrogeología de Grandes Llanuras: La Pampa Húmeda Argentina, *Boletín Geológico y Minero*, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Pag:47-62. España.

AVANCES EN AGUA Y EDUCACIÓN PARA LAS AMÉRICAS Y EL CARIBE

ADVANCES ON WATER AND EDUCATION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN

Vázquez del Mercado Arribas¹, Rita y Benitez Ferrari, Soledad²

Resumen:

El Programa conjunto UNESCO/WET *Agua y Educación para las Américas y el Caribe* está dirigido a educadores formales y no formales desde nivel preescolar hasta preparatoria. La misión es contribuir con los países de la región en el desarrollo, implementación y evaluación de un programa educativo en materia de agua, a fin de formar niños y jóvenes, mediante una sólida educación para la acción, que contribuya a la gestión integrada y sustentable del agua. El Programa se implementa mediante talleres para educadores basados en una guía educativa, resultado del trabajo de adaptación de un grupo interdisciplinario, que ha considerado diversos programas del Proyecto WET y del Programa Hidrológico Internacional (PHI) para América Latina y el Caribe. La guía facilita la labor educativa, promoviendo la sensibilización, valoración, conocimiento y responsabilidad en el uso del agua. Comprende propuestas didácticas prácticas, entretenidas y creativas agrupadas en tres ejes: Re-conociendo el agua; Agua, vida y salud; y Gestión del agua. A fin de poder extender el Programa en la región, la guía está disponible en español, inglés, francés y portugués. Luego de 4 años de trabajo, se han realizado talleres en: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Guatemala, Jamaica, México, Panamá, Paraguay y Uruguay.

Palabra clave: Educación hídrica, educación ambiental, cultura del agua.

Abstract:

The UNESCO/WET joint programme *Water and Education for the Americas and the Caribbean* is addressed to formal and non-formal educators, from kindergarten to high-school levels. Its mission is to contribute with the countries in the region to develop, implement and assess a water education programme, in order to empower children and youngsters through sound education for action in order to contribute to integrated and sustainable water management. The Programme is implemented through workshops for educators based on an educational guide. The guide is the outcome of the adaptation work performed by an interdisciplinary team, which considered several publications developed by Project WET and by the International Hydrological Programme (IHP) for Latin America and the Caribbean. The guide facilitates the educational work by promoting awareness, appreciation, knowledge and accountability in the use of water. It includes practical, amusing and creative didactic proposals around three axes: Re-connecting with Water; Water, Life and Health, and Water Management. In order to expand the Programme in the region, the guide is available in English, French, Portuguese and Spanish. After 4 years of work, workshops have been held in Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Guatemala, Jamaica, México, Panamá, Paraguay, and Uruguay

Keywords: Water education, environmental education, water culture

INTRODUCCIÓN

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO y la Fundación del Proyecto WET han unido esfuerzos para desarrollar el programa "Agua y Educación para las Américas y el Caribe" dirigido a educadores formales y no formales de América Latina y el Caribe.

El Programa Hidrológico Internacional (PHI) es el programa intergubernamental de cooperación científica de la UNESCO relativo a la investigación, gestión y formación de capacidades en recursos hídricos. Es un instrumento que permite a los Estados Miembros ampliar su conocimiento del ciclo hidrológico, así como incrementar su capacidad de administrar

y explotar sus recursos hídricos. En este marco, la educación, formación y creación de capacidades es uno de los objetivos estratégicos del Programa ya que representa una dimensión clave para el desarrollo como vehículo para propiciar cambios de comportamiento tendientes a promover una sociedad más sostenible en cuanto a viabilidad económica, equidad social y protección del medio ambiente.

La Fundación del Proyecto WET (Educación Hídrica para Maestros, por sus siglas en inglés) es una organización no gubernamental con 20 años de experiencia en el desarrollo de programas educativos. Su misión es formar niños, padres, educadores y comunidades de todo el mundo, facilitando y promo-

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, ritavazquez@gmail.com

² Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) para América Latina y el Caribe (PHI-LAC), phi@unesco.org.uy

Artículo enviado el 07 de diciembre de 2010

Artículo aceptado el 19 de mayo de 2011

viendo la concientización, el aprecio, el conocimiento y la buena administración y cuidado de los recursos hídricos. Ello, a través del desarrollo y diseminación de materiales didácticos que constituyen el soporte de programas educativos a nivel nacional e internacional.

Considerando los objetivos en común y el potencial de cooperación internacional, ambas organizaciones acordaron colaborar en el desarrollo de programas de educación en materia de agua en América Latina y el Caribe, que permitan generar una conducta de valoración y responsabilidad en el uso de los recursos hídricos desde la temprana infancia. Este acuerdo se formalizó mediante la firma de un Memorándum de Entendimiento entre ambas organizaciones en el marco del IV Foro Mundial del Agua celebrado en México en marzo de 2006.

LA EDUCACIÓN AMBIENTAL Y LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Según la Asociación Mundial del Agua, la gestión integrada de los recursos hídricos es “el proceso que promueve el manejo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, a fin de maximizar la resultante económica y el bienestar social, de manera equitativa y sin comprometer la sustentabilidad vital de los ecosistemas” (Saunier y Meganck, 2007). De acuerdo con esta visión, la gestión del agua brinda una oportunidad para que la aplicación integrada de diversos instrumentos, tales como la educación ambiental, pongan en práctica las políticas hídricas que garanticen la sustentabilidad del recurso.

En síntesis, el mayor desafío para los usuarios del agua, los tomadores de decisiones y la sociedad en su conjunto, es encontrar formas efectivas de aprovechamiento de los recursos hídricos para satisfacer las metas sociales y económicas a que aspira una sociedad, lo cual será posible sobre la base de una gestión integrada y sustentable, superando los severos problemas que surgen cuando su manejo es sectorial y fragmentado. En este contexto, la educación en general, y la ambiental en particular, ofrecen la responsabilidad de educar y concientizar a los estudiantes desde edades tempranas con base en este nuevo paradigma.

MARCO PEDAGÓGICO-DIDÁCTICO: ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DESDE UNA VISIÓN GLOBAL E INTEGRADORA

La construcción de nuevos patrones culturales que promuevan una convivencia armónica de la sociedad con su ambiente, y en particular con el agua, requiere de estrategias educativas que brinden desde una temprana edad, el conocimiento acerca de la dinámica de los procesos naturales y sociales que están asociados a su existencia y aprovechamiento. Por tanto, la educación, además de favorecer la adquisición de ciertas competencias básicas vinculadas con

una formación integral humanista y científico-tecnológica, debe basarse en una visión global e integradora de los fenómenos naturales, tecnológicos y socio-culturales que conforman el ambiente. En función de estos conceptos se propone que en la práctica educativa se requiera la consideración de una serie de premisas tales como: transversalidad, interdisciplinariedad, participación y adaptación. Como programa de educación ambiental, Agua y Educación aborda estas premisas.

Transversalidad: La importancia que reviste para la sociedad la concientización sobre el valor del agua como fuente de vida es un tema de enseñanza que no recae en una asignatura específica sino en todas, pues impregna o atraviesa todas las áreas que conforman el currículum educativo. La transversalidad no lleva aparejada la incorporación de nuevos contenidos (conceptuales, procedimentales y actitudinales). Implica, en cambio, la organización de los mismos en torno a un tema de interés, pero sobre todo hace hincapié en la importancia de los contenidos actitudinales (valores, modos y pautas), vinculados indiscutiblemente a una dimensión ética que debe ser revisada y revalorada en función de una comunidad que atienda sus demandas sociales. Esta nueva dimensión fomenta la llamada “hidrosolidaridad”, entendido el concepto como la antítesis del “hidroegoísmo”, o sea, el uso fragmentado y sectorial del agua, mismo que conspira contra los intereses comunes de la sociedad y termina afectando los ecosistemas.

Interdisciplinariedad: Debido a que los saberes constituidos por las disciplinas que conforman el currículum educativo, agrupados de acuerdo con su pertenencia a determinados campos culturales o científicos (ciencias sociales, ciencias naturales, matemáticas, etc.) no brindan por sí mismos respuestas a las relaciones que se establecen en esa parcela de la realidad que se pretende conocer e interpretar, se considera necesario seleccionar estrategias pedagógico-didácticas que favorezcan la integración de los contenidos que cada ciencia aporta. Este enfoque interdisciplinario no debe ser forzado, pues no implica obligatoriamente la incorporación de todas las disciplinas, sino solo de aquellas que de manera significativa brinden los instrumentos y los medios necesarios para el conocimiento de la realidad seleccionada como objeto de estudio.

Participación: Se considera aquí una múltiple dimensión en el criterio de participación. Por un lado se propone la acción docente como hacedora de situaciones educativas acordes con las necesidades e intereses de la realidad en la que está inmersa. Por otro lado, se valora la participación de los estudiantes como actores principales que aprenden a conocer, vivir juntos, hacer y ser. Se incluye además a la familia y a la sociedad como agentes de cooperación en el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Adaptación: Se relaciona con la capacidad de adaptación de las propuestas didácticas que se presentan en la Guía, lo que podrá imprimir un carácter signifi-

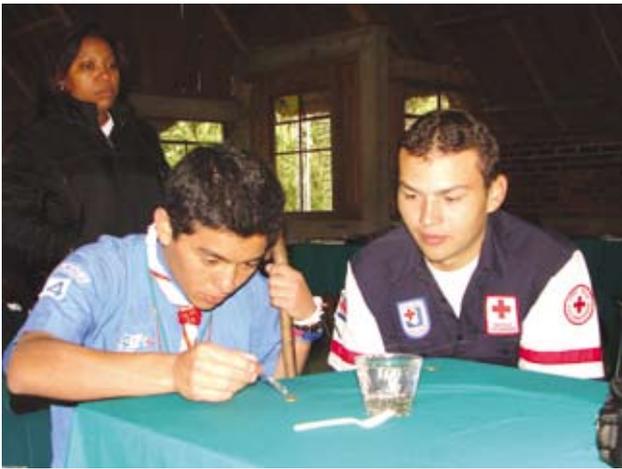


Figura 1. Taller de capacitación para Educadores dirigido a Scouts y Cruz Roja Juventud (Guatemala, agosto de 2007)

cativo a su labor en relación con el proceso de aprendizaje de los estudiantes. Esta capacidad constituye un primer paso para que puedan comprender e intervenir mejor en la realidad en la que viven.

DESARROLLO DEL PROGRAMA CONJUNTO UNESCO-PHI/WET

Como punto de partida, el programa se planteó el objetivo de generar un cambio de conciencia en torno al conocimiento y aprovechamiento sustentable del agua desde la infancia; está diseñado para ser un complemento para docentes de todos los niveles educativos, desde preescolar hasta preparatoria (3 a 18 años) comprendiendo las distintas disciplinas que conforman el currículum educativo.

El primer paso en esta tarea fue desarrollar el material educativo Agua y Educación: Guía General para Docentes de las Américas y el Caribe, que pudiera integrar un conjunto de propuestas didácticas en materia de agua para la región, desarrolladas a partir de diversos programas exitosos. Esta guía constituiría la base del trabajo a ser desarrollado y estaría disponible en español e inglés, a fin de poder ser utilizada en la mayoría de los países de la región. Dichos programas incluyeron al Proyecto WET (Estados Unidos); al programa ¡Encaucemos el Agua! (Proyecto WET-México); a la Serie Descubre una Cuenca (Estados Unidos y México); al Programa Agua y Educación (UNESCO-PHI Argentina); al programa Agua Saludable-Gente Saludable (Estados Unidos y México) y al Programa Gota a Gota (Dirección General de Aguas de Chile). El proceso de selección y adaptación de contenidos fue realizado en 2 instancias que tuvieron lugar en Jiutepec, México, en agosto de 2006 y en Kingston, Jamaica, en junio de 2007, en las que participaron un grupo interdisciplinario de especialistas de los Comités Nacionales del PHI y de la red internacional del Proyecto WET de los siguientes países: México, Argentina, Chile,

Costa Rica, República Dominicana, Jamaica, Santa Lucía y Trinidad y Tobago.

Es importante hacer énfasis en el proceso de adaptación de contenidos del material educativo llevado a cabo por un grupo interdisciplinario de especialistas para la conformación de una guía general para docentes apta para ser utilizada en todos los países de la región, factor fundamental para la pertinencia de un programa de alcance regional. Los criterios fundamentales considerados para la selección y adaptación de los contenidos fueron: que las propuestas didácticas tuvieran un enfoque general relativo a la gestión integrada de los recursos hídricos que permitan ser aplicadas en toda la región, incorporando problemáticas abarcativas y conocimientos fundamentales comunes; utilización de un lenguaje que permita la comprensión de la terminología utilizada en los diversos países; e incorporación de fotografías representativas de la diversidad de paisajes y etnias que se encuentran en la región.

