



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

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

1

VOL. 7
MAR. 2015

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Avila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutierrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Lilián Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
UNESCO - IHE Water Institute, Holanda
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California Davis, USA
- Poliopetro Martínez - Ingeniería Hidráulica
Universidad de Puebla, México
- Victor Pochat - Gestión Integrada
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief

Roberto Pizarro

Editora Ejecutiva / Executive Editor

Zelmira May
UNESCO

Coordinador de Edición / Editorial Coordinator

Carolina Van Soest / Jan Timo Walter
UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design

Ser Gráficos

Diseño de Portada / Cover Design

Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

Efectos del cambio climático y usos del suelo sobre los recursos hídricos de la cuenca del Río Tordera (Barcelona, España)

Candela, Lucila; Tamoh, Karim; Olivares, Gonzalo; Gomez, Manuel; Valdes-Abellan, Javier

Assessment of water resources under climate and land-use changes. The Tordera Basin (NE Spain) 1

Equivalencia de las tasas de transporte de masa locales y generales en los cauces naturales en "equilibrio dinámico": una nueva definición de los mecanismos de formación de las plumas de contaminación

Constaín Aragón, Alfredo José; Mesa Fernández, Duvan Javier; Peña-Guzmán, Carlos

Equivalence between local and general mass transport rates in natural streams in "dynamic equilibrium": a new definition of formation mechanisms for contamination plumes. 11

Seguridad Hídrica: retos y respuestas, la Fase VIII del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2014-2021)

Jimenez-Cisneros, Blanca

Water security: challenges and responses, Phase VIII of the International Hydrological Program of UNESCO (2014-2021) 20

Identificación de actores: una contribución a la gestión de los colectores de drenaje de la ciudad de Cipolletti (Río Negro, Argentina)

Lozeco, Cristóbal; Schreider, Mario; Petri, Daniel; Paris, Marta

Stakeholder mapping: a contribution to drainage collectors management in Cipoletti City (Río Negro, Argentina)..... 28

Estimación de los parámetros del modelo de infiltración de Philip para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina

Weber, Juan Francisco

Parameter estimation for Philip's infiltration model in pervious areas of Cordoba City (Argentina) 39

Variabilidad espacial de la concentración de nitratos en el embalse de Nova Ponte, Minas Gerais, Brasil, por medio de la Geoestadística y los Sistemas de Información Geográfica - SIG

Vieira, Eliane Maria; Santos, Nerilson Terra; d'Almeida Duarte de Azevedo, Izabel Christina; Fernandes Bezerra Neto, José; Rodriguez Simão, Maria Léila; Pinto Coelho, Ricardo Motta

Spatial variability of nitrate concentration in reservoir Nova Ponte, Minas Gerais, Brazil, using geostatistics and Geographic Information Systems -GIS..... 49

Los tanques de regularización, alternativa de solución al servicio intermitente de agua potable en el sector "Bachilleres", Chetumal, Quintana Roo, México

Mena Rivero, Roberto; Cruz Argüello, Julio César; Hernández Serrano, Adriana Nayali; Rivero Vega, Gonzalo Rodrigo

Water storage tanks, an alternative solution to "Bachilleres" sector's intermittent water supply at Chetumal, Quintana Roo, Mexico..... 56

Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo

Duque Yaguache, Luis Felipe; Vázquez Zambrano, Raúl Fernando

Water availability modelling for a tropical mountain catchment as a function of its soil cover 63

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

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

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

Agua Global para la Sostenibilidad (GLOWS), USAID
Global Water for Sustainability (GLOWS), USAID

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

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

BLANCA JIMÉNEZ

Directora de División Ciencias del Agua, UNESCO
Director of Water Science Division, UNESCO

EDUARDO PLANOS

Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

ALFONSO GUTIÉRREZ

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

JUAN CARLOS BERTONI

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

EVENS EMMANUEL

Université Quisqueya, Haïti
University of Quisqueya, Haïti

WILL LOGAN

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

SUSCRIPCIONES

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

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
y envíelo a
aqualac@unesco.org.uy

SUSSCRIPTIONS

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

Los recursos hídricos en América Latina y el Caribe, en cifras globales, parecen poseer una muy adecuada oferta de los mismos y para los diversos usos, inclusive más que en otras regiones del mundo. Pero, desde hace más de dos décadas se ha venido acrecentando la sensación de que ello no es más que una nueva esclavitud de los promedios, porque desde diversas zonas de la Región, logra establecerse el hecho que las demandas no están siendo satisfechas. Este aspecto sería función de una inadecuada planificación hidrológica, a un aumento excesivo de las demandas y a un escenario de cambio climático que en muchas zonas define menores ofertas de agua, entre otros aspectos.

Estudios efectuados en el año 2014 en Chile, señalan que el agua es responsable de al menos un 60% del Producto Interno Bruto del país, cifra que debe ser similar en otros países de la Región y que habla por sí sola de la importancia que posee el agua no sólo como factor de vida o productivo, sino como un elemento clave de seguridad nacional. A ello se adiciona que el agua cuando se encuentra en un proceso de descontrol, llámense precipitaciones intensas, inundaciones o socavaciones ribereñas, entre otros factores, no sólo no aporta al enriquecimiento de los países, sino que las catástrofes ligadas a tal descontrol, descuentan puntos porcentuales valiosos en el crecimiento de los mismos, y nuevamente surge en ese contexto la relevancia de los recursos hídricos.

En otras palabras, los recursos hídricos manifiestan una necesidad de un trato especial por parte de la sociedad, por tratarse de un elemento vital para la vida y la economía de los países, y el cual cruza transversalmente todo el accionar de la sociedad.

En este contexto, surge con nítida claridad la necesidad de investigar acerca del comportamiento de los recursos hídricos, porque sabiendo cómo funcionan los ecosistemas urbanos y rurales en torno al agua, se podrán definir y concretar efectivas políticas públicas que permitan satisfacer las demandas de la población sobre diversos temas que les preocupan, a saber, saneamiento, abastecimiento de agua potable de calidad, energía, industria, cambio climático, erosión, etc. Es decir, sin conocimiento será muy difícil superar las brechas que poseen los países más pobres con respecto a los países industrializados, que como ha dicho el Secretario General de la ONU en el informe la Agenda post 2015 (párrafo 124), "hay una serie de iniciativas internacionales en curso encaminadas a acelerar el desarrollo, la difusión y la transferencia de los objetivos, sobre todo, del medio ambiente y las tecnologías. Hasta ahora, sin embargo, la ambición no ha igualado los desafíos actuales. Aunque el logro técnico ha aumentado rápidamente en los países en desarrollo, la brecha en comparación con los países desarrollados sigue siendo grande"

In terms of global figures, Latin America and the Caribbean seem to have a very sufficient supply of water resources for various uses, more so than in other regions of the world. But for more than two decades there has been a growing sentiment that this is no more than a new form of obsession with averages because, in diverse areas of the region, the truth is that demands are not being met. This is caused by inadequate water planning, an excessive increase in demands, and a scenario of climate change that in many places leads to less available water, among other features.

Studies conducted in Chile in 2014, indicate that water is responsible for at least 60% of Gross Domestic Product, a figure which should be similar for other countries in the region and which speaks not only of the importance of water in life and production, but as a key element of national security. To this, one adds that when water is in an uncontrollable state, whether it is heavy rainfall, flooding or coastal undercuts, among other factors, it not only undermines the enrichment of the countries but the disasters linked to this chaos deduct valuable growth percentage points, thus emphasising the relevance of water resources in this context.

In other words, water resources need special treatment by society as a vital element for life and the economy of the countries, and which crosses all actions of society.

In this context, arises with sharp clarity the necessity to investigate the behaviour of water resources. Through knowing how the rural and urban ecosystems work in regard to water, we will be able to define and specify effective public policies which enable us to satisfy the demands of the population on various issues of concern, namely sanitation, provision of quality drinking water, energy, industry, climate change, erosion etc. That is to say, without knowledge it will be very difficult to overcome the gaps that the poorer countries have with respect to countries that are more industrialised. As was said by the UN Secretary General in the report of the post-2015 Agenda (paragraph 124), "There are a series of international initiatives aimed at accelerating the development, diffusion, and transference of objectives, above all, regarding the environment and technology. Until now however, the ambition has not equalled the actual challenges. Although the technical advances have increased rapidly in developing countries, the gap between these and developed countries continues to increase".