El ejercicio de adaptación que tuvo lugar en México convocó a participantes representativos de las diferentes sub-regiones de habla hispana (América del Sur, Centroamérica, Caribe de habla hispana y América del Norte) y el que se llevó a cabo en Kingston incluyó participantes representativos del Caribe inglés. Como resultado de estas instancias, se seleccionaron y adaptaron las propuestas didácticas a ser incluidas en la guía de acuerdo a los criterios mencionados y también se desarrollaron nuevas propuestas para incorporar temas relevantes, tales como cambio climático y la preservación de arrecifes de coral. La guía propone al docente una metodología basada en dinámicas prácticas que fomentan un mayor aprecio, conocimiento y responsabilidad por los recursos hídricos y que presentan al mismo tiempo una metodología creativa y divertida; a fin de poder generar una mayor conciencia sobre la importancia del cuidado del agua y su manejo sustentable desde la temprana infancia.



Figura 2. Taller de formación para Docentes y Facilitadores (Montevideo, abril de 2008) organizado en conjunto con ANEP-Programa de Segundas Lenguas, empleando la guía en inglés

ENFOQUE METODOLÓGICO PARA LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE DE LOS TEMAS DEL AGUA

La Guía General para Docentes presenta una serie de propuestas didácticas basadas en diferentes métodos de enseñanza que propician el conocimiento de la realidad desde una visión global e integradora; promueven el desarrollo del pensamiento crítico; rescatan la participación activa de los estudiantes; permiten resolver situaciones ficticias o reales de alcance individual o grupal, así como tener contacto con la realidad, el trabajo de campo y la investigación-acción, abordadas de manera lúdica y entretenida. Ellos son: método de proyectos, resolución de problemas, aplicación del método científico, juegos de competencia, memoria, roles, juegos de mesa, etc.

La Guía contiene más de 30 propuestas didácticas agrupadas en 3 grandes ejes temáticos que permiten organizar la enseñanza de los contenidos curriculares en torno al agua en forma integrada. Estos tres ejes temáticos son:

1. Re-conociendo el agua
2. Agua, vida y salud
3. Gestión del agua

El primer eje se centra en la comprensión de las propiedades del agua; en los procesos que forman parte del ciclo hidrológico; las relaciones entre la atmósfera, geósfera, e hidrósfera; y el agua como recurso natural. El nombre se debe a que los estudiantes conocen el agua de manera previa al hecho educativo formal, pero al enfrentarse a las situaciones de enseñanza y aprendizaje escolar profundizan sus conocimientos y la "re-conocen".

El segundo eje busca generar una conciencia sobre el valor del agua como elemento vital para el mante-

nimiento de los ecosistemas y la biodiversidad; la seguridad alimentaria y la salud; los usos del agua en el presente y en el pasado, así como su valor estético, cultural y recreativo.

El tercero se centra en la necesidad de resaltar la importancia de la gestión como un proceso que requiere una participación y compromiso de la sociedad para enfrentar situaciones normales y extraordinarias, considerando un ámbito físico (cuenca o región hídrica) o socio-cultural determinados.

En la guía se incluyen una gran cantidad de referencias complementarias de manera que el docente pueda profundizar aquellos temas de su interés; se enumeran una amplia gama de elementos necesarios para llevar a la práctica las propuestas didácticas, así como también se describe el modo de preparar los materiales antes de comenzar la actividad. Es importante destacar que se promueve que el docente adapte o ajuste los materiales mencionados según sus propios recursos o los de la institución en que trabaja.

IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA AGUA Y EDUCACIÓN PARA LAS AMÉRICAS Y EL CARIBE

Estructura Operativa

En cuanto a la estructura de funcionamiento del Programa, la Unidad Regional de Coordinación (URC) conformada por el Hidrólogo Regional del PHI-LAC, el Director del Proyecto WET, el Coordinador Regional del Programa y un grupo de expertos en educación, definen las líneas de trabajo y orientan al Coordinador Regional en cuanto a las acciones del programa. El Coordinador Regional es un profesional

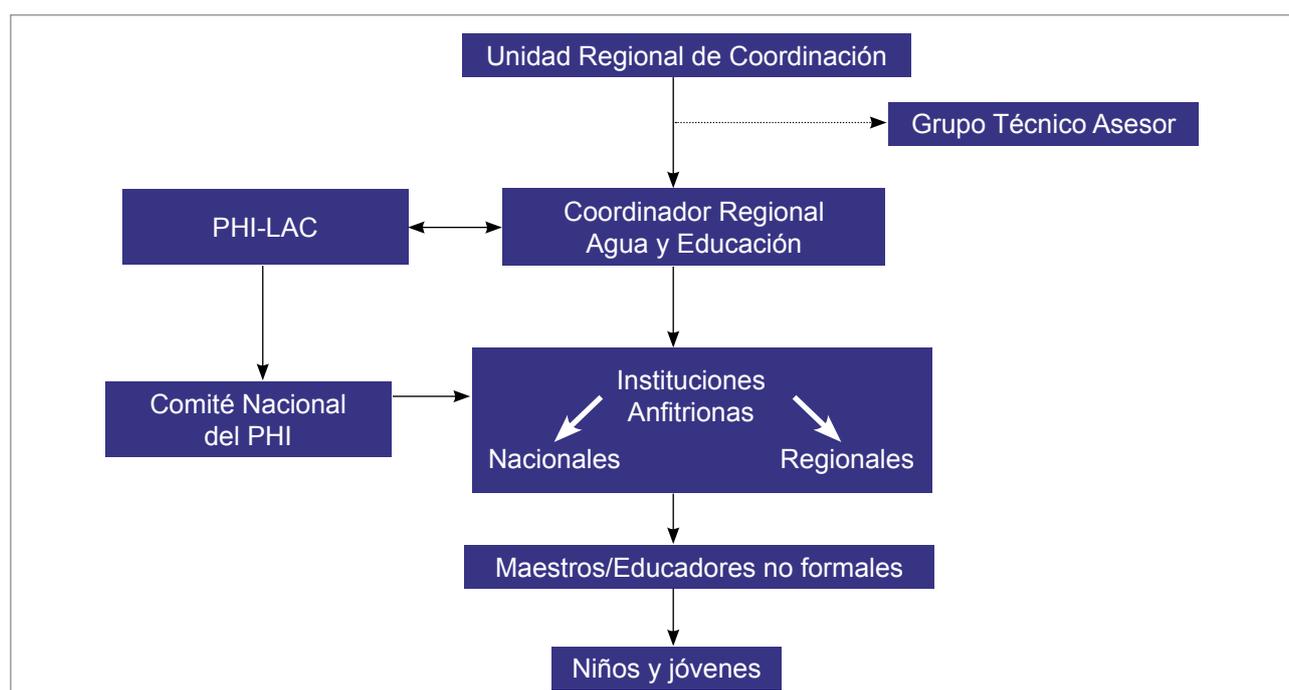


Figura 3. Esquema de la estructura operativa del Programa Agua y Educación

encargado de coordinar, llevar a la acción y supervisar las actividades del Programa Agua y Educación en la región de América Latina y el Caribe en comunicación con el PHI-LAC y el Proyecto WET. Dado el carácter intergubernamental del PHI, el Coordinador Nacional debe ser ratificado por el Comité Nacional o el Punto Focal del PHI.

Rol de las Instituciones Anfitrionas y ejecución del Programa

El Programa se implementa a través de entidades (Instituciones Anfitrionas) de América Latina y el Caribe avaladas por el Comité Nacional o Punto Focal del PHI correspondiente. Estas instituciones albergan y promueven el programa a través de la organización de talleres para maestros y/o educadores no formales, de acuerdo a su ámbito de competencia (comunidad, provincia, estado, país o región). Este esquema permite la participación de diversos tipos de organizaciones interesadas en implementar el programa, que comprenden tanto organizaciones gubernamentales, como no gubernamentales (asociaciones, fundaciones, fondos de educación ambiental), entre otros. El Programa UNESCO/WET Agua y Educación no tiene fines de lucro.

Para adherir al Programa, las entidades interesadas deberán:

1. Contactar al Coordinador Regional para presentar una expresión de interés de ser una Institución Anfitriona del Programa Agua y Educación.
2. Identificar a una persona como punto de contacto principal.
3. Presentar al Coordinador Regional una solicitud formal para iniciar un programa Agua y Educación acompañada de un plan formal de ejecución que será evaluado por la Unidad Regional de Coordinación.
4. Una vez aprobado el plan, suscribir una Carta de Acuerdo con el Programa Agua y Educación.
5. Capacitar a un grupo de facilitadores, encargados de ejecutar el programa mediante la realización de talleres de formación para educadores, de conformidad con los Lineamientos establecidos para ello.

A fin de dar seguimiento al trabajo de las Instituciones Anfitrionas, es importante documentar las actividades realizadas, haciendo hincapié en los éxitos y dificultades encontradas para garantizar la mejora continua del programa Agua y Educación y poder proporcionar un apoyo continuo por parte de la Coordinación Regional. Por ese motivo, se requiere el suministro de informes periódicos y anuales de las actividades realizadas y los avances alcanzados.

El Programa se implementa a través de talleres de capacitación para educadores dirigidos tanto a maestros como a educadores no formales, quienes con-

ducirán dinámicas del programa Agua y Educación con estudiantes. Estos talleres proveen una visión general del programa, con énfasis en la conducción durante el taller de actividades educativas por parte de los participantes, utilizando la Guía General para Educadores de América Latina y el Caribe y otros materiales educativos aprobados por el Programa Agua y Educación, según sea necesario. Por esta razón es un requisito indispensable contar con guías para todos los participantes del taller. Su duración oscila entre 8 y 16 horas, pero pueden ser más prolongados si es necesario.

Asimismo, están previstos talleres de formación de facilitadores dirigidos a futuros capacitadores que facultan a sus participantes a impartir talleres a otros educadores. Son similares a los de capacitación de educadores, pero enfocan temas adicionales como recomendaciones generales para facilitar talleres y la elaboración de agendas y reportes, actividades y Lineamientos del Programa Agua y Educación (incluyendo derechos de propiedad intelectual y reconocimiento). Su duración en general es de 24 horas, pudiendo variar dependiendo del perfil y experiencia de los participantes.

Este sistema permite la expansión del programa no solo a nuevos educadores que incorporan los conocimientos y la metodología del programa, sino también a facilitadores facultados para formar nuevos educadores.

ALCANCES DEL PROGRAMA EN LA REGIÓN

A cinco años de iniciado el programa, la Guía General para Docentes de las Américas y el Caribe está disponible en español, inglés, francés y portugués (las principales cuatro lenguas habladas en América Latina y el Caribe) con el afán de extender el programa en todos los países de la región.

En el caso de México y Argentina, también se cuenta con materiales adicionales, desarrollados o adaptados especialmente para estos países, como es el caso de la Guía Argentina para Docentes, para las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro en Argentina, desarrollada por la Asociación de Amigos de la Patagonia; la elaborada para la cuenca del río Santiago en México, por iniciativa de la Comisión Nacional del Agua y del Consejo de Cuenca del Río Santiago, así como la segunda edición de la guía ¡Encaucemos el agua!, publicada también por la Comisión Nacional del Agua de México.

Actualmente el Programa cuenta con Instituciones Anfitrionas que trabajan activamente en la coordinación del trabajo a nivel país o región. Estas son: Argentina (Fundación Amigos de la Patagonia - AAP), Chile (Dirección General de Aguas - DGA), Centroamérica (Comité Regional de Recursos Hidráulicos - CRRH), México (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA; Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental - FCEA; Organismo de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Naucalpan - OAPAS),

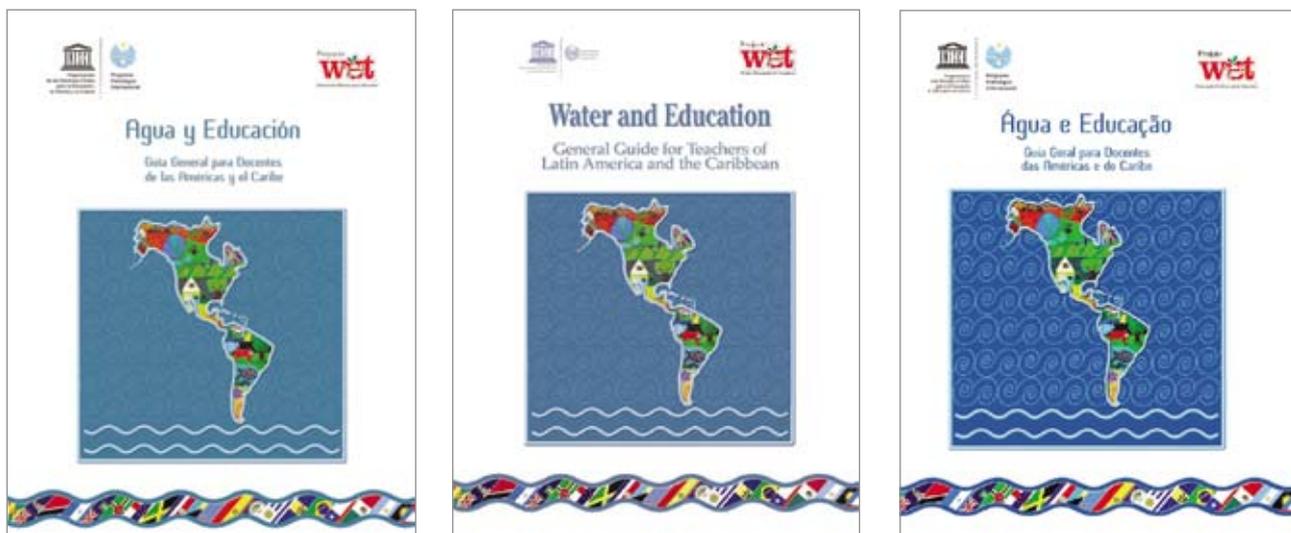


Figura 4. Guías Generales para Docentes de las Américas y el Caribe publicadas

Colombia (Organización para la Educación y Protección Ambiental – OpEPA), Asociación Floripamánha (Brasil) y Jamaica (Autoridad de Recursos Hídricos – WRA por sus siglas en inglés). Se encuentran en proceso solicitudes recibidas por parte de socios potenciales de ITAIPU Binacional (Paraguay y Brasil), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (Colombia), y el Proyecto Mas Río Negro (Uruguay).