Es en este contexto en el que se sitúa el rol de la revista Aqua-LAC, cual es difundir el conocimiento que se genera en la región en torno a los recursos hídricos y en sus más variadas formas y permitir que ese conocimiento pueda ser difundido y aquilatado por los actores que tienen relación con una adecuada gestión del agua. Por tanto es una alegría presentar este nuevo número de una revista que es nuestra, que es propia de los investigadores de la región LAC y que es un reflejo de lo que queremos ser y hacer y a la cual se suman investigadores destacados de otras latitudes. Así, en este número se presentan temáticas variadas, las que van desde una visión de la seguridad hídrica y las respuestas del Programa Hidrológico Internacional de la Unesco; pasando por los efectos del cambio climático y los usos del suelo sobre los recursos hídricos; una nueva definición de los mecanismos de formación de las plumas de contaminación; la modelación de la oferta hídrica en función de su cobertura de suelo; la gestión de los colectores de drenaje; alternativas de solución a las ofertas intermitentes de agua potable; la variabilidad de la concentración de nitratos por medio de métodos geoestadísticos; hasta la estimación de los parámetros de Philips para áreas permeables urbanas. Todo ellos son artículos que han superado una importante fase de evaluación y que demuestran las capacidades de los investigadores que acuden a Aqua-LAC, para presentar a la comunidad internacional los resultados de sus trabajos de investigación.

Finalmente, debemos seguir en el esfuerzo de investigar para conocer y poseer un mejor actuar, que se traduce en políticas públicas eficientes y en relación al recurso natural más importante de la región, cual es el agua. No en vano el gran escritor uruguayo recientemente fallecido, Eduardo Galeano, nos decía "del agua brotó la vida. Los ríos son la sangre que nutre la tierra y están hechas de agua las células que nos piensan, las lágrimas que nos lloran y la memoria que nos recuerda".

Roberto Pizarro Tapia
Editor en Jefe, Aqua-LAC
Profesor titular
Director Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental
Universidad de Talca
Chile

This is the context in which Aqua-LAC magazine plays a role; to spread knowledge generated in the region about water resources and related topics and to allow this knowledge to be valued and diffused by the actors involved in the adequate management of water. Therefore it is a pleasure to present this new issue of a magazine which is ours, typical of the researchers of the LAC region and that is a reflection of what we want to be and do and which includes leading researchers from other latitudes. Thus, this issue presents varied themes, from a vision of water security and the responses of the International Hydrological Program of UNESCO; through the effects of climate change and land use on water resources; a new definition of formation mechanisms for contamination plumes; water availability modelling as a function of its soil cover; the management of drainage collectors; alternative solutions to intermittent drinking water tenders; the variability of average nitrate concentration using methods of geostatistics; to parameter estimation of Philips for permeable urban areas. All of these are articles which have overcome an important phase of evaluation and show the capacity of the researchers who come to Aqua-LAC to present the results of their investigative work to the international community.

Finally, we must endeavour to continue to investigate in order to know and possess better conduct, which can be transformed into efficient public policy, particularly in relation to the most important natural resource in the region, water. Not in vain did the great Uruguayan writer, who recently passed away, Eduardo Galeano, tell us "From water gushed life. The rivers are the blood which nurtures the earth and the cells with which we think, the tears we cry and the memories we remember are made of water".

Roberto Pizarro Tapia
Editor in Chief, Aqua-LAC
Professor
Director Technology Center of Environmental Hydrology
University of Talca
Chile

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

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

Contenido

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

Idioma

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

Aceptación de los manuscritos

Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión. El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

Proceso de revisión

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

Derechos de reproducción (Copyrights)

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

Responsabilidad

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

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

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

Contents

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

Languages

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

Acceptance of manuscripts

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

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

Review process

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

Copyrights

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

Disclaimer

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

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y USOS DEL SUELO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO TORDERA (BARCELONA, ESPAÑA)

ASSESSMENT OF WATER RESOURCES UNDER CLIMATE AND LAND-USE CHANGES THE TORDERA BASIN (NE SPAIN)

Candela, Lucila¹; Tamoh, Karim¹; Olivares, Gonzalo²; Gomez, Manuel²; Valdes-Abellan, Javier³

Resumen

Se presentan los efectos del cambio global en la cuenca del río Tordera (España) para el periodo 2000-2050, escenarios climáticos A2 (medio-alto) definidos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 200) y escenarios socioeconómicos (cambios previstos en la cuenca) denominados estable y tendencial. Los efectos sobre los recursos hídricos se han analizado de forma conjunta superficial-subterránea mediante una metodología de tipo acoplado. Para establecer los impactos futuros sobre los recursos hídricos se ha seleccionado el Modelo de Circulación Global ECHAM5 (Max Planck Institute). Los resultados obtenidos indican una disminución de la precipitación del 11.3% y un aumento de la temperatura de 1°C, respecto a los valores históricos de la zona. De acuerdo a la proyección futura (2050) sobre cambios en los recursos hídricos, la escorrentía superficial obtenida mediante simulación con el código HEC-HMS 3.4 experimenta una reducción del 31.8% respecto al valor histórico y la recarga natural, estimada mediante VISUAL-Balan, se reduce en un 11.7%. El balance en el acuífero deltaico simulado mediante MODFLOW 2009.1 Pro muestra igualmente una disminución de los parámetros del balance. Los cambios del uso del suelo previstos de acuerdo a la legislación vigente (escenarios socioeconómicos) no conducen a la generación de un impacto apreciable en los recursos hídricos; según los escenarios definidos la variación de precipitación y temperatura son los parámetros fundamentales del cambio previsto.

Palabras clave: Recursos hídricos, cambio climático, escenario A2, Tordera

Abstract

Climate change impact on water resources (flow and groundwater changes) based on the downscaled outputs of a General Circulation model-GCM has been investigated in the Tordera catchment (Northwestern part of the Mediterranean area, Spain) for the year 2050. The objective of this paper is to apply a linked methodological approach to investigate the impacts of climate change on a Mediterranean hydrological system by taking into account effects on surface water and groundwater recharge. The methodological approach has been applied in the Tordera basin (NE Spain), which constitutes a good example of a coupled stream/aquifer hydrologic system. Obtained results estimate a maximum decrease of 11.3% in precipitation, an increase of 1 °C of temperature and decrease of 31.8% and 11.7% on runoff and groundwater recharge respectively with respect to the historical values for 2050. Results of groundwater balance of the quaternary aquifer show a decrease of 12% of storage with respect to the historical period while a slight increase of river recharge and seawater intrusion is produced. Land use changes do not show an important contribution on future water resources changes. According to results, most important parameters conditioning future water resources are changes in temperature and precipitation.

The outputs and experience gained in this research can contribute to prepare to cope with forecasted global change impacts on water resources in similar catchments. The conclusions are, to some extent, subject to uncertainties; the level of confidence in regional projections derived directly from GCMs for precipitation is more uncertain than those for temperature.

Key words: Water resources, climate change, A2 scenario, Tordera

1. INTRODUCCIÓN

Según los resultados procedentes de los modelos acoplados atmósfera-océano (GCM), para el horizonte 2100 en el área mediterránea se prevé un descenso de la precipitación del 10% y un aumento de la temperatura media, especialmente en el periodo estival, de 1°C (A1B storyline, IPCC, 2001). Las proyecciones indican un aumento de la probabilidad de sequías y de los episodios extremos (Kerr, 2005;

Norrant & Douguédroit, 2006). Estos cambios pueden derivar en impactos importantes en los recursos hídricos como se puede observar en el gran número de artículos publicados desde finales de los años 70 (Kundzewicz & Somlyódy, 1997; Grieneisen & Zhang, 2011; Febrillet et al., 2014), entre los que cabe citar los relacionados con el ciclo hidrológico (Burns et al., 2007; Candela et al., 2012b; Hagg et al., 2007; Ruth

¹ Dpto. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geodésica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España (lucila.candela@upc.edu)

² Instituto de Investigación FLUMEN. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

³ Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. Alicante, España.

& Coelho, 2007; Werritty, 2002); aguas subterráneas (Allen et al., 2004; Brouyère et al., 2004; Green et al., 2011; Hsu et al., 2007), recarga (Bouraoui et al., 1999), cambios en la cubierta vegetal (Candela et al., 2012a; Cuo et al., 2011; Falloon & Betts, 2010) y afección a ecosistemas (Candela et al., 2009).

En general, el enfoque presentado se basa en el análisis de impactos en los recursos hídricos superficiales o subterráneos evaluados independientemente, sin embargo no existen muchas aportaciones a nivel integrado (ACCUA, 2011; Scibek et al., 2007; Serrat-Capdevila et al., 2007). Pese a ello, los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos a nivel de cuenca deben analizarse de manera conjunta. La elaboración de un modelo hidrológico conjunto que analice los aspectos de hidrología superficial y recarga subterránea constituye una alternativa de gran interés para la evaluación de los impactos en los recursos hídricos futuros.

El objetivo principal de esta investigación se centró en estimar la aportación y variabilidad de los recursos hídricos superficiales y recarga subterránea en la cuenca del río Tordera (NE España) para el escenario climático A2 (severo) definido en el IPCC y periodo 2000-2050. La elección de la cuenca se realizó basada en la disponibilidad de información meteorológica, usos del suelo y datos de caudales superficiales; y en la previsión de futuros cambios de las demandas hídricas y la existencia de transferencias relevantes entre aguas superficiales y subterráneas en dicha cuenca.

1.1. La cuenca del río Tordera

La cuenca del río Tordera se extiende sobre una superficie de 876 km² desde el macizo del Montseny hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo (figura 1). Con un clima típicamente mediterráneo, la precipitación media anual en la cuenca es de 707 mm, con valores de 767 mm en la cabecera y de 573 mm en la costa (periodo histórico 1984-2008). La precipitación presenta una marcada variación estacional donde los meses de Octubre y Abril concentran el 80% de la precipitación total anual; el verano es extremadamente seco y los episodios extremos suelen tener lugar en otoño. La temperatura media anual es 15.4°C y oscila entre máximas de 30°C en verano y mínimas de -6°C en invierno. La evapotranspiración potencial es 811 mm. Con un uso de suelo predominantemente forestal y agrícola, donde las zonas urbanas no superan el 6% de la superficie total, la cuenca presenta una elevada demanda hídrica y una marcada estacionalidad tanto de los recursos como de las demandas.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca se enmarca en la unidad estructural de los Catalánides, constituida en este sector por un zócalo paleozoico (granitos, materiales pizarrosos, grauvacas y

cuarcitas) fuertemente plegado y con presencia magmática. Como consecuencia de la orogenia alpina, que deformó y fracturó los materiales del zócalo, se generó un graben relleno de materiales de origen detrítico continental (arcillas, conglomerados, arenas) por el que fluye el curso medio y bajo del río Tordera.

En los materiales cuaternarios se definen dos unidades: depósitos de piedemonte formados por fragmentos muy heterométricos, de textura gruesa y muy meteorizados, y terrazas fluviales. Se distinguen dos terrazas, una superior constituida por una formación roja de cantos con matriz arcillosa y que constituye un conjunto poco permeable de 1 a 5 m de grosor; y otra inferior, formada por los aluviones recientes del río Tordera, depositados en el cauce actual y el lecho de inundación; esta terraza inferior está compuesta por arenas y gravas que pueden alcanzar un espesor de 35m.

La red hidrográfica, caracterizada por el cauce principal del río Tordera y sus principales afluentes (Gualba, Arbúcies, Santa Coloma, Valmanya y Sant Pere) algunos de ellos efímeros. Presenta cotas superiores a 1 700 m de altura y en su desembocadura en el mar se desarrolla un delta aluvial de 21 km² aproximadamente. La respuesta hidrológica de la cuenca está condicionada por una larga estación seca y una húmeda corta; la respuesta de la cuenca a importantes lluvias puede ser incluso inexistente o dar origen a escasa escorrentía. Para el periodo considerado la aportación media es de 170 hm³.

Desde el punto de vista hidrogeológico y de acuerdo a las directivas europeas Directivas europeas, se han caracterizado 5 masas de agua subterránea que afloran total o parcialmente en el ámbito del estudio (ACA, 2005), una de ellas constituye el delta del río. El delta del río Tordera es un acuífero bicapa formado por un acuífero libre que se extiende por toda la llanura deltaica, y otro semiconfinado separado del primero por niveles de arcillas y limos poco permeables. El acuitardo intermedio que separa ambos acuíferos desaparece en los márgenes, favoreciendo la conexión hidráulica entre los dos niveles acuíferos. La explotación del acuífero deltáico es para abastecimiento y regadío agrícola. Actualmente el cultivo mayoritario es de tipo hortícola, con importante dotación de riego en verano. Para una mayor información sobre la cuenca estudiada se remite al lector al informe de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2005).

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada para determinar los impactos producidos por el cambio climático sobre los recursos hídricos consiste en el uso de diversos métodos de forma escalonada. Los modelos numéricos calibrados y validados han sido las herramientas fundamentales para la generación de

escenarios futuros. El periodo base de comparación elegido fue 1984-2008. La múltiple combinación de: modelo climático, periodo temporal, escenarios climáticos, escenarios socio-económicos y métodos de estimación hidrológica tiene como resultado 6 escenarios futuros de recursos hídricos.

El proceso seguido ha sido:

- Estimación de la escorrentía, recarga subterránea y balance en el acuífero mediante modelación numérica para el periodo histórico (1984-2008). Los códigos utilizados fueron HEC-HMS 3.4 (Scharffenberg & Fleming, 2009), Visual BALAN 2.0 (Samper et al., 2005) y Visual MODFLOW 2009.1 Pro (McDonald & Harbaugh, 1988).
- Estimación de los recursos hídricos futuros (superficiales y subterráneos) para el escenario A2 y periodos 2000-2025 y 2025-2050 a partir de los modelos calibrados y validados anteriormente. Los datos climáticos se escalaron a partir del modelo ECHAM5 (www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html, Max Planck).
- Estimación de los recursos hídricos futuros bajo escenarios sostenible y tendencial de cambios de usos del suelo y según los escenarios climáticos y periodo temporal definido.

2.1. Datos

Para el estudio del periodo histórico (1984–2008) se utilizaron los datos meteorológicos diarios de precipitación y temperatura de cinco estaciones climáticas existentes en la zona, que fueron proporcionados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET). Una vez completadas las series se realizaron tests de homogeneidad (Nzewi, 2001) de los datos disponibles. La distribución espacial de la precipitación se calculó mediante polígonos de Thiessen.

En el estudio hidrológico, los datos correspondientes a seis estaciones de aforo (fig. 1) proporcionados por la Agència Catalana de l'Aigua fueron analizados. Los registros disponibles, se extienden a lo largo de todo el periodo de estudio, con alguna excepción debido a razones técnicas.

Los mapas de uso del suelo, para el periodo histórico y escenarios futuros, se han realizado con el modelo LCM (Land Change Modeller) mediante el programa IDRISI Taiga. Fueron proporcionados por el Institut de Recerca i Tecnologia Agraria-IRTA (www.irta.cat/en-US/Pages/default.aspx) y el European Topic Centre for Spatial Information and Analysis (ETC/LUSI, <http://terrestrial.eionet.europa.eu/Consortium/UAB>). Los parámetros físicos del suelo (contenido en arcilla y limo, grupo hidrológico) para realizar el balance, se obtuvieron a partir de la clasificación internacional

de los grupos hidrológicos de suelos definida en los mapas de suelos. Los cambios futuros de usos del suelo y cubierta vegetal se basaron en los datos procedentes del Pla Territorial General de Catalunya (GOV/157/2010), que define la planificación para el horizonte 2030 como adaptación al cambio global (escenario sostenible) y escenario tendencial (sin adaptación). Se estimó que la incertidumbre asociada a extrapolar estos datos a escenarios más lejanos era demasiado elevada, dada la ausencia de planes urbanísticos de usos del suelo más allá del año 2030.