Desde 2007 a 2009 se llevaron a cabo 72 talleres para un total de 1.774 maestros y educadores no formales en 8 países: 38 en México, 3 en Jamaica, 4 en Guatemala, 1 en Panamá, 6 en Chile, 13 en Argentina, 5 en Uruguay y 2 en Paraguay. Es relevante destacar la formación de un grupo internacional de facilitadores del Programa provenientes de Costa Rica, Santa Lucía, Jamaica, Brasil, Paraguay, Uruguay, Argentina, Chile, Colombia, México y República Dominicana con el objetivo de generar y fortalecer las capacidades a nivel regional y darle mayor expansión y difusión al Programa. Esta instancia tuvo lugar en un Taller Regional de formación que tuvo lugar en Jiutepec, México, 11-14 de octubre de 2010, con el apoyo de la CONAGUA.

ción y difusión al Programa. Esta instancia tuvo lugar en un Taller Regional de formación que tuvo lugar en Jiutepec, México, 11-14 de octubre de 2010, con el apoyo de la CONAGUA.

Talleres realizados	2007	2008	2009	TOTAL ¹
México	17	12	9	38
Centro América	4	0	1	5
Chile	4	2	0	6
Argentina	2	4	7	13
Uruguay	0	5	0	5
Jamaica	1	1	1	3
Paraguay	0	0	2	2
TOTAL	29	23	20	72

¹ Datos para el año 2010 en proceso.

Figura 6. Talleres impartidos en América Latina y el Caribe



Figura 5. Guía Argentina para Docentes (Parte I), Descubre una cuenca: río Santiago y ¡Encaucemos el agua!

Participantes capacitados	2007	2008	2009	TOTAL ¹
México	493	182	123	798
Centro América	232	0	27	259
Chile	54	56	0	110
Argentina	57	119	254	430
Uruguay	0	81	0	81
Jamaica	19	13	21	53
Paraguay	0	0	43	43
TOTAL	855	451	468	1774

¹ Datos para el año 2010 en proceso.

Figura 7. Participantes capacitados en América Latina y el Caribe

MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL PROGRAMA

El monitoreo y la evaluación son claves para la gestión del Programa, ya que proporcionan información fundamental para evaluar la efectividad de las acciones que se llevan a cabo para el logro de los objetivos y permiten tomar decisiones con relación a la continuidad, ampliación o replanteo de aspectos que permiten mejorar el desempeño.

Tomando como referencia el objetivo amplio de generar conciencia en niños y jóvenes de las Américas y el Caribe acerca de la importancia de una conducta responsable en el uso del agua, se identifican dos instancias de evaluación y monitoreo del impacto del Programa: pertinencia y eficiencia de los talleres de formación impartidos a docentes; e incorporación de la metodología del Programa UNESCO-WET Agua y Educación a las prácticas educativas cotidianas por parte de los docentes.

Pertinencia y eficiencia de los talleres de formación impartidos a docentes

La evaluación in situ y post-talleres permite conocer la eficiencia de las actividades de enseñanza en términos de conocimientos adquiridos y motivación que la metodología genera en los docentes que toman los talleres. Esto es muy relevante porque tiene un efecto directo en la posibilidad de incorporación del Programa por parte de los docentes en sus actividades educativas regulares, y consecuentemente en el éxito de su implementación.

Las diferentes estrategias de evaluación usadas son:

Observación: Los facilitadores observan y analizan la actuación de los participantes durante el desarrollo de las actividades en relación al seguimiento de las directivas, participación, involucramiento, cooperación con sus compañeros, etc.

Producto: Los facilitadores evalúan el producto logrado en un proyecto, por ejemplo: un cálculo, un ex-

perimento, una obra de arte, un poema, la actuación en una obra de teatro, etc.

Comunicación: Los facilitadores perciben las expresiones de los participantes sobre lo que saben a través de la conversación, la escritura o el dibujo.

Demostración de habilidades: Los facilitadores observan las habilidades de los estudiantes mientras desarrollan una actividad.

Evaluación por parte de los participantes: Esta instancia permite conocer la opinión de los participantes que han tomado los talleres en términos de pertinencia de los contenidos y materiales, conocimientos adquiridos, interés pedagógico de la metodología, aplicabilidad de la misma en sus ámbitos educativos, y también recabar información relevante que permite conocer su opinión acerca de las capacidades del facilitador que ha conducido el taller. Con este propósito, todos los talleres de formación son evaluados por los participantes a través de un cuestionario. De acuerdo a las estadísticas, el 98% de los docentes que participan en los talleres de formación del Programa de UNESCO-WET Agua y Educación consideran que la metodología es pertinente, innovadora, útil y fácilmente replicable con niños y jóvenes en sus ámbitos educativos.

Incorporación de la metodología del Programa UNESCO-WET Agua y Educación a las prácticas educativas cotidianas por parte de los docentes

Las Instituciones Anfitrionas mantienen contacto fluido con la Coordinación del Programa, de manera que presentan informes periódicos en los que reportan información de relevancia sobre la implementación del Programa tal como cantidad de talleres impartidos, docentes formados, aplicación de los docentes de las actividades en sus ámbitos educativos. Asimismo, se incentiva a los docentes que han participado en los talleres a enviar sus testimonios y fotografías a la Coordinación del Programa, ya que esto constituye un indicador de primera fuente sobre la eficiencia del Programa en la aplicación de la metodología con niños y jóvenes. Asimismo, está en proceso el lanzamiento de una encuesta en línea dirigida a maestros a fin de obtener mayor información en este sentido.

ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN

A fin de dar a conocer el Programa, es muy importante la participación en conferencias y eventos donde se exponen los contenidos y posibilidades de adherir al programa. En este marco, el Programa Agua y Educación ha participado en diversos eventos de carácter regional y mundial, tales como la Aldea Global del Agua y la Educación y el Foro Mundial del Agua de los Niños, realizados en el marco del IV y V Foros Mundiales del Agua que tuvieron lugar en México (2006) y en Turquía (2009) respectivamente.

También estuvo presente en la Conferencia Regional Agua y Educación para América Latina y el Caribe (Asunción, Paraguay, diciembre de 2008) y en la Conferencia Mundial de Educación para el Desarrollo Sostenible (Bonn, Alemania, marzo de 2009), en el XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Punta del Este, Uruguay, noviembre de 2010) y próximamente en la Conferencia Internacional sobre Educación: Sosteniendo el Planeta Azul, que tendrá lugar en Bozeman, Estados Unidos, septiembre de 2011.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El programa ha tenido una muy buena aceptación por parte de los docentes y educadores no formales que han sido capacitados, quienes lo han evaluado como un programa útil, estimulante, creativo, motivador, con materiales de calidad. Se han emprendido acciones y/o firmado acuerdos con instituciones en Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Guatemala, Haití, Jamaica, México, Panamá, Paraguay y Uruguay. Se han impartido más de 70 talleres y se ha capacitado a casi 1.800 maestros y educadores no formales de la región. La expansión que ha alcanzado el Programa en 4 años, con presencia en más de 10 países de la región se evalúa muy positivamente. El desafío para la nueva etapa será fortalecer el Programa a través de las instituciones con quienes ya se está trabajando y expandirlo hacia nuevos países.

El programa tiene diversas aplicaciones, tanto en el ámbito de la educación formal, desde el nivel pre-escolar hasta preparatoria, como en el ámbito de la educación no formal y comunitaria.

La cooperación internacional y el desarrollo de capacidades tienen un alto potencial para ayudar a mitigar las diversas y graves problemáticas que en materia de agua se enfrentan hoy en día en todos los países del mundo. El programa Agua y Educación para las Américas y el Caribe aspira a fortalecer esos lazos de

cooperación entre los países de la región, buscando crear sinergias y extender las mejores prácticas para una gestión integrada de los recursos hídricos.

El trabajo por hacer es enorme. Para lograr un impacto sensible en la región es preciso educar y capacitar a millones de personas, especialmente a millones de docentes y educadores no formales, que puedan ser el móvil para multiplicar este esfuerzo por producir un cambio generacional que nos acerque a la sustentabilidad hídrica y ambiental.

REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua, Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2011). *¡Encaucemos el agua!* México Comisión Nacional del Agua, Consejo de Cuenca del Río Santiago, Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2011). *Descubre una cuenca: río Santiago*. México.

Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2007). *Agua y Educación: Guía General para Docentes de las Américas y el Caribe*. México.

Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2007). *Agua y Educación: Guía para Docentes en Argentina (Parte I)*. Buenos Aires.

Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2008). *Water and Education: General Guide for Teachers of Latin America and the Caribbean*. Montevideo.

Fundación del Proyecto WET y Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2011). *Água e Educação: Guia Geral para Docentes das Américas e do Caribe*. Brasilia.

Saunier, R. and Meganck, R. (2007). *Dictionary and Introduction to Global Environmental Governance*. London, Earthscan, pág. 164.

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO GRIJALVA: CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN VARIABLE (VIC)

SURFACE HYDROLOGY IN GRIJALVA RIVER BASIN: CALIBRATION OF THE VARIABLE INFILTRATION CAPACITY MODEL (VIC)

Muñoz Arriola, Francisco^{1,2,3}; Salgado Rabadán, Jorge Humberto¹; Marie Rocchiccioli, Heléne ⁴; Shrraddnand Shukla³, Güitrón De los Reyes, Alberto¹ y Lobato Sánchez, René ^{1,5}.

Resumen

Los modelos hidrológicos de superficie terrestre (MHS) fueron inicialmente creados para proveer de condiciones de frontera en la interfaz suelo-atmosfera a los Modelos Globales de Circulación. En su evolución los MHS enriquecieron la información provista por los modelos hidrológicos conceptuales mediante la generación distribuida de variables generales y variables de estado asociadas a los diferentes componentes del ciclo hidrológico en la superficie terrestre. Tanto los modelos hidrológicos conceptuales como los MHS requieren de un proceso de calibración que usualmente es llevado a cabo manualmente. Lo subjetivo de dicha técnica ha permitido el fortaleciendo del uso de las técnicas de calibración automática aplicadas a la modelación hidrológica.

El presente trabajo tiene como objeto: a) implementar las técnicas de calibración automática *Evolución Compleja Multiobjetivo* (MOCOM, por sus siglas en inglés) y *Estimación de Parámetros* (PEST, por sus siglas en inglés) para el uso del MHS de Capacidades de Infiltración Variable acoplado a un modelo de tránsito de avenidas (VIC, por sus siglas en inglés) en la cuenca del río Grijalva; b) evaluar las diferencias entre ambos algoritmos en la generación de parámetros y la simulación de la generación de avenidas; y c) evaluar la sensibilidad de la calibración de parámetros en VIC al periodo de calibración (1950-1954 y 1950-1959) y a la frecuencia del monitoreo.

MOCOM usa dos funciones objetivo (*Nash Sutcliffe Index [NS]* Error del Volumen Anual [EVA], y Diferencia del Promedio de los Picos [DPP]), éstas son optimizadas a partir de las avenidas mensuales simuladas y observadas (ambas no reguladas) en la estación "Las Peñitas", localizada aguas abajo de la presa del mismo nombre. PEST se basa en el uso de una sola función Objetivo NS y su optimización se logra a partir de datos diarios, basado en un número de iteraciones (30). En el caso de PEST se usó el NS, logrando valores de 0.74 y 0.72 para los periodos de 5 y 10 años, respectivamente. Por otro lado, MOCOM, a partir del mismo número de iteraciones logró un NS de 0.73 y 0.53, respectivamente. Además de las 30 iteraciones usadas en PEST MOCOM fue evaluado con 100 iteraciones, usando tres funciones objetivo, lo cual produjo una disminución en el NS. PEST presentó mejores resultados que MOCOM, debido al agrupamiento y trato diferencial espacialmente en los parámetros. Sin embargo, la capacidad de MOCOM de usar más de una función objetivo lo ubica como una opción más integradora. Finalmente, tanto los parámetros obtenidos a través de MOCOM como PEST muestran diferencias mensuales, lo cual denota su habilidad de ambos algoritmos bajo diferentes condiciones de sequía o humedad.

En etapas posteriores a la presente investigación se implementará VIC en otras cuencas de la República Mexicana y se evaluará la respuesta de estas técnicas de calibración.

Palabras clave: Modelos, hidrología, optimización, Grijalva, México.