Las unidades acuíferas existentes y sus propiedades hidrogeológicas están basadas en el mapa hidrogeológico de la zona (ICC, 1992) y la definición del ACA (2005). Se debe destacar dado que la superficie de afloramiento de los acuíferos en la zona estudiada no se corresponde exactamente con la extensión de la cuenca superficial para realizar un balance de aguas subterráneas, se optó por determinar la recarga subterránea en la cuenca.

Los datos para el cálculo del balance en el acuífero deltaico proceden del modelo numérico elaborado por el ACA y basado en el código MODFLOW (ACA, 2009).

La gestión de los datos espaciales se llevó a cabo mediante un SIG basado en ArcGIS 9.2 (ESRI®). La superficie topográfica de trabajo se basó en un MDT a escala 10 x 10 m proporcionado por ETC/LUSI.

2.2. Modelación numérica

2.2.1. Lluvia-Escorrentía

El análisis del régimen de escorrentía y su modelación numérica se efectuó en dos fases. En una primera se desarrolló un modelo de caja negra lluvia-escorrentía basado en el método del Numero de Curva para una subcuenca de 124.25 km² de extensión (ACCUA, 2011) situada en el extremo oeste de la cuenca (Sant Celoni). El modelo que considera precipitación diaria y caudal (no mostrado en este trabajo), se definió con el objetivo de seleccionar datos y parámetros para posteriormente introducirlas en un modelo hidrológico distribuido con base física. En una segunda fase para simular los procesos lluvia-escorrentía en lluvias de corta y larga duración se aplicó el modelo espacialmente distribuido HEC-HMS 3.4. El código se seleccionó en función de su fácil aplicación, la adaptabilidad a esta investigación y sus objetivos, y el uso en numerosas aplicaciones similares (Candela et al., 2012b; Chu & Steinman, 2009).

La cuenca del Tordera se subdividió en 9 subcuencas de similares características topográficas, usos del suelo y cobertura vegetal y tipo de suelo, entre otros rasgos fisiográficos. El modelo basado en un formato malla (celdas de 1000 x 1000 m para precipitación y de 30 x 30 m para los procesos lluvia/caudal) y

su gestión con SIG mediante la herramienta HEC-GeoHMS 5.0 (Fleming & Doan, 2010), permite a partir de un MDT la elaboración de datos de pendientes, cauces principales y sub-división de cuencas, entre otros datos hidrológicos. La condición de contorno (input) fue la precipitación observada y la condición inicial para la resolución de las ecuaciones de flujo se definió a partir del estado inicial de humedad de la cuenca. Las salidas principales del modelo (output) están constituidas por los caudales y todos los procesos hidrológicos originados en la cuenca

(ET, caudal base, transmisión entre capas del suelo, caudales laterales, etc.). En términos de cálculo el modelo comienza la simulación con los parámetros representativos del estado inicial del sistema (input) para la parametrización del modelo en 4 capas o niveles. La calibración se realizó para el periodo enero 1984-Julio 1987 y la validación para Julio 2005-Septiembre 2006 (datos correspondientes a la estación de aforos de Can Serra, fig. 1). Los parámetros utilizados para el modelo se muestran en la tabla 1.

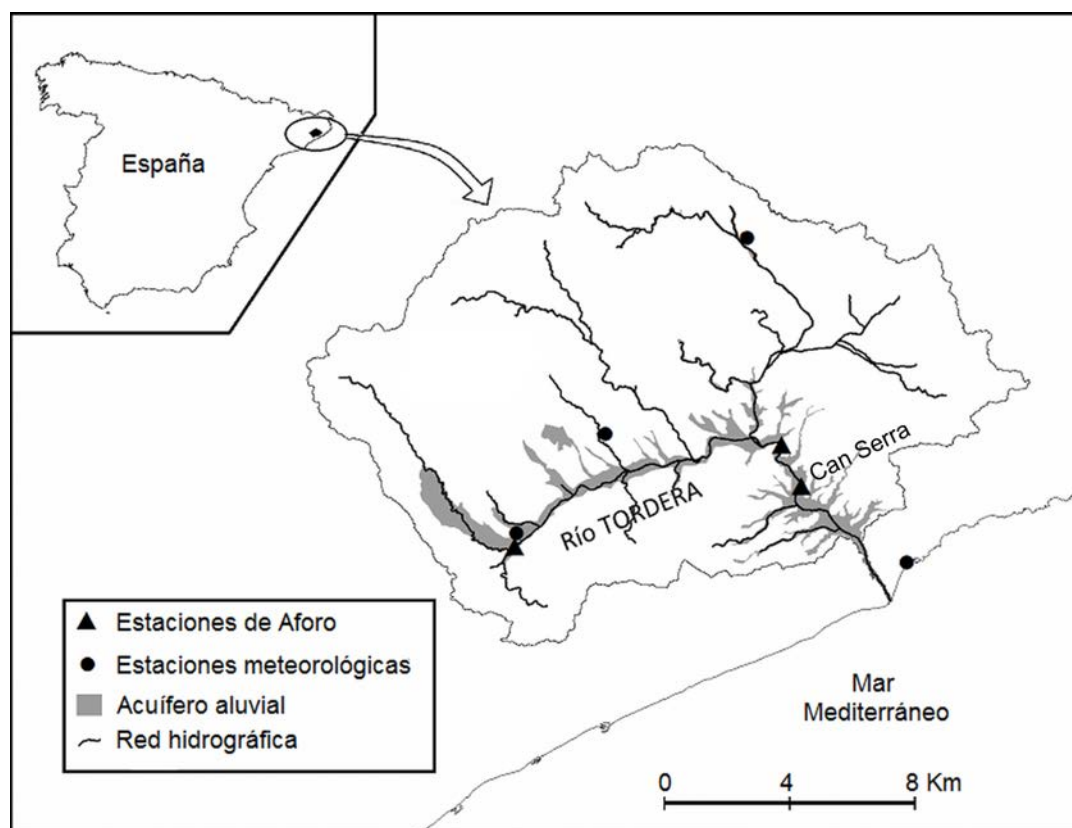


Figura 1. Situación de la zona de estudio

Tabla 1. Valores característicos de la cuenca empleados en la simulación del modelo hidrológico

Parámetro	
Cobertura vegetal (%)	1
Superficie (%)	1
Suelo (%)	1
Almacenamiento en cobertura vegetal (mm)	2
Almacenamiento en superficie (mm)	28
Infiltración máxima (mm/h)	25
Almacenamiento en suelo (mm)	200
Almacenamiento zona de tensión del suelo (mm)	193

La verificación de los datos simulados respecto a las observaciones se realizó mediante inspección visual y estadísticos (Legates & McCabe, 1999).

En la verificación se aplicó el Nash-Sutcliffe Model Efficiency Index (EF), y el coeficiente de determinación R^2 .

Las predicciones futuras se obtuvieron mediante la ejecución del modelo calibrado y validado con datos meteorológicos procedentes del escalado de ECHAM5.

2.2.2. Aguas subterráneas. Recarga y modelación numérica

La obtención de la recarga natural se efectuó mediante el código Visual BALAN 2.0. Para la modelación del flujo del acuífero cuaternario se partió del modelo en régimen transitorio calibrado y validado del ACA (ACA, 2009), basado en el código Visual Modflow 3.0.