Abstract

The land surface hydrology models (MHS) were initially created to provide boundary conditions in soil-atmosphere interface to Global Circulation Models. In its evolution The MHS enriched the information provided by the conceptual hydrological models through distributed generation of variables and state variables associated with hydrological cycle on Earth's surface. Both conceptual hydrological models such as MHS require a calibration process is usually carried out manually. Subjectivity of this technique has allowed the strengthening of the use of automatic calibration techniques applied to hydrological modeling.

The present work aims to: a) implement the automatic calibration techniques Multiobjective Complex Evolution (MOCOM, for its acronym in English) and Parameter Estimation (PEST, for its acronym in English) for the use of MHS Variable Infiltration Capacity coupled to a flow routing model (VIC, for its acronym in English) on the Grijalva River basin, and b) assess

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - IMTA, P. Cuauhnáhuac # 8532, CP 62550, Jiutepec, Mor., México, e-mail: fmunoz@ucsd.edu

² Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego.

³ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington

⁴ Consultor externo, Cuernavaca Mor. México

⁵ Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional de Agua..

Artículo enviado el 1º de setiembre de 2010

Artículo aceptado el 18 de mayo de 2011

the sensitivity of the calibration parameters in VIC the calibration period (1950-1954 and 1950-1959) and frequency of monitoring.

MOCOM uses two objective functions (Nash Sutcliffe Index [NS] Error Annual Volume [EVA], and Average Difference Peak [DPP]) optimized from the streams monthly, virgins, simulated and observed at "The Peñitas" located downstream of the dam Las Peñitas. PEST is based on the use of a single objective function (NS) and its optimization is obtained from daily data. Based on the number of iterations (30).

We used the Nash Sutcliffe efficiency indicator Index (NS) in the PEST method was achieved NS 0.74 and 0.72 for periods of 5 and 10 years respectively, while MOCOM, from the same number of iterations achieved NS 0.72 and 0.53, respectively. MOCOM was also evaluated with 100 iterations and using three objective functions, reducing the NS. PEST score better than MOCOM, due to spatial clustering and differential treatment in the parameters. However, MOCOM ability to use more of an objective function which makes it an option most integrated. In later stages of this investigation was implemented VIC in other basins of the Mexican Republic and assess the response of these calibration techniques.

Palabras clave: Models, hydrology, optimization, Grijalva, México.

INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas como la modelación tiene el doble propósito de producir información lo más cercana a la realidad en donde se encuentra ausente e identificar formas para entender mejor los procesos que ocurren en el medio ambiente. Los modelos hidrológicos de superficie terrestre (MHS), por ejemplo, surgen para identificar el papel de la hidrología superficial terrestre a la dinámica de la atmósfera mediante la parametrización de las interacciones atmósfera-tierra en la frontera inferior de los modelos climáticos generales. De manera independiente los MHS continuaron su evolución a través de la simulación de los flujos de agua y energía de la superficie terrestre, creando nuevas perspectivas para mejorar los modelos hidrológicos conceptuales. Al igual que éstos últimos, los MHS requieren de calibración y así ajustar la contribución por parte de la física del modelo a la simulación de los procesos hidrológicos de superficie terrestre. La calibración en ambos tipos de modelos se ha venido desarrollando de manera manual en donde el hidrólogo hace uso de su experiencia para identificar los parámetros que mejor simulan las observaciones de las variables hidrológicas (Nigssen et al. 2001; Liu et al. 2002, Zhu y Lettenmaier, 2007, Munoz-Arriola et al., 2009). Sin embargo, este proceso es subjetivo y tedioso, lo que ha significado el auge y fortalecimiento de las técnicas de calibración automática.

La calibración automática de manera general se encuentra definida por cuatro etapas: a) Función objetivo, b) Calibración de datos, c) Estrategia de ajuste, y d) criterio de terminación. Estos criterios también han dado margen al desarrollo de la calibración automática cuyas componentes pueden ser caracterizadas por la búsqueda de mejores soluciones en un espacio n-dimensional definido por el número de parámetros en cuestión y cuya evaluación se enmarca en el uso de una o más funciones objetivo. Por ejemplo, encontramos métodos como el de la Evolución Compleja por Barajeo de la Universidad de Arizona (SCE-UA, por sus siglas en inglés; Duan et al. 1992,1994) que evolucionó para considerar más de una función objetivo en la técnica de Evolución Compleja Multiobjetivo (MOCOM, por sus siglas en inglés; Yapo et al. 1998). Ambas técnicas usan búsquedas de grupos

de parámetros óptimos conocidas como "en regla" mientras que otra familia de métodos de búsqueda son los basados "en gradientes". De estos últimos, la calibración automática de Estimación de Parámetros (PEST, por sus siglas en inglés) es basada en el método de *Gaus-Marquardt-Levenberg* que combina dos métodos de minimización: Gradientes Descendentes y Gauss-Newton (Doherty, 2001,2002).

Ambas técnicas han sido implementadas para diversos modelos y aplicadas en diferentes regiones del mundo. En territorio Mexicano el MHS de Capacidades de Infiltración Variable (VIC, por sus siglas en inglés) ha sido utilizado a diferentes resoluciones espaciales y diferentes dominios y periodos (Zhu y Lettenmaier, 2007; Munoz-Arriola et al 2008, 2009, Sheffield et al 2010, Tang et al sometido). Sin embargo, la calibración ha sido manual. El presente trabajo representa la primera aplicación de técnicas de calibración automática para VIC en México. Por lo tanto, los objetivos que se persiguen son el de implementar el VIC en la cuenca del río Grijalva y calibrarlo de manera automática. Asimismo, se busca identificar las diferencias en la estimación automática de parámetros mediante dos técnicas diferentes: MOCOM y PEST.

El material del trabajo está organizado en las siguientes secciones. Sección dos describe brevemente el MHS VIC y las técnicas de calibración automática MOCOM y PEST. La sección tres muestra el área de estudio. La sección cuatro muestra los resultados de la calibración y la validación del MHS VIC en la cuenca del río Grijalva. Finalmente la sección cinco resume los principales hallazgos e identifica posibles direcciones en la aplicación y análisis de estas herramientas.

METODOLOGÍA

Tanto los algoritmos MOCOM como PEST han sido aplicados en diferentes áreas alrededor del globo (Vrugt et al. 2003, Kim et al. 2007). Algoritmos que les anteceden o etapas a futuro de ambos visualizan el uso de funciones objetivo sencillo o múltiple para resolver el problema de disminución en la distancia entre simulaciones y observaciones. En este caso usamos la técnica MOCOM (multi-objetivo) y PEST (con una función objetivo sencilla) para evaluar su

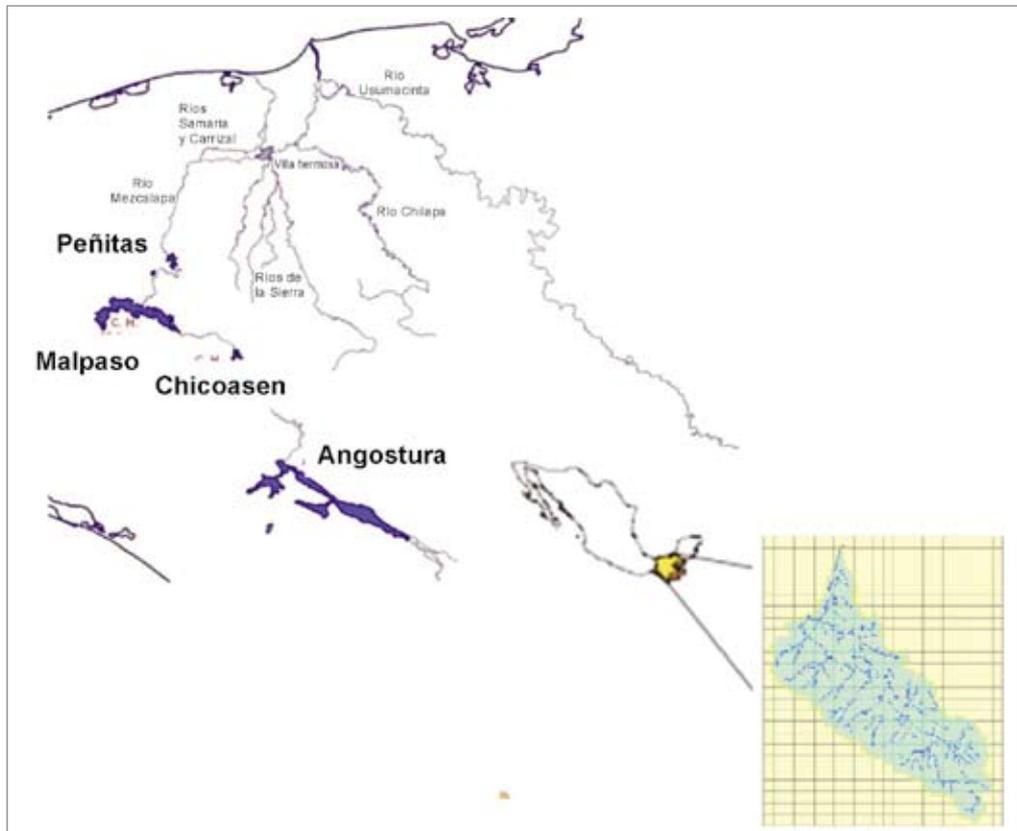


Figura 1. Área de estudio (obtenida de WMO-GWP, 2006).

aplicabilidad en la cuenca del Río Grijalva, en el Sur de la República Mexicana (Figura 1). Asimismo, se busca identificar la pertinencia de ambas técnicas en dos ventanas de tiempo de calibración (4 y 10 años), evaluando los cambios en los parámetros obtenidos después de haber optimizado las respectivas funciones objetivo. Con base en lo anterior: a) Se evaluó el modelo de Capacidades de infiltración Variable (VIC, por sus siglas en inglés) en la cuenca del Río Grijalva a $1/8^{\text{vo}}$ de grado para ser acoplado al algoritmo de MOCOM y PEST y b) Se corrieron ambos algoritmos en dos ventanas de tiempo, y 30 y 100 iteraciones (en el caso de MOCOM) y 30 iteraciones (en el caso de PEST). A continuación se describirá el modelo VIC y los fundamentos de los algoritmos MOCOM y PEST.

Modelo VIC

VIC es un modelo hidrológico semi-distribuido de superficie terrestre a macro escala que determina el balance energético y de agua en la superficie terrestre (Liang et al 1994, 1996). Está compuesto de cuatro capas, tres de las cuales son de suelo a través de las cuales el intercambio de humedad verticalmente se lleva a cabo por gravedad y difusión (Figura 2). El estado de la humedad del suelo o almacenamiento en las tres capas se define mediante una función exponencial que determina la distribución de las capacidades de infiltración a nivel sub-celda

en las capas superiores de suelo. En la capa inferior se usa el modelo ARNO que determina la linealidad en la generación del flujo base como respuesta al nivel de saturación de humedad del suelo. La evapotranspiración está compuesta de tres elementos: evaporación de suelo y de la superficie arbórea, y la transpiración. Esta variable permite unir los balances energético y de energía mediante el modelo de *Penman-Monteith*. En dicho balance, la temperatura superficial es calculada iterativamente toda vez que en pasos previos se determina los componentes radiactivos del sistema.

Tanto el balance de masa como el energético se llevan a cabo a nivel celda. El tamaño de la celda para este trabajo es de $1/8^{\text{vo}}$ de grado ($12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$). VIC es forzado por datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, y velocidad de viento. Las tres primeras variables son obtenidas de datos generados por el Servicio Meteorológico Nacional, a través de las bases de datos CLICOM y ERIC II. Existen más de 6000 estaciones meteorológicas que en algún momento entre 1925 y 2008 funcionaron. La información puesta en formato malla mediante la técnica de SYMAP. La velocidad de viento, proveniente del análisis global, es re escalada mediante la misma técnica a la resolución deseada. La información fisiográfica fue obtenida del mapa global de suelos de la FAO y de la red de cobertura global de usos de suelo de la Universidad de Maryland obtenidos del sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution*

Radiometer) con resolución a un km. Tanto los forzantes como los parámetros usados por VIC fueron desarrollados y actualizados en la Universidad de Washington (Zhu y Lettenmaier, 2007; Munoz-Arriola et al 2008, 2009).

VIC opera con tres bases de datos conteniendo parámetros físicos del suelo, la vegetación y nieve. Las salidas del modelo son en el mismo formato de malla a 1/8 de grado y contienen series de tiempo de variables y variables de estado, tales como escurrimiento, flujo base, evapotranspiración, humedad de suelo, equivalente de agua de nieve, temperatura superficial, entre otras. El escurrimiento y el flujo base son usados por un modelo de tránsito de avenidas (ROUT), que une horizontalmente las celdas (existe una sola salida de cada una de las celdas) para generar las avenidas, en nuestro caso son simuladas en la estación "Las Peñitas". El modelo en la cuenca del Río Grijalva corre un total de 258 celdas y una corrida histórica de 50 años puede ser simulada en el modo de Balance de Agua en menos de dos horas. Usualmente la calibración manual se hace mediante la modificación de 6 parámetros que se encuentran en el archivo de parámetros de suelo: profundidad de las capas de suelo (D1, D2 y D3, respectivamente), parámetro de infiltración (b_{infr}), humedad máxima velocidad del flujo base (Ds_{max}), fracción no lineal de Ds_{max} (D_s), fracción no lineal del máximo de humedad de suelo (W_s). No obstante Zhu y Lettenmaier, Munoz-Arriola et al 2008 y 2009 y Sheffield et al 2010 han usado el modelo VIC a escala nacional y en algunas cuencas mayores como la del Río Yaqui, este es el primer estudio publicado en el que se plantea el uso de la calibración automática con MOCOM y PEST en México.