La recarga subterránea, basada en el método del balance del agua en el suelo, se obtuvo con Visual BALAN 2.0. El modelo distribuido calcula el balance diario de agua en el suelo y en la zona no saturada de acuerdo a: evaluación de la recarga natural por precipitación y retorno de riego para el periodo histórico (1984-2008); análisis de contraste de los resultados obtenidos en base a los datos de aforo de la estación Can Serra (fig. 1) calibrados y validados mediante HEC-HMS; y finalmente estimación de la recarga futura a partir del modelo calibrado y con nuevos vectores de cambio (temperatura y precipitación según escenarios simulados por el ECHAM5, evapotranspiración y usos del suelo). El código proporciona como resultado del cálculo los valores de la escorrentía superficial para el periodo modelado, dato utilizado para realizar un análisis de contraste con los datos de aforo medidos en la estación de Can Serra (1984-2008). Esta aproximación se aplicó debido a la inexistencia de observaciones piezométricas de calidad para calibrar y validar el modelo.

Las masas de agua subterráneas corresponden a las definidas por el ACA (ACA, 2005). La distribución de usos del suelo y parámetros aplicados en Visual BALAN se obtuvieron del mapa hidrogeológico a escala 1:250.000 (ICC, 1992) y del mapa de usos del suelo. La evapotranspiración real (ETR) se estimó mediante el método de Blaney-Criddle; los valores diarios de la evapotranspiración potencial (ETP) proceden del IRTA. La generación de escenarios futuros de usos del suelo se basó en información existente respecto a tendencias socioeconómicas esperables a nivel sostenible y tendencial. Para ambos casos el cambio de usos del suelo urbano es inferior al 1% respecto al histórico.

El área modelada del acuífero cuaternario se extiende desde la cabecera del río hasta su desembocadura en el mar (fig. 1) y con una superficie de 56 km² de extensión para el acuífero superficial y 18 km² para el profundo. El modelo está constituido por 4 capas: la capa 1 corresponde al acuífero superficial y se extiende sobre toda la zona modelada, la capa 2 es el acuitardo (cuña limosa), y las capas 3 y 4 el acuífero profundo, que al presentar diversas propiedades hidráulicas y extensión se han subdividido. Ambos

acuíferos (1 y 3) se encuentran en contacto hacia la zona media del valle donde reciben la recarga de origen superficial. El nivel acuífero 4 no aflora al encontrarse en la zona final del delta. La malla superpuesta está formada por 60 filas y 362 columnas de 100m x 100m. En el modelo, el cálculo de la recarga natural por la lluvia y retorno de riego para el periodo 1984-2008 (histórico) se ha realizado a partir de los datos de las estaciones meteorológicas de Blanes y Breda. Los datos correspondientes a extracciones por pozos (abastecimiento urbano, regadío, industrial), nivel piezométrico, así como los pozos de recarga artificial existentes proceden del informe del ACA. Para una información más detallada se remite al lector al informe ACA (2009).

Por lo que respecta al modelo conceptual, geometría de las capas y parámetros hidráulicos del acuífero cuaternario son los correspondientes al modelo original ACA (2009). Se han realizado dos simulaciones en la unidad acuífera con el modelo descrito: respuesta del sistema en las condiciones históricas (modelo base proporcionado por el ACA ejecutado para el periodo histórico 1984-2008) y respuesta producida en los diversos términos del balance bajo el escenario climático A2 (2000-2050). La simulación no considera una actualización de la demanda futura; para el escenario simulado se supone que el caudal de los pozos de extracción y de recarga se mantiene en el nivel histórico.

2.3. Cambio climático, proyecciones utilizadas

Las series diarias de precipitación y temperatura futuras se generaron a partir del Modelo de Circulación General-GCM ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) que permite cuantificar variables y simular su comportamiento a partir de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (escenarios) a una escala de 50x50 km. El ECHAM5 proporciona resultados para el A2 en los horizontes temporales 2013-2037; 2038-2062 y 2068-2092. Se seleccionó el A2 (cambio severo) definido por el IPCC (2001) para el periodo 2000-2050.

2.3.1. Series climáticas y generación de escenarios. Escalado

Los resultados derivados de las proyecciones de los modelos globales no son adecuados para evaluar los efectos del cambio climático a nivel regional o local. Por ello, y para que las simulaciones sean representativas a la escala de trabajo es necesario el escalado (downscaling) de los datos procedentes de los modelos globales (Bourauoi et al., 1999; Hewitson & Crane, 1996).

Las series generadas constituyen los datos previos de entrada para los modelos de simulación aplicados en esta metodología. Las series futuras de precipitación se generaron mediante cadenas de Markov y la distribución de Weibull; para la temperatura se aplicaron modelos ARMA (Bourauoi et al., 1999).

La metodología utilizada genera 200 series de 50 años de longitud para cada estación meteorológica y escenario climático seleccionado. Dada la dificultad de realizar tal número de simulaciones, se seleccionó una única serie representativa del clima futuro en cada estación meteorológica de acuerdo a criterios estadísticos. Para una descripción detallada de la metodología aplicada se remite al lector a Candela et al., (2009).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Periodo histórico

Los resultados de la calibración y validación del modelo superficial mediante HEC-HMS 3.4., se muestran en la figura 2. La mayoría de los picos han sido reproducidos correctamente por el modelo, y la diferencia entre simulado y observado (entre el 5 y el 1,5%, rango de error aceptable según Majidi y Shahedi, 2012) se puede atribuir a diferencias en la distribución espacial de la precipitación, dado el limitado número de estaciones disponibles.

La aportación media en la cuenca es de 152 hm³, con un mínimo de 27 hm³ y un máximo de 212 hm³ para el periodo considerado.

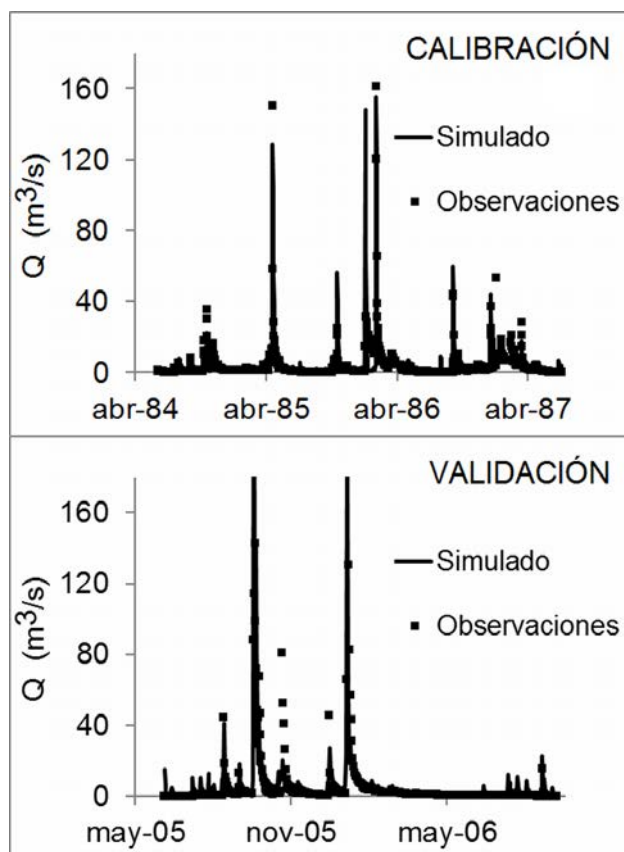


Figura 2. Resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico. Periodo histórico

Por lo que respecta a la recarga subterránea a nivel de cuenca (fig. 3), el valor medio anual es

de 37.8 hm³, como consecuencia de que gran parte de la cuenca está compuesta por materiales impermeables (fundamentalmente rocas graníticas) que impiden una mayor recarga profunda. La recarga es mayoritariamente de tipo hipodérmico; se observan valores inferiores a la media histórica a partir del año 2006. La importancia de la recarga subterránea es más destacable en la zona norte de la cuenca, posiblemente por la contribución forestal y la mayor presencia de cultivos (26%).