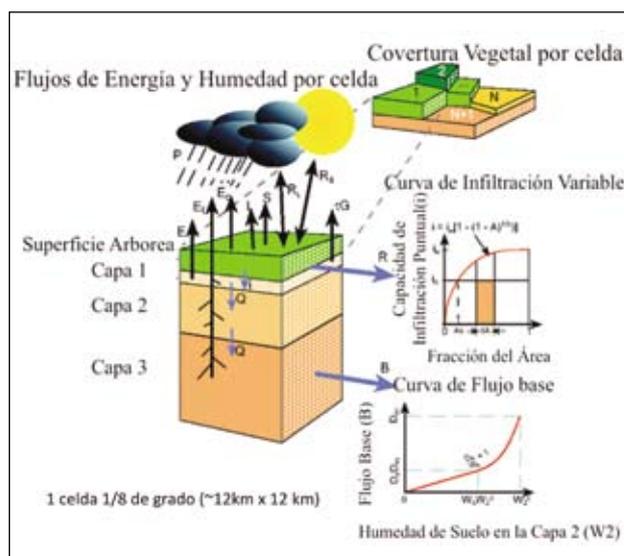


Figura 2. Esquema del Modelo de Capacidades de Infiltración Variable (VIC, obtenido de <http://www.hydro.washington.edu/>).

MOCOM

MOCOM es un algoritmo de calibración automática que aplica una serie de funciones objetivo para resolver un problema de modificación de parámetros basado en una técnica de optimización y así aproximar la simulación de una variable o variable de estado a sus respectivas observaciones (Yapo et al. 1998).

$$\text{minimiza } F(\theta) = \{f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)\} \text{ con respecto } \theta,$$

donde $f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)$ representan las n funciones objetivo. MOCOM ha sido usado en la optimización de parámetros de modelos hidrológicos distribuidos como el SAC (Yapo et al. 1998 y Vrugt et al. 2003), SWAT (Naumov, 2005) TOPKAPI (Liu, et al. 2002), VIC (Bohn et al. 2010) entre otros. A continuación elaboramos una síntesis del proceso que se encuentra ampliamente descrito en Yapo et al. (1998):

a). **Organización por rangos de los diferentes grupos de parámetros elegidos al azar.** En este caso se eligieron 30 y 100 simulaciones que responden a la modificación aleatoria de 6 parámetros o dimensiones. Estas definen el universo inicial de soluciones (simulaciones provenientes de un grupo de parámetros que a partir de aquí se les llamará punto) algunas de las cuales conforman el grupo de soluciones óptimas o Pareto. Para definir la efectividad de una solución se usan funciones objetivo, que permiten evaluar la semejanza entre observaciones y simulaciones. Entre estas se usa el índice de eficiencia NS, el valor absoluto del error del volumen anual (EVA), y el NS del logaritmo natural de los flujos (NSNL). El Pareto puede ser conformado por el número de puntos definidos por el usuario que para el presente trabajo fue de 12 y 25.

b). **Asignación de grado y organización de los puntos.** La asignación de grado se logra con el "Pareto Ranking" que elige a todos aquellos puntos del universo de soluciones que son no-dominados (o que se encuentran en la misma frontera del Pareto) asignándoles el rango 1; del grupo restante se eligen aquellos que ahora son no-dominados y se les otorga el rango 2, y así sucesivamente hasta agrupar el total de los puntos. Estos puntos ahora están escalados y organizados.

c). **Formación de los "simplex" y su clasificación.** Una vez escalada las soluciones éstas son reagrupadas mediante una técnica de Evolución Compleja Multiobjetivo, la cual usa una distribución triangular de probabilidad para seleccionar los puntos Padres. Estos puntos padre se conforman en grupos de más de dos posibles soluciones conteniendo un punto con el más alto rango y uno de los peores puntos, (el resto de los puntos son elegidos al azar). Asimismo, la formación de los "simplex" también coadyuva a que los mejores padres sean más proclives a generar una descendencia más exitosa o genere simulaciones que reproduzcan mejor los datos observados.

d) **Generación de nuevas soluciones y sustitución de los peores puntos.** Cada simplex evoluciona de manera independiente, generando un nuevo punto. Este punto sustituye al peor de los puntos en el simplex mediante una técnica Multiobjetivo denominada "Down-hill Simplex Evolution". En este caso la generación de un nuevo punto responde a la ubicación en el espacio n -dimensional de un punto intermedio entre el peor y el mejor de los puntos. Bajo dos criterios que operan en la ecuación 1, reflexión y contracción, se definen dos posibles soluciones, de las cuales es elegida aquella que sea no-dominante. Se inspecciona inicialmente la reflexión con un g de 2 y si ésta es no-dominada se elige, caso contrario se utiliza la contracción con un g de 0.5. Como resultado de este proceso se sustituyen los peores puntos en cada simplex y un nuevo universo de soluciones es generado.

Lo anterior indica que el proceso se reinicia nuevamente y los pasos anterior mente mencionados continúan hasta que todas las posibles soluciones tengan un rango de 1, generando así el óptimo.

PEST

Al igual que MOCOM, PEST busca reducir la brecha entre las simulaciones y las observaciones mediante la modificación automática de los parámetros presentes en modelos como VIC. PEST usa una variante del método Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) que reduce la suma del cuadrado de los errores entre la función (que no es lineal con los parámetros) y las observaciones, mejorando los valores de parámetros (Gavin, 2011). Una representación de este procedimiento es la reducción de Chi cuadrada, lograda de manera iterativa perturbando (h) los parámetros (p). La reducción de los mínimos cuadrados del error en GML ocurre de dos formas: a) encontrando el mínimo del cuadrático en la componente Gauss-Newton o b) actualizando los parámetros hacia la dirección de máxima reducción de los mínimos cuadrados en la componente Gradiente.

El método de Gradiente está representado por,

$$h_{gd} = a J^T W (y - \hat{y})$$

donde a determina la magnitud del paso de máxima

reducción, $\bar{J} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial P}$ es la matriz Jacobiana, y es la medición del error, \hat{y} es la función de los parámetros del modelo p , y W es la matriz ponderada.

El método Gauss-Newton está representado por,

$$[J^T W J] h_{gn} = J^T W (y - \hat{y})$$

donde $J^T W J$ es el Hessian del criterio de ajuste de la Chi-cuadrada.

Ambas componentes (Gradiente y Gauss-Newton) interactúan de la siguiente manera,

$$[J^T W J + \lambda] h_{im} = J^T W (y - \hat{y})$$

donde el un valor bajo del parámetro λ es proclive a realizar una actualización mediante el método Gauss-Newton y un valor de λ alto resulta en una actualización por el método de Gradiente. Lo anterior también se refleja en la aplicación de Gauss-Newton cuando los parámetros están más cercanos al valor óptimo produciendo una convergencia más rápida con respecto al método de Gradiente. De manera práctica, si la función objetivo disminuye después de esa primera optimización con este valor de λ , PEST sigue bajando el valor de λ . En el otro caso, PEST lo aumenta. PEST prueba entre 1 y 4 λ s en la primera iteración. Durante cualquier iteración de la optimización, PEST puede calcular un vector de actualización de parámetros usando varias λ s diferentes. PEST tiene varios criterios definidos por el usuario (5 parámetros) que le ayuden a variar ese parámetro y poder pasar a otra iteración.

Implementando las Calibraciones Automáticas en el modelo VIC

Ambos algoritmos tienen la capacidad de correr prácticamente cualquier modelo al que se le puedan modificar los parámetros que definen su física y evaluar las salidas con respecto a observaciones. Para el caso de VIC-MOCOM se modificaron los parámetros mencionados en la sección 2.1. Las funciones objetivo fueron el NS, EVA Y NSNL que evaluaron las simulaciones de las avenidas contra observaciones de flujos no regulados en la estación Peñitas. Las avenidas simuladas provienen del acoplamiento del VIC-ROUT tanto para MOCOM como para PEST. Se corrieron dos ventanas de tiempo en las que a su vez se evaluaron dos series de iteraciones (30 y 100). El Pareto o número de soluciones se estableció en 12 y 25 y a partir de dicho número se buscó una solución única basada en los mejores resultados de las funciones objetivo asociadas.

En el caso de PEST la función objetivo fue el NS y los parámetros a evaluar fueron el coeficiente de infiltración (b_{inf}), y las profundidades de cada capa de suelo ($D1$, $D2$ y $D3$). El archivo de suelos tiene 57 parámetros, y en el caso que nos ocupa (cuenca del río Grijalva) se tienen 258 celdas. Si se requiriera optimizar cuatro parámetros para cada celda serían 1032 parámetros, demasiados para el procesarlos con PEST. Por tal motivo se hicieron agrupaciones de celdas con criterio de variación espacial en función de la topografía prevalente en las celdas.

- Grupo 1 para las celdas con altura de 0 a 479 m
- Grupo 2 para las celdas con altura de 480 a 959 m
- Grupo 3 para las celdas con altura de 960 a 1439 m
- Grupo 4 para las celdas con altura de 1440 a 1919 m
- Grupo 5 para las celdas con altura superior a 1920m

De esta manera se optimizan 20 parámetros, cuatro para cada grupo.

En el caso de VIC-MOCOM se usaron salidas mensuales, mientras que VIC-PEST usa salidas diarias.

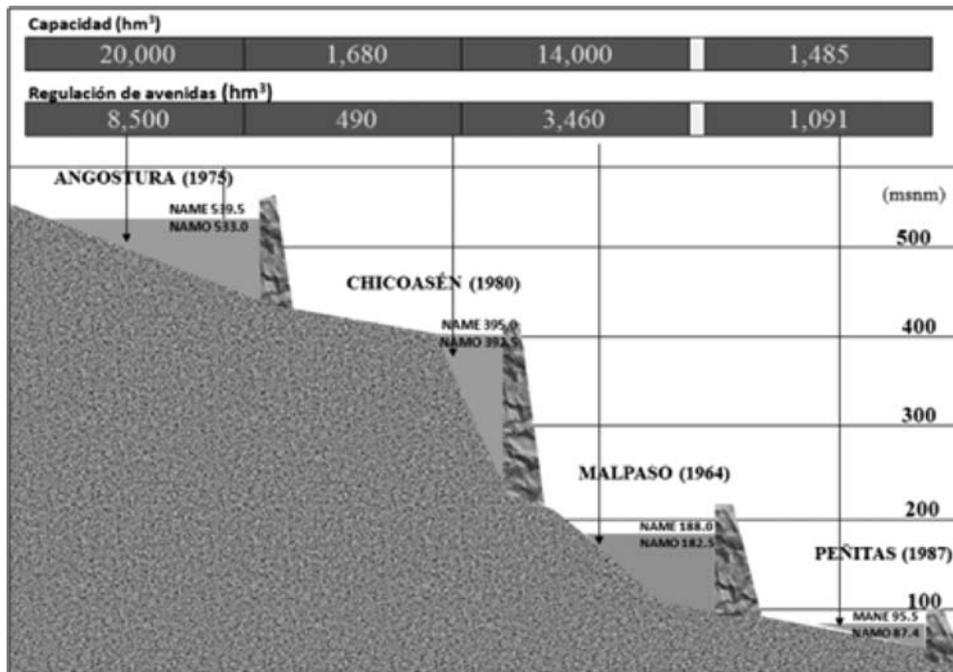


Figura 3. Diagrama esquemático del Sistema de presas del río Grijalva

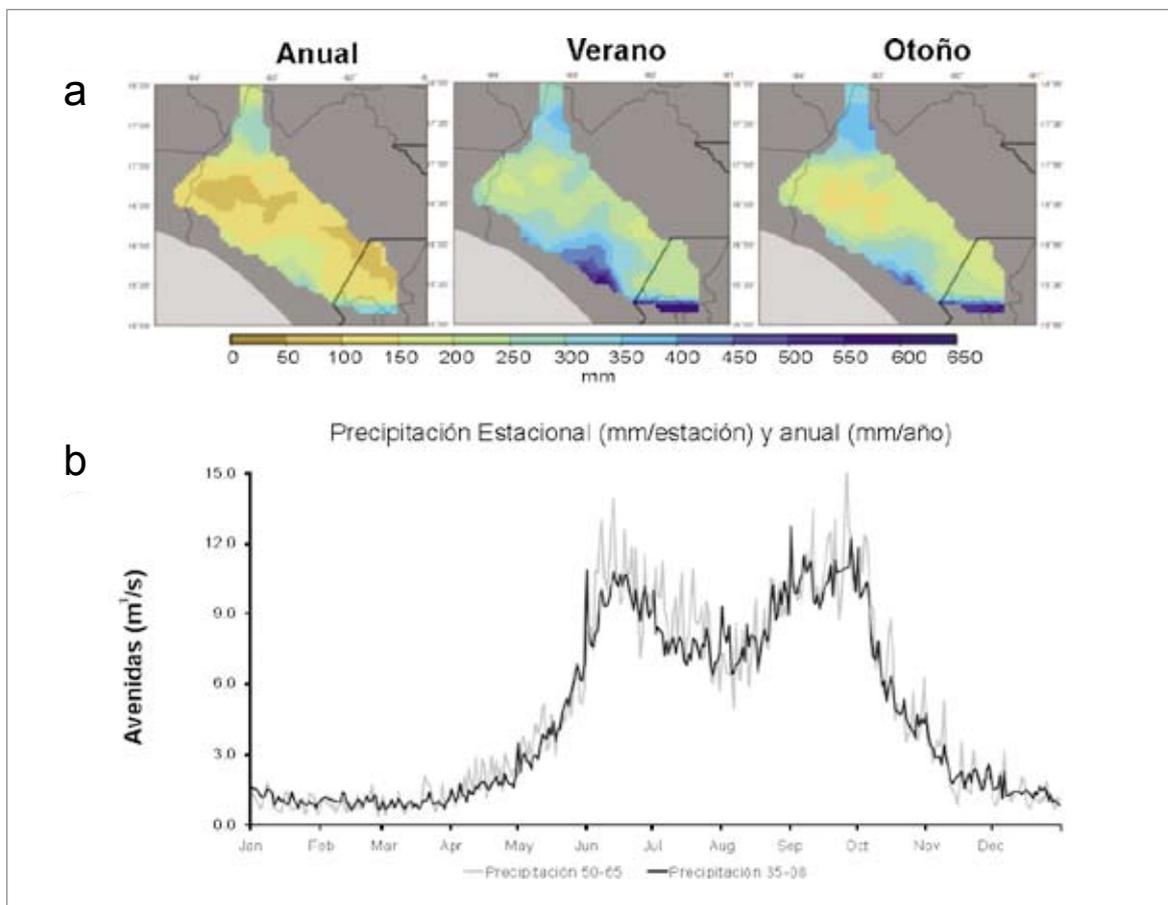


Figura 4. Precipitación histórica (1935-2008) en la Cuenca del Río Grijalva. a) Distribución espacial de la precipitación anual y estacional (verano y otoño); b) variabilidad temporal de la precipitación diaria-histórica obtenida a partir de las series de tiempo para la calibración (1950-1965, usada en la calibración) y la histórica (1935-2008; Muñoz-Arriola et al. por someterse).

La comparación de ambos procedimientos se hace con resultados diarios y se usa el NS para llevar a cabo dicha contrastación. La tabla I muestra los valores iniciales de los parámetros por grupo para el caso de PEST y la Figura 3 ilustra la simulación histórica de avenidas tomando los parámetros iniciales.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de los ríos Grijalva–Usumacinta se encuentra en la parte Sureste de la República Mexicana, Tamayo (1949) hace una amplia descripción de lo que llama los ríos Chiapaneco-Tabasqueños. En nuestro caso le denominaremos Sistema Grijalva-Usumacinta (SGU), que está compuesta por cuatro subcuencas principales: río Grijalva, ríos de la Sierra, río Chilapa y río Usumacinta. En este trabajo nos concentraremos en la cuenca del río Grijalva (RG), este se extiende a lo largo de la porción occidental del SGU desde Guatemala hasta una de sus desembocaduras en la costa Tabasqueña, se ubica entre las longitudes 89.6° a 94.5° Oeste y las latitudes 15.3° a 18.7° Norte. Con un área superior a los 40 000 km² la estación “Las Peñitas” localizada aguas abajo de la presa Peñitas. En esta cuenca se produce el 10 % de la demanda de energía eléctrica del país, mediante cuatro presas: Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas (Figura 3).

La presa Peñitas funge como el punto de evaluación de la CRG. Este punto remarca una atención particular debido al papel que ha jugado en el análisis de los problemas de inundación de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Aguas debajo de la presa Peñitas se encuentra la bifurcación de los ríos Mezcalapa y Samaria. Este punto además define lo que históricamente ha mostrado el reclamo natural del río Grijalva de los flujos naturales en la zona baja de la cuenca del río Mezcalapa. Este reclamo natural de las aguas del río Mezcalapa da pie a la formación del sistema fluvial Tabasqueño en la porción Occidental al producir una salida natural hacia el río Samaria y el flujo ya establecido hacia el río Carrizal. La cuenca del

RG registra las precipitaciones anuales más elevadas del país con cerca de 4000 mm. Espacialmente, la distribución de la precipitación se concentra en las porciones sur-oeste y sur (en territorio Guatemalteco) de la cuenca. La figura 4 (superior) se logra a partir del promedio histórico obtenido de la base de datos de precipitación Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). A pesar de la falta de pluviómetros en territorio Guatemalteco, el resto de la cuenca está fehacientemente representado en la base de datos usada en el presente artículo y desarrollada por Muñoz-Arriola et al (por someterse). La parte baja de la cuenca, también presenta valores altos de precipitación en la representación anual de la precipitación, equiparándose a la precipitación en las porciones altas de la cuenca durante la temporada de lluvias. La variabilidad temporal de la precipitación tiene una distribución bimodal, caracterizada por dos picos entre los meses de Junio-Julio y Septiembre-Octubre con un periodo claro de sequía interestival (Figura 4). La precipitación se concentra en el verano y el otoño, y está asociada a la época de huracanes tanto del Pacífico como del Golfo de México. Muñoz-Arriola et al (por someterse) identifican eventos provenientes tanto del Golfo de México como del Pacífico como causantes de inundaciones en la parte baja de la CRG. En el mismo artículo los autores identifican una predominancia de los eventos de inundación (basados en registros de impactos sobre la población) en este segundo periodo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 y la Figura 4 muestran los parámetros iniciales y la simulación de avenidas previas al proceso de calibración. Los parámetros fueron producidos en la Universidad de Washington (Zhu y Lettenmaier, 2007) como producto de una calibración manual en 15 diferentes semi-cuencas en México, suponiendo la ausencia de regulaciones (presas o extracciones mayores para la actividad agrícola). Ciertamente lo desarrollado por Zhu y Lettenmaier (2007) y más

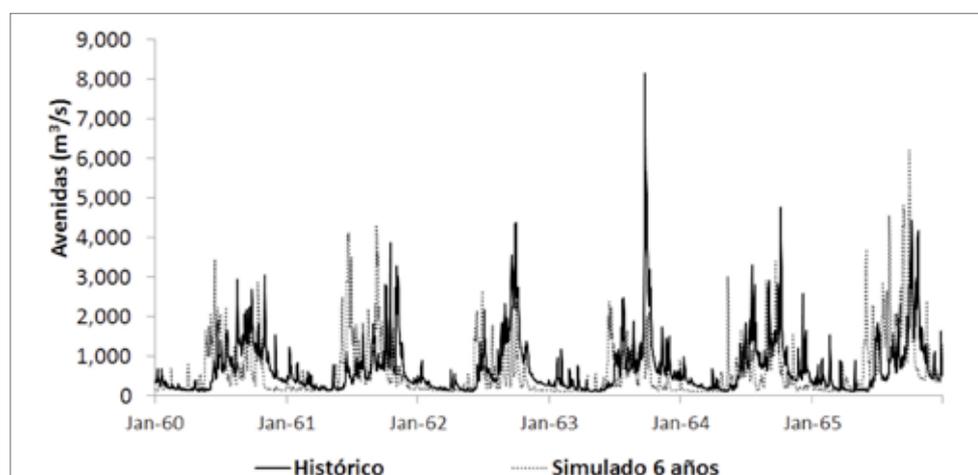


Figura 5. Simulación de seis años antes de la optimización, con un NS de -1.37

tarde Muñoz-Arriola et al (2008 y 2009) potenciaron el uso de la modelación hidrológica de superficie en México, principalmente el uso de VIC; sin embargo, las simulaciones de las avenidas entre 1950-1965 en la Figura 5 y el correspondiente índice NS de -1.37 dan muestra de la necesidad de llevar a cabo un nuevo proceso de calibración que involucre el uso de técnicas automáticas.

Tabla 1. Valores de los parámetros previos a la calibración (el índice NS es de -1.37).

	bi	D2	D3
Cuenca	0.083	0.568	0.597
Grupo1	0.001	0.244	0.385
Grupo2	0.045	0.871	0.850
Grupo3	0.105	0.514	0.482
Grupo4	0.099	0.462	0.784
Grupo5	0.164	0.751	0.487

En todo tipo de calibración uno de los problemas principales es la existencia de registros históricos de avenidas o de alguna otra variable o variable de estado para llevar a cabo las comparaciones entre simulaciones y observaciones. En el caso del presente estudio, los registros de flujos no regulados para una calibración manual o automática son indispensables.

Por esta razón los periodos de calibración utilizados en el presente trabajo son en la década de los años cincuenta. Una suposición en este proceso es que los cambios en la cuenca (uso de suelo o relieve) desde los años cincuenta hasta la fecha tienen un impacto mínimo en las simulaciones. De esta manera las observaciones de las avenidas junto con la física de los modelos y los forzantes del modelo son los factores que contribuyen a la incertidumbre en las simulaciones. En este contexto, la Tabla 2 y la Figura 6 integran los principales resultados de esta serie de experimentos. De manera general se observa que el periodo 50-54 ambos algoritmos producen resultados semejantes en el parámetro b_i . Muñoz-Arriola et al. (2009) menciona que dicho parámetro es uno de los más sensibles en el proceso de calibración manual en la cuenca del Río Yaqui (cuenca ~70000km²). En el caso de la Cuenca del Río Grijalva también las profundidades de las capas de suelo 2 y 3 parecen ser los responsables de los principales cambios en la generación de avenidas en la estación Peñitas. Ciertamente la hidrología de una región árida como el Yaqui (precipitación entre 100 y 900mm/año) difiere de la hidrología de una región como la cuenca del Río Grijalva (precipitación > 1000mm/año) en donde la humedad en los diferentes componentes del ciclo hidrológico es mayor. Esta es una posible razón por la que la profundidad del suelo en las capas 2 y 3 muestra un cambio sustantivo (>90%) toda vez que una mayor acumulación de humedad en el suelo

Tabla 2. Muestra los valores de los parámetros después de la calibración. El código de la primer columna es el siguiente: M=MOCOM, P=PEST, periodo de calibración (50-54 y 50-59), número de réplicas, número de soluciones (Pareto), y número de funciones objetivo. En el caso de PEST se observa el promedio de los parámetros resultantes y los valores correspondientes a cada grupo (para identificar los grupos ver sección 2.3).

	bi	Ds	Ws	D2	D3	Dsmax	NS	EVAL	LN-NS
M 50 - 54-100-25-3	0.20	0.04	0.32	0.91	2.39	11.82	0.71	132.7	0.78
M-P 50 - 54-100-25-3	0.19	0.12	0.71	0.85	1.98	9.45	0.71	1097.4	0.78
P 50 - 54	0.18	--	--	1.04	1.65	--	0.73	--	--
Grupo1	0.07	--	--	0.39	0.50	--	--	--	--
Grupo2	0.14	--	--	3.00	1.14	--	--	--	--
Grupo3	0.48	--	--	0.37	1.01	--	--	--	--
Grupo4	0.13	--	--	0.57	3.00	--	--	--	--
Grupo5	0.07	--	--	0.85	2.62	--	--	--	--
M_ 50 - 59-100-25-3	0.11	0.05	0.48	0.82	2.40	8.12	0.54	183.8	0.66
M-P 50 - 59-100-25-3	0.06	0.05	0.63	0.97	2.44	6.37	0.53	98.1	0.66
P 50 - 59	0.05	--	--	1.10	1.44	--	0.72	--	--
Grupo1	0.01	--	--	0.43	0.41	--	--	--	--
Grupo2	0.02	--	--	0.25	2.30	--	--	--	--
Grupo3	0.04	--	--	0.79	0.70	--	--	--	--
Grupo4	0.11	--	--	1.69	1.63	--	--	--	--
Grupo5	0.07	--	--	2.30	2.15	--	--	--	--