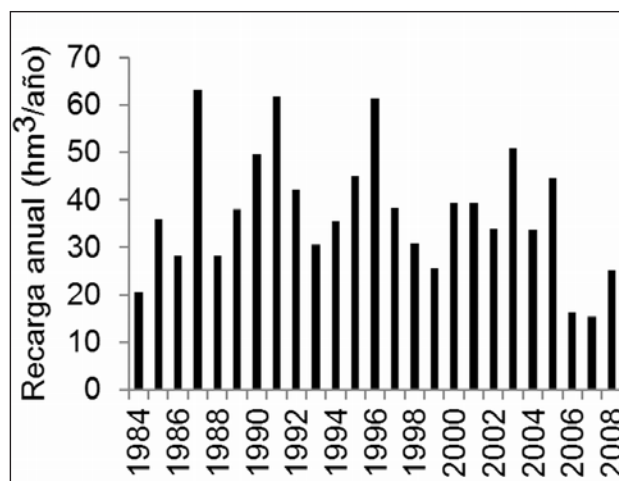


Figura 3. Valores de la recarga anual para el periodo histórico (1984-2008)

Los resultados obtenidos con Visual BALAN solo presentan una desviación del 10% aproximadamente entre medidas de los aforos superficiales y los valores obtenidos del estudio de la recarga distribuida a las masas subterráneas. Dadas las características de este análisis de contraste, la diferencia obtenida se considera aceptable para este estudio. La calibración con los datos de aforo (a partir de HEC-HMS) permitió ajustar los coeficientes correspondientes al flujo preferencial, escorrentía, evapotranspiración real y de recarga en tránsito, así como parámetros de la zona no saturada.

Según los resultados de la simulación del modelo flujo para el acuífero cuaternario el mayor porcentaje de la recarga corresponde a la infiltración por el río. Por lo que respecta al resto de los parámetros del balance se debe destacar una pequeña disminución del almacenamiento, de valor muy próximo al nivel de incertidumbre; muy posiblemente el acuífero presente equilibrio entre las entradas (recarga natural por la precipitación y río, entrada de agua del mar y recarga por pozos) y las salidas (salidas por río, bombeos y mar). Los resultados del balance para el periodo histórico obtenidos se muestran en la figura 4.

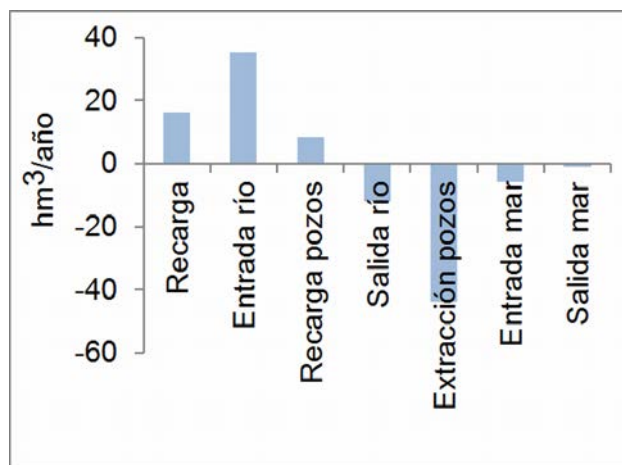


Figura 4. Resultados del balance en el modelo de flujo del acuífero cuaternario. Periodo histórico

3.2. Escenarios A2 (2025, 2050). Impactos hidrológicos

La simulación de escenarios futuros generados (A2) indican una disminución generalizada de la

precipitación respecto a los datos históricos (707 mm y 15.4°C), siendo 644 mm para los primeros 25 años (2000-2024) y de 611 mm para el final del periodo (2025-2050). La temperatura presenta una tendencia creciente, con un aumento de 1.6°C para el periodo 2000-2050. Los resultados de los diversos escenarios se muestran en la tabla 2.

El efecto de la variación de lluvia y temperatura en el caudal del Tordera derivado del escenario climático A2 se muestra en la Figura 5. En el gráfico se aprecia que una disminución de lluvia del 8.9% y 13.6% para los escenarios 2000-2024 y 2025-2050 respectivamente se traduce en una disminución de la aportación superficial del 29.4% y 34.1% para ambos escenarios. Las aportaciones medias previstas para el escenario A2 fueron de 107.7 hm³ (2000-2024) y 100.5 hm³ (2025-2050). La reducción presenta dos componentes: una primera debida a la propia disminución de la precipitación, consecuencia de los modelos de clima considerados; y una segunda de mayor importancia asociada a las características hidrológicas de la cuenca (variaciones de humedad del suelo, entre otros parámetros).

Tabla 2. Cuadro resumen de aportaciones anuales medias en la cuenca en estudio y escenario propuesto

	Aportaciones (hm³)		Recarga (hm³)		Precipitación (mm)		Temperatura (°C)	
Histórico (1984-2008)	152.6		37.8		707		15.4	
Escenarios	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050
A2	107.7 (-29.4%)	100.5 (-34.1%)	34.3 (-9.3%)	32.4 (-14.3%)	644 (-8.9%)	611 (-13.6%)	15.9 (+0.5°)	17 (+1.6°)
A2_sostenible	106.8 (-30%)	99.7 (-37.4%)	33.6 (-11.1%)	31.8 (-15.9%)				
A2_tendencial	107.5 (-29.6%)	100.3 (-34.4%)	33.3 (-11.9%)	31.5 (-16.7%)				

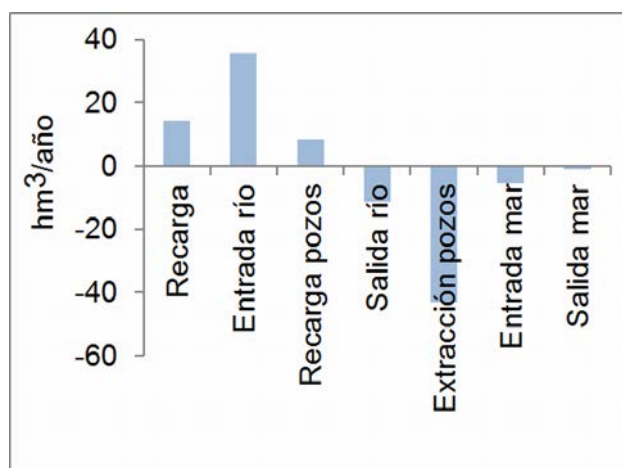


Figura 5. Resultados del balance en el modelo del acuífero cuaternario en el escenario A2 y horizonte 2050

La recarga en el primer periodo temporal (2000-2024) se reduce respecto a la histórica en un 9.3% (34.3 hm³), y alcanza el 14.3% (32.4 hm³) para el periodo 2025-2050. Sus efectos sobre la cuenca muestran un mayor retardo que los producidos en la escorrentía y de menor magnitud (fig. 5).

Por lo que respecta a la variación de los parámetros del modelo de flujo subterráneo en el acuífero, los cambios en el sistema para el escenario A2 se muestran en la figura 6. Los resultados para el escenario A2 y el periodo 2000-2050 muestran que el factor más importante que condiciona el almacenamiento es la recarga natural al acuífero, que disminuye en un 12% respecto el periodo histórico. Se observa que aumenta ligeramente el valor de recarga por el río y de la intrusión salina. La disminución de los bombeos por los pozos se

produce tal vez debido a un descenso en el nivel piezométrico del acuífero y en consecuencia, una disminución de las extracciones. Sin embargo, se debe destacar que los valores obtenidos se sitúan próximos al error o la incertidumbre asociada al cálculo, por lo que el resultado debe considerarse solo indicativo del posible cambio esperado.

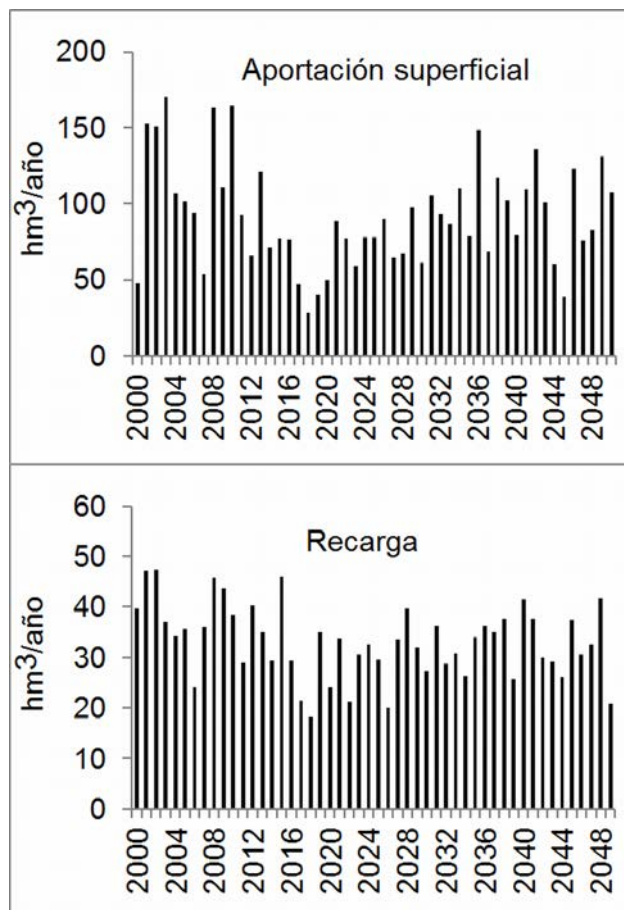


Figura 6. Recursos hídricos superficiales y subterráneos anuales para el escenario A2 y horizonte 2050

3.3. Recursos hídricos y escenarios socioeconómicos prospectivos

Los resultados de combinar el escenario A2 de cambio climático con las proyecciones previstas sobre los usos del suelo y sus cambios (sostenible y tendencial), y su impacto sobre los recursos hídricos se muestran en la tabla 2. La comparación se ha realizado con los datos disponibles históricos de usos del suelo correspondientes al año 2005, considerado como nivel base para esta comparación. Los resultados futuros, proporcionados por el modelo LCM (escenarios tendencial y sostenible), prevén mínimos cambios de usos del suelo en la cuenca.

Los impactos en los recursos hídricos como resultado de acoplar el cambio climático y los dos escenarios socioeconómicos definidos indican la poca incidencia de los cambios previstos de usos del suelo sobre la variación de los recursos hídricos (Tabla 2). Dado su

escaso impacto sobre los recursos hídricos, puede concluirse que la variación prevista de precipitación y temperatura en la cuenca son los parámetros condicionantes de la disminución de los recursos futuros.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una metodología integrada para la evaluación cuantitativa de los impactos derivados del cambio climático en los recursos hídricos superficiales y subterráneos. La metodología aplicada a la cuenca del Tordera y basada en las previsiones del modelo ECHAM5, indica que son esperables una máxima disminución de la precipitación del 13.6% y un aumento de 1.6 °C de la temperatura para el escenario climático A2 y periodo 2000-2050. Las predicciones para el año 2050 indican una disminución del 31.8% de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la cuenca. No se ha observado un incremento de la torrencialidad debido a fenómenos extremos. La disminución de la recarga subterránea respecto al descenso de la precipitación observada presenta un cierto retardo en el tiempo, resultado de la no linealidad de los procesos de recarga subterránea, de la distribución del proceso a lo largo del año y de las características del suelo y vegetación. De acuerdo a las simulaciones realizadas para los escenarios socioeconómicos definidos en la cuenca (establecidos para 2030), las variables climáticas son las mayores condicionantes de la disponibilidad futura de los recursos hídricos. El cambio de usos del suelo no constituye un factor condicionante debido a la pequeña variación del porcentaje de cambios previstos.

Respecto a la metodología aplicada, debe destacarse la dificultad derivada de la cantidad y calidad de las series meteorológicas y de aforo disponibles, hecho de especial relevancia para la simulación de escenarios climáticos futuros. Para definir el comportamiento del sistema hidrológico, su calibración y ajustes solo se dispuso de series continuas no superiores a 5 años, los datos de aforo disponibles presentaron escasa continuidad en el tiempo. Adicionalmente, para la estimación de los estadísticos y obtención de series futuras de los escenarios de cambio climático el generador climático requiere una calibración inicial basada en datos observados; ello implica la necesidad de trabajar con series de suficiente longitud y cantidad de datos. Uno de los aspectos a destacar ha sido la aplicación del análisis de contraste con Visual BALAN, que ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad para evaluar la bondad de los resultados obtenidos.

Sobre los resultados obtenidos y como conclusión final, es importante destacar que la incertidumbre derivada de los datos históricos disponibles y la propia incertidumbre de los modelos climáticos (Swart et al., 2009) tienen un efecto directo sobre

las estimaciones realizadas. Así, la incertidumbre asociada a los modelos GCM en algunos casos puede ser superior a las predicciones a largo plazo (Chen et al., 2011). Por ello, los resultados obtenidos en este estudio deben considerarse como indicativos de la tendencia esperable en los recursos hídricos de la cuenca estudiada como consecuencia del cambio global.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en un amplio proyecto de investigación, ACCUA, financiado por la Fundació Caixa de Catalunya y coordinado por el CREA. Asimismo, se agradece la colaboración en la investigación de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), CREA, IRTA y ETC/LUSI.

REFERENCIAS

- ACA. 2005. Caracterització de masses d'aigua i anàlisi del risc d'incompliment dels objectius de la Directiva Marc de l'Aigua (2000/60/CE) a Catalunya. Conques intra i intercomunitàries. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Agència Catalana del Agua. Barcelona (Spain). 860 p.
- ACA. 2009. Document de síntesi del sistema fluviodeltàic del curs mitjà i baix del riu Tordera. Juliol 2009. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua. Barcelona (Spain). 151 p.
- ACCUA. 2011. Adaptacions al Canvi Climàtic en l'Ús de l'Aigua. Catalunya Caixa. Obra Social. Barcelona, Spain. 221 p.
- Allen, D.M., Mackie, D.C., Wei, M. 2004. Groundwater and climate change: A sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 12 (3): 270-290.
- Bouraoui, F., Vachaud, G., Li, L.Z.X., Le Treut, H., Chen, T. 1999. Evaluation of the impact of climate changes on water storage and groundwater recharge at the watershed scale. *Climate Dynamics* 15 (2): 153-161.
- Brouyère, S., Carabin, G., Dassargues, A. 2004. Climate change impacts on groundwater resources: Modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal* 12 (2): 123-134.
- Burns, D.A., Klaus, J., McHale, M.R. 2007. Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New York, USA. *Journal of Hydrology* 336(1-2): 155-170.
- Candela, L., Elorza, F.J., Jiménez-Martínez, J., von Igel, W. 2012a. Global change and agricultural management options for groundwater sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture* 86 120-130.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M. 2012b. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment* 440 (253-260).
- Candela, L., von Igel, W., Javier Elorza, F., Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *Journal of Hydrology* 376 (3-4): 510-527.
- Cuo, L. et al. 2011. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington. *Hydrological Processes* 25 (11): 1729-1753.
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401 (3-4): 190-202.
- Chu, X., Steinman, A. 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135 (1): 119-124.
- Falloon, P., Betts, R. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation-The importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment* 408 (23): 5667-5687.
- Febrillet Huertas, J.F., José Clases, S., Bello, L., Chalas, J. 2014. Simulación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y estrategias de adaptación, usando el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), en la cuenca de la región Yaque del norte de la República Dominicana. *Aqua-Lac* 6 (2): 21-36.
- Fleming, M.J., Doan, J.H. 2010. HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, V 5.0. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, HEC Davis (CA, USA). 197 p.
- Green, T.R. et al. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405 (3-4): 532-560.
- Grieneisen, M.L., Zhang, M. 2011. The current status of climate change research. *Nature Climate Change* 1 (2): 72-73.
- Hagg, W., Braun, L.N., Kuhn, M., Nesgaard, T.I. 2007. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments. *Journal of Hydrology* 332 (1-2): 40-53.
- Hewitson, B.C., Crane, R.G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research* 7 (2): 85-95.
- Hsu, K.C., Wang, C.H., Chen, K.C., Chen, C.T., Ma, K.W. 2007. Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal* 15 (5): 903-913.