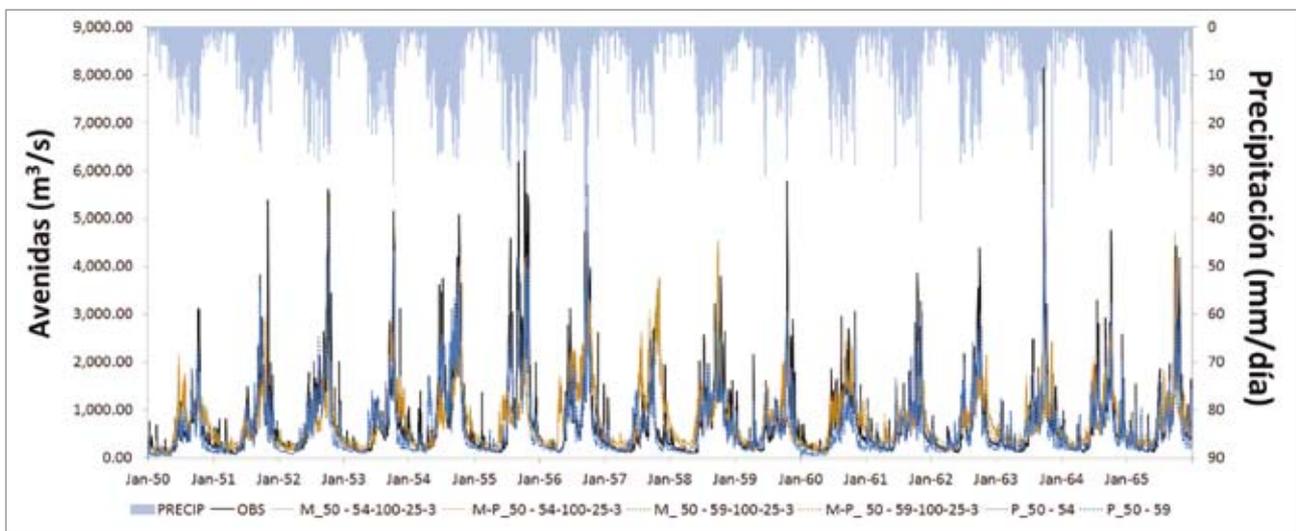


Figura 6. Avenidas en la estación Peñitas y Precipitación (mm/día) en el área de drenaje respectiva durante el periodo de calibración (1950-1954 y 1950-1959) y validación (1960-1965). Las especificaciones de las leyendas se encuentran en el encabezado de la Tabla II.

afecta positivamente la generación del flujo base y el escurrimiento. En zonas húmedas, como la CRG (figura 7) se observa como la variabilidad temporal de la humedad de suelo total (suma de la humedad de suelo en las tres capas) está relacionada directamente con el escurrimiento. Aquí la Evapotranspiración (ET), que presenta los mayores valores durante el primer pico de precipitación de la temporada de lluvias producto de la fenología misma de la vegetación y de su interdependencia con la variabilidad climática, contribuye inicialmente a la reducción de escurrimiento. Esta relación se encuentra más mar-

cada en zonas áridas, en las que la humedad de suelo siempre es un factor limitante para el reverdecimiento de la vegetación y su eventual impacto en el incremento en la Evapotranspiración (ET) y reducción del escurrimiento (Tang et al. sometido). Durante la segunda etapa de la temporada de lluvias, después de que la vegetación se ve afectada por la sequía interestival (Magaña et al. 1997), la humedad de suelo deja de ser un factor limitante para la productividad primaria (Tang et al. sometido) lo cual genera una ligera disminución en la ET y consecuentemente la variabilidad temporal en el escurrimiento y flujo base

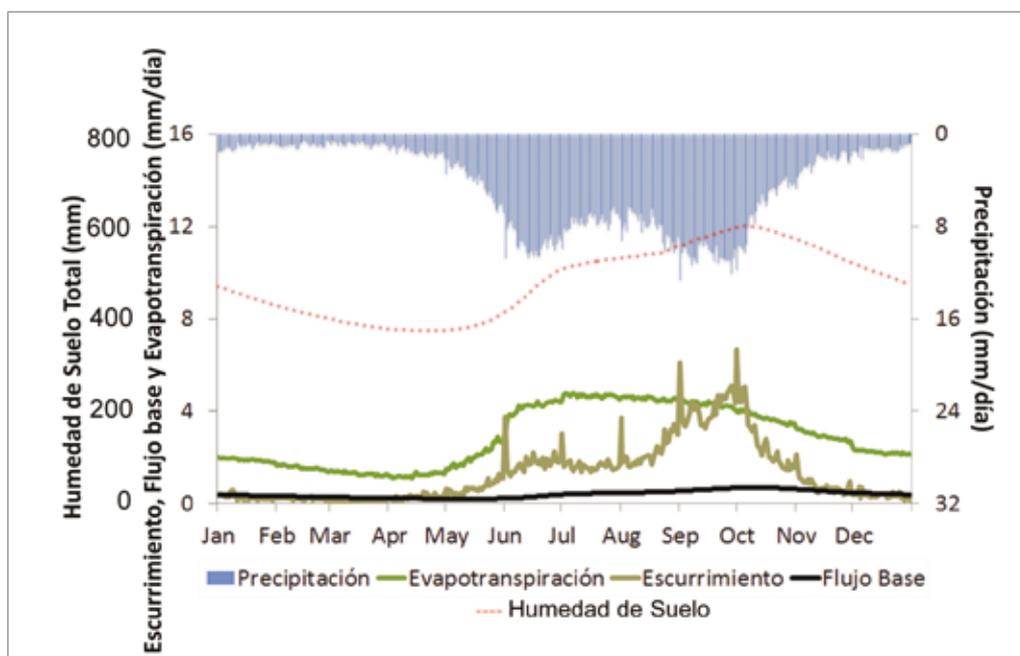


Figura 7. Variabilidad histórica anual de los componentes principales del ciclo hidrológico en la superficie terrestre (PPRECIP=Precipitación, EVAP=Evapotranspiración; RUNOFF=Escurrecimiento; BASE FLOW=Flujo Base; HUMEDAD DE SUELO=suma de la humedad de suelo en las capas de suelo 1, 2 y3).

responden de manera más apegada a la variabilidad en la precipitación.

La respuesta de la hidrología superficial de la Cuenca del Río Grijalva a los cambios en los parámetros de VIC nos permite avocarnos a la evaluación de los experimentos planteados con PEST y MOCOM en relación a los periodos de calibración así como su respuesta en el periodo de validación. Con valores de parámetros y NS similares (Tabla II) observamos que durante el periodo de calibración 1950-1954 la generación de avenidas es diferente (Figura 8). Existen dos posiciones respecto a la semejanza entre los parámetros y las funciones objetivo y la respuesta hidrológica. Por un lado, lo anteriormente mencionado coincide con el argumento de Gupta et al. (2003) sobre las diferencias en la respuesta hidrológica a funciones objetivo similares. Sin embargo, una vez que observamos la respuesta hidrológica a cambios en los parámetros durante el periodo de calibración 1950-1959 coincidimos con el argumento de Parajka et al. (2007) quienes destacan la importancia en la disminución en la incertidumbre en los parámetros en las evaluaciones de calibraciones multi-objetivo para generar simulaciones más cercanas a las observaciones. Entre MOCOM y PEST hay diferencias

en el NS cercanas a 0.2 en el periodo 1950-1959. Estas diferencias pueden ser debidas a las técnicas de mínimos cuadrados usadas en ambos algoritmos. En PEST, la técnica de mínimos cuadrados de Gauss-Newton se caracteriza por su rápida convergencia, lo que permite encontrar rápidamente la región del óptimo global (Gavin 2011). No obstante, existe la posibilidad que la función objetivo global obtenida pueda ser errónea ya que el esquema de GML es muy proclive a quedarse atrapado en funciones objetivo con mínimos locales (Doherty y Johnston, 2003). Sin embargo, parece que esto ocurrió con MOCOM en la calibración de largo periodo. En MOCOM la baja en el NS respecto a PEST al aumentar el periodo de tiempo, puede estar relacionada con el espacio posible de "Pareto" que al aumentar disminuye la factibilidad de encontrar rápidamente el mínimo global (Duan et al 1992, Yapo et al. 1998). Lo anterior coincide con que el incremento en el número de iteraciones (30 a 100) no fue suficiente para encontrar el mínimo global de la función objetivo. Aunque es posible que lo anterior, en conjunto con un mayor número de funciones objetivo (3 contra 1 en PEST) sea también la causa de los bajos valores en el NS.

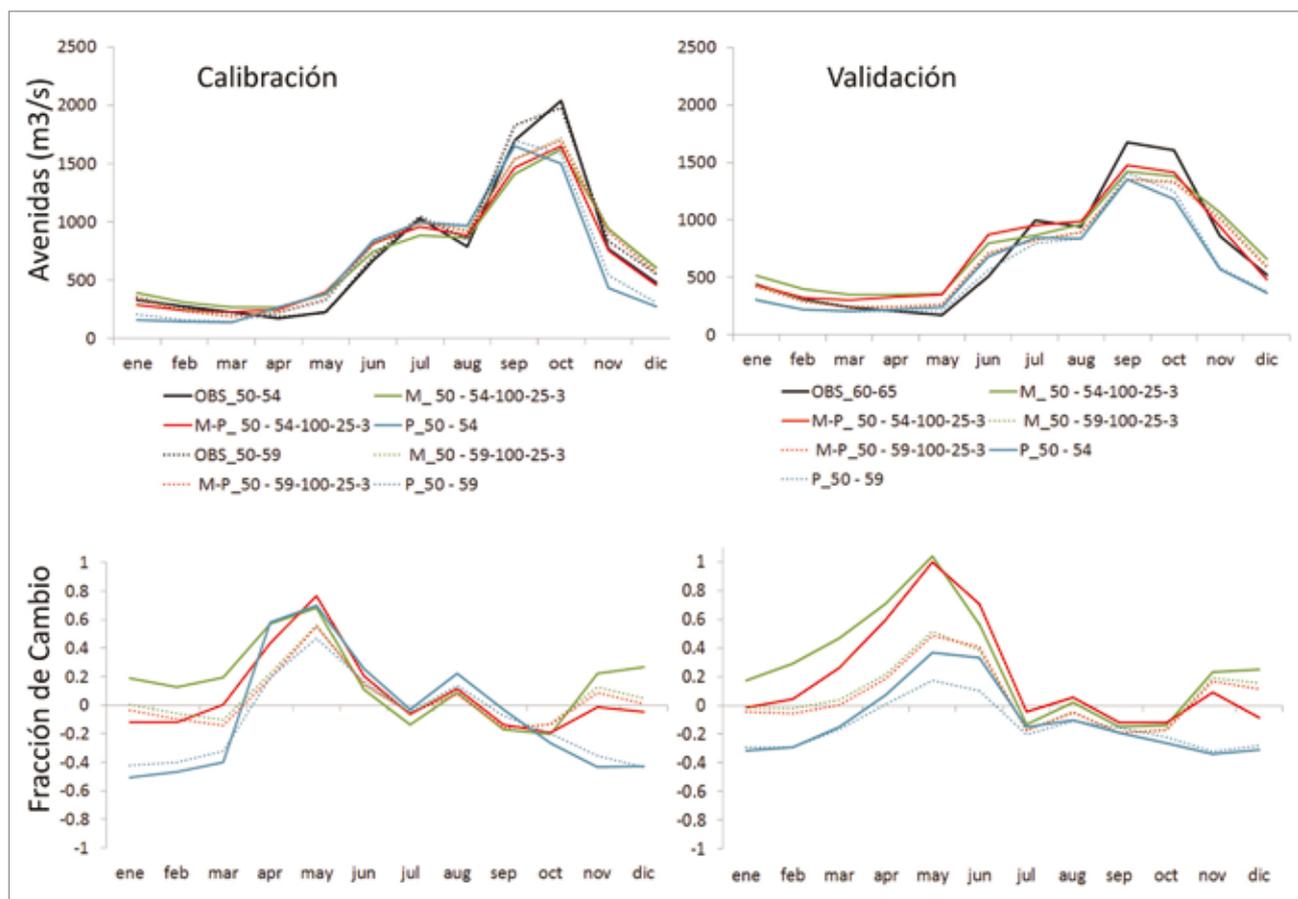


Figura 8. Superior- avenidas mensuales producto de los diferentes experimentos de calibración (ver encabezado de la Tabla II para las especificaciones de las leyendas) para los periodos 1950-1954 y 1950-1959, así como el periodo de validación (1960-1965). Inferior-Cambios en las avenidas mensuales durante la calibración y la validación con respecto de las observaciones no reguladas en la estación Peñitas.

Las calibraciones aplicadas tanto en PEST como en MOCOM, (ocurridas durante periodo de calibración 1950-1954 o durante el periodo de calibración 1950-1959) presentan un impacto en la generación de avenidas que varía en el tiempo. En la figura 8, se ilustra que los NS en el periodo de calibración corto son mayores a 0.7 en ambos algoritmos. Sin embargo, existen periodos en los que un algoritmo supera al otro, mostrando que los parámetros obtenidos permiten simular una respuesta hidrológica más apegada a las observaciones. Por ejemplo, durante los meses de poca precipitación (incluido el periodo de la sequía interestival) MOCOM presenta mejores resultados que PEST. Sin embargo, durante los periodos húmedos, los parámetros obtenidos por PEST producen mejores simulaciones de las avenidas en la estación Peñitas.

Por otro lado, cuando se comparan temporalmente las respuestas hidrológicas entre los parámetros obtenidos en los periodos cortos con respecto a aquellos en los periodos largos, PEST siempre presenta mejores resultados con los parámetros provenientes de una calibración larga. MOCOM presenta de manera poco clara los beneficios de incrementar el periodo de calibración a lo largo del año.

Las diferencias entre ambos algoritmos presentan una disminución de poco más del 10% en los valores de la función objetivo NS entre los periodos de calibración y los periodos de validación. A lo largo del año las técnicas de MOCOM fueron ligeramente mejores que las de PEST durante la validación (Figura 8). Mientras que en la primavera los parámetros obtenidos por PEST representaron de mejor manera la generación de avenidas, el resto del año MOCOM mostro mejores resultados. Asimismo, los parámetros obtenidos de las calibraciones de largo periodo (1950-1959) fueron mejores que aquellas de corto periodo.

CONCLUSIONES

De manera general, se logró con éxito aplicar los algoritmos de la calibración automática MOCOM y PEST en la Cuenca del Río Grijalva durante dos periodos de tiempo (1950-1954 y 1950-1959). Como producto de estos experimentos se observó que la generación de avenidas estuvo particularmente afectada por las profundidades en las capas de suelo 2 y 3 y los cambios en el parámetro de infiltración (bi), mostrando cambios entre los parámetros iniciales y calibrados automáticamente de más del 40% y 100%, respectivamente. Lo anterior, realza el papel de la humedad de suelo regulando la variabilidad temporal en el escurrimiento y el flujo base de la región.

Existen diferencias en la generación de avenidas simuladas producto de los parámetros obtenidos entre ambos algoritmos para los dos periodos. Mientras para el Periodo corto (1950-1954) ambos tuvieron un NS similar (entre 0.72 y 0.73), la calibración automática PEST (0.72) fue ligeramente mejor que la MOCOM (0.53) en el periodo 1950-1959. Lo anterior está sustentado en la forma cómo se desarrolló

PEST en la CRG, ya que se establecieron diferentes parámetros de suelo en función de las diferentes regiones topográficas. Lo anterior permitió representar de manera más fehaciente las condiciones físicas del suelo y encontrar una mejor región del óptimo global.

La calibración automática MOCOM y PEST presentaron diferencias temporales que identificaron periodos en los que alguna de las técnicas presentó parámetros cuya respuesta hidrológica asociada a las simulaciones de la hidrología superficial supera a la otra. Durante la calibración de corto periodo PEST supero a MOCOM en los meses húmedos; sin embargo, en los meses de sequía, incluyendo la sequía interestival, MOCOM supero a PEST. En las calibraciones de largo periodo PEST supera claramente a MOCOM a lo largo de prácticamente todo el año. En este caso MOCOM no presenta de manera muy clara cuando mejora su papel.

Finalmente los resultados obtenidos de la conclusión anterior no se mantienen para los periodos de validación, en los que MOCOM supera a PEST en prácticamente todos los meses. Asimismo los parámetros obtenidos de las calibraciones de largo periodo tienen un mejor papel en el periodo de validación que aquellos obtenidos a partir de las calibraciones de corto periodo. En esta conclusión y la anterior se muestra que la región del mínimo global óptimo está relacionada con el periodo de calibración. Los cambios en el papel que juegan ambos algoritmos para obtener parámetros idóneos está relacionado con el número de funciones objetivo e inherentemente con la incertidumbre en las simulaciones de avenidas debidas a la física del modelo, los forzantes de éste y las observaciones no reguladas con las que se comparan las simulaciones.

El presente estudio abre una serie de posibilidades para explorar en más detalle la sensibilidad de otros parámetros y el uso de una versión multi-objetivo de PEST. Además de evaluar de qué manera se ven impactadas las simulaciones de otras variables y variables de estado producto del proceso de calibración automática. Actualmente, se trabaja con simulaciones históricas para evaluar la hidroclimatología de la región y su posible aplicación en estudios de pronóstico y predicción hidrológica a diferentes escalas temporales (pronóstico de inundaciones a evaluación de escenarios de cambio climático).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos el apoyo brindado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para el desarrollo de la presente actividad, en particular de las sub-coordinaciones de Hidrología y Mecánica de Ríos e Hidrometeorología. También agradecemos el apoyo brindado por el grupo de Land Surface Hydrology de la University of Washington y el grupo de Hidroclimatología del Scripps Institution of Oceanography de la University of California, San Diego.

REFERENCIAS

- Bohn, T.J., M.Y. Sonessa, and D.P. Lettenmaier, 2010: Seasonal hydrologic forecasting: Do multi-model ensemble averages always yield improvements in forecast skill?, *J. Hydromet.*, 11(6), 1357-1371, doi:10.1175/2010JHM1267.1.
- Caso de Estudio, México: río Grijalva. Programa Asociado de Gestión de Crecientes 2006.
- Doherty, JOHN. PEST version 9.0, Manual Watermark Numerical Computing – Janeiro 2005.
- Doherty, John. *PEST version 9.0, Parameter estimation Inc.* <http://www.parameter-estimation.com/>
- Doherty, J and J. Jhohnston (2003) Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *Journal of AWRA*. April 2003.
- Duan, Q., V. K. Gupta, and S. Sorooshian, A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, *J. Optim. Theory Appl.*, 76(3), 501– 521, 1993.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. K. Gupta, Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. Hydrol.*, 158, 265–284, 1994.
- Getirana, Augusto. *Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil. 2010.
- <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>
- Kim, S.M. B.L. Benham, K.M. Brannan, R.W. Zeczkoski y J. Doherty (2003). Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water Resources Research*, Vol. 43, W01402, doi:10.1029/2006WR004883,2007.
- Liu, Zhiyu and Todini, Ezio. *Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model*. Department of Earth and Geo-Environmental Sciences, University of Bologna, Italy. 2002
- Mays, Larry, W. and Koung Tunk, Yeou: *Hydrosystems Engineering & Management*, McGraw-Hill, 1992.
- Munoz-Arriola, F., D.P. Lettenmaier, Zhu, C. y R. Avisar (2009) Water resources sensitivity of the Rio Yaqui Basin, México to agriculture extensification under multi-scale climate conditions. *Water Resources Research*, 45, W00A20, doi:10.1029/2007WR006783.
- Munoz-Arriola, F., Shraddhanand Shukla, Theodore J. Bohn, Chunmei Zhu, Ben Livneh, Dennis P. Lettenmaier, René Lobato Sánchez, y Ana Wagner Gomez (2009). Forecasting Surface Hydrology in North America, *Border Climate Summary*, July 2009: 1-5.
- Munoz-Arriola, F., D. P. Lettenmaier, C. Zhu, A. W. Wood, R. Lobato Sánchez, y A. Wagner Gomes. Extended West-wide Seasonal Hydrological System: Seasonal Hydrological Prediction in the NAMS region. (2008) *CLIVAR Exchanges*,43: 24-25.
- Naumov, Aleksey. *Multi-criteria validation of the SWAT hydrologic model in a small forested watershed*. State University of New York at Buffalo, 2005.
- Nijssen, Bart. and O'Donnell, Greg. and Hamlet, M. Alan F. and Lettenmaier, Dennis P. Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change, 2001.
- Parajka, J., R. Merz y G. Bloschl (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21, 435-446. DOI: 10.1002/hyp.6253.
- Rubio, Gutierrez. Horacio y Triana Ramírez, Cesar. *Gestión Integrada de Crecientes*
- Sheffield, J, E. Wood y F. Munoz-Arriola (2010). Long-term regional estimates of evapotranspiration for Mexico based on downscaled ISCCP data. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 253-275.
- Tamayo, J. *Geografía general de México*. Tomos I y II. Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas, Trillas, México. 1949. Tucson Arizona University, Department of Systems and Industrial Engineering.
- Tang, Q., E. Vivoni, Munoz-Arriola y D. P. Lettenmaier. Predictability of evapotranspiration patterns using remotely-sensed vegetation dynamics during the North American monsoon (sometido al *Journal of Hydrometeorology*).
- Trelles, S. A.; Salgado, Jorge; Sanvicente, H.; Balancán, J. A.; Orozco, I.; Cervantes, E. A.; Bravo, J. A.; y Salgado, A. L. *Modelación dinámica de subcuencas en la cuenca del río Balsas, 1ª etapa*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, México, 2005.
- Vrugt, J.A, H.V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten, y S. Sorooshian (2003) Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, Vol. 39 (8), 1214, doi:10.1029/2002WR001746,2003.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Multi-objective global optimization for hydrologic models, *J. Hydrol.*, 204, 83–97, 1998.

Agradecemos en este número, la colaboración de los siguientes revisores:

Chaves, Henrique

Universidad de Brasilia, Brasil

del Castillo Laborde, Lilián

Universidad de Buenos Aires, Argentina

Doria, Miguel

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, Francia

Dourojeanni, Axel

Fundación Chile, Chile

Emmanuel, Evens

Universidad de Quisqueya, Haití

Giraut, Miguel

Subsecretaría de Recursos Hídricos, Argentina

Hollander, Astrid

Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Chile

Moyano, Cristina

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Peña, Humberto

Consultor independiente, Chile

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Cuba

Scaffo, Sonia

Oficina Regional de Ciencia de UNESCO para América Latina y el Caribe, Uruguay

Tujchneider, Ofelia

Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Valdés, Rodrigo

Universidad de Talca, Chile

Vargas, Ximena

Universidad de Chile, Chile

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social.

Las contribuciones deben ser el resultado de una investigación original adecuadamente diseñada y que contenga un **título, resumen, palabras clave, introducción, metodología, resultados y discusión, conclusiones o consideraciones finales, agradecimientos (opcional) y referencias bibliográficas**. Los artículos presentados deben ser originales en idioma español o inglés y escritos a espacio sencillo, con letra Arial tamaño 10 y márgenes de 2 cm. y de una extensión de entre 8-15 páginas, contando inclusive aquellas con tablas y figuras.

Formato

Primera página: Incluirá el título en español e inglés, que debe ser conciso y reflejar el contenido del trabajo, los nombres de los autores, así como su afiliación (nombre de la institución a la que pertenece y correo electrónico). Siempre que aparezcan nombres científicos en el título, estos deberán ser escritos de acuerdo a los registrados en **ITIS** (Sistema de Información Taxonómico Integrado, <http://www.itis.usda.gov/>) siempre y cuando se encuentren disponibles.

Resumen: Los trabajos deben incluir un resumen representativo del artículo, en el idioma original del texto y en el otro idioma oficial de la revista. Se requiere además de 3-6 palabras clave en ambos idiomas separadas por comas que permitirán ubicar el trabajo en las bases internacionales de datos que incluirán a la revista.

Texto

Tendrá que ser consistente con el tipo de publicación, siguiendo la estructura estándar presentada en la matriz disponible en el sitio web de Aqua-LAC.

Referencias

Las referencias que aparecen en el texto deben estar presentes en la sección Referencias Bibliográficas en orden alfabético y cronológico. Solo los trabajos citados en el texto deberán aparecer en la sección de Referencias Bibliográficas y viceversa.

Figuras y Tablas

Se prefieren figuras, dibujos y fotografías electrónicas en formato GPS o TIFF, de 300 DPI (color) y 1200 DPI (blanco y negro).

Las figuras, ilustraciones y fotografías digitales deben ser enviadas en forma separada, debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con una breve descripción.

Las tablas deben ser enviadas por separado, enumeradas y con un título, que aparecerá en la parte superior de la misma. Deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas, preferiblemente no debiendo exceder un máximo del 50% del tamaño de la página. **NOTA:** Las tablas deben utilizar el Sistema Internacional de unidades

Remisión de Trabajos

Los autores deberán enviar sus trabajos en solamente en formato electrónico a aqualac@unesco.org.uy.

Derechos de autor

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la Revista.

NOTA: Descargue las instrucciones en versión extendida en www.unesco.org.uy/phi/aqualac

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Aqua-LAC journal is a multidisciplinary publication that will contain articles, technical notes and water resources reviews, as much in a scientific as in an economic and social dimension.

The articles must be the result of an original research, dully designed and containing **title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, conclusions, acknowledgments (optional), and bibliographic references**. The manuscripts presented will be originals in Spanish or English, on subjects related to the areas of the journal. Will be written with Arial font size 10 pt, with single spacing, 2 cm margins, and with a length between 8 and 15 pages including tables and illustrations.

Format

First page: will include the title in Spanish and English, that should be concise reflecting the content of the document, the authors names and their affiliation (name to their belonging institution, telephone, fax and e-mail). If scientific names appear in the title, this should be written according with those in ITIS (Integrated Taxonomic Information System, <http://www.itis.usda.gov/>) if they are available.

Abstract: the articles must include a representative abstract, in the language of the paper and in the other official language of the journal. Also, 3-6 key words in both languages will be requested, separated by commas to allow finding the manuscript in the international databases including the journal.

Text

Shall be consistent with the type of journal, following the standard format presented in the template provided in the Aqua-LAC web-page.

References

References that appear in the text should be presented in the Bibliographic References section in alphabetical and chronological order. Only works cited in the text should appear in the References section and viceversa.

Tables and Figures

Figures, drawings and digital photos are preferable in GPS or TIFF, 300 DPI (colour) and 1200 DPI (black and white).

The figures, illustrations and digital photos should be sent separately, properly identified with a number that should be consistent with the way they are mentioned in the manuscript and a short description.

The tables should be sent separately, numbered and with a title that will be shown on its upper part. In the text the tables should be cited with a rising numeration order according to its description, preferably not exceeding a maximum of 50% of the size of the page.

NOTE: The tables should use the International Units System.

Submission of manuscript

Manuscripts must be submitted only in electronic format to aqualac@unesco.org.uy.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree for the author's rights to be transferred to the Journal.

NOTE: Download the extended instructions from www.unesco.org.uy/phi/aqualac

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, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598) 2413 20 75, Fax: (598) 2413 20 94
aqualac@unesco.org.uy