- ICC. 1992. Mapa d'àrees hidrogeològiques de Catalunya, 1:250.000. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona (ESPAÑA).
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. Cambridge (UK) and New York (N.Y. USA). 881 p.
- Kerr, R.A. 2005. Confronting the Bogeyman of the climate system. *Science* 310 (5747): 432-433.
- Kundzewicz, Z.W., Somlyódy, L. 1997. Climatic Change Impact on Water Resources in a Systems Perspective. *Water Resources Management* 11(6): 407-435.
- Legates, D.R., McCabe Jr, G.J. 1999. Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35 (1): 233-241.
- Majidi, A., Shahedi, K. 2012. Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green - Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering* 1 (1): 5-9.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. 1988. MODFLOW, A Modular three dimensional finite- difference groundwater flow model. U. S. Geological Survey. 586 p.
- Norrant, C., Douguédroit, A. 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology* 83 (1-4): 89-106.
- Nzewi, E.U. 2001. The McGraw-Hill civil engineering PE exam depth guide: water resources. McGraw-Hill. Michigan (USA). 350 p.
- Roeckner, E. et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. Report No. 349. Max Planck Institute for Meteorology. Hamburg, Germany.
- Ruth, M., Coelho, D. 2007. Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change. *Climate Policy* 7 (4): 317-336.
- Samper, J., Huget, L., Ares, J., Garcia-Vera, M.A. 2005. User's guide VisualBALAN v.2.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Civil Engineering School of A Coruña, A Coruña (España). 150 p.
- Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A.J., Whitfield, P.H. 2007. Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology* 333 (2-4): 165-181.
- Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J. 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS v3.4. User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, HEC Davis (CA, USA). 310 p.
- Serrat-Capdevila, A. et al. 2007. Modeling climate change impacts - and uncertainty - on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora). *Journal of Hydrology* 347 (1-2): 48-66.
- Swart, R., Bernstein, L., Ha-Duong, M., Petersen, A. 2009. Agreeing to disagree: Uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC. *Climatic Change* 92 (1-2): 1-29.
- Werritty, A. 2002. Living with uncertainty: Climate change, river flows and water resource management in Scotland. *Science of the Total Environment* 294 (1-3): 29-40.

EQUIVALENCIA DE LAS TASAS DE TRANSPORTE DE MASA LOCALES Y GENERALES EN LOS CAUCES NATURALES EN “EQUILIBRIO DINAMICO”: UNA NUEVA DEFINICIÓN DE LOS MECANISMOS DE FORMACIÓN DE LAS PLUMAS DE CONTAMINACIÓN

EQUIVALENCE BETWEEN LOCAL AND GENERAL MASS TRANSPORT RATES IN NATURAL STREAMS IN “DYNAMIC EQUILIBRIUM”: A NEW DEFINITION OF FORMATION MECHANISMS FOR CONTAMINATION PLUMES

Constaín Aragón, Alfredo José ¹; Mesa Fernández, Duvan Javier ²; Peña-Guzmán, Carlos³

Resumen

Usualmente en la teoría del transporte de masa en los flujos naturales, el énfasis de la investigación se ha puesto en la descripción y explicación del proceso de transporte mismo, pero poco o nada se encuentra en la literatura sobre los mecanismos específicos de formación de la pluma de soluto. Esta circunstancia es desafortunada toda vez que dichos mecanismos delimitan de forma importante la evolución posterior de la mancha de contaminante. En este artículo se explora una aproximación detallada a la génesis de las nubes de trazador a partir de la idea de “equilibrio local-general” de las tasas de transporte de masa, derivado de conceptos termodinámicos implícitos en la condición de “equilibrio dinámico” para los cauces naturales. Esta evolución se plantea numéricamente por medio de una función de estado, ϕ , que enlaza aspectos generales y locales del flujo.

Palabras clave: Estudios de calidad de aguas, hidráulica, dispersión, geomorfología

Abstract

Usually in mass transport theory in natural flows, emphasis of research had been put in description and explanation of the transport process itself, but a little it is found in literature over the specific formation mechanisms of solute plumes. This circumstance is unfortunate since these mechanisms limit in an important way the further evolution of contaminant cloud. In this article it is explored a detailed approach of genesis of tracer plumes starting from idea of “local-general equilibrium” of mass transport rates, derived from thermodynamic concepts implied in condition of “dynamic equilibrium” for natural streams. This evolution it is stated numerically by means of a state function, ϕ , which links general and local aspects of flow.

Key words: Water quality studies, hydraulics, dispersion, geomorphology

INTRODUCCIÓN

1. El concepto clásico de formación de la pluma de trazador (contaminante)

Revisando las referencias técnicas en la literatura sobre la formación de las plumas de trazador (contaminante) en los cauces naturales, salta a la vista que la mayoría de autores (French R., 1987) (Fischer H.B., 1966) toman el proceso inicial como

uno en el que lo más importante es considerar el principio de conservación del impulso lineal. Figura 1 A. Sin embargo queda flotando la pregunta (válida) sobre si otros procesos, no ya de la inyección en sí misma, sino lo que sucede en el entorno (a veces lejano), pueden influenciar de alguna manera la evolución inicial del trazador en el flujo. Figura 1 B.

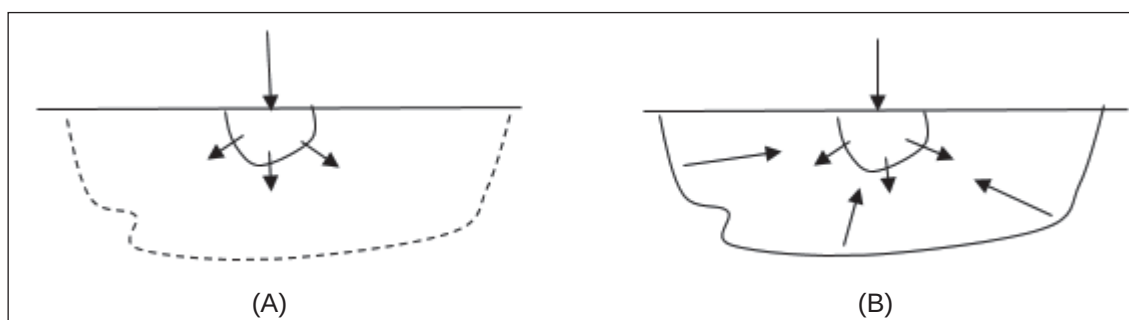


Figura 1. Inyección sin interacción y con interacción con el medio

¹ Gerente I+D Hydrocloro Tech., Bogotá, Colombia, alfredo.constain@gmail.com

² Decano Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomas de Aquino, Bogotá, Colombia.

³ Profesor Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomas de Aquino, Bogotá, Colombia.

Recibido: 29/12/2014

Aceptado: 28/02/2015

Una respuesta a esta pregunta paradójicamente no es contemporánea sino que surgió hace más de 60 años en los trabajos del connotado investigador norteamericano Luna B. Leopold, quien en compañía de otros científicos del USGS consolidaron el concepto de “Equilibrio dinámico” para explicar los pasos de formación de la geomorfología de los cauces. Esta teoría tenía implícito el bagaje físico que permite poner de relieve los mecanismos de interacción entre “todo” el cauce y la zona “local” donde ocurre la inyección y formación de la pluma.

2. Las dificultades del método corriente para adentrarse en los primeros momentos en la evolución de la pluma de soluto

El principio de conservación del impulso lineal naturalmente se puede aplicar a cualquier situación física como es la penetración súbita de las partículas de trazador en el agua y su inmediata interacción con las partículas del líquido. El intercambio de esta magnitud entre las partículas del soluto inyectado y las del líquido que lo recibe, simplemente realiza una primera dispersión de las primeras debido a la aleatoriedad de las colisiones y por lo tanto tiene un alcance limitado y no es posible establecer un modelo que permita avizorar las etapas subsecuentes. Por otro lado, al tratar de aplicar teorías estructurales del transporte de masa en los flujos naturales para resolver la pregunta, como por ejemplo la de Advección-dispersión, se encuentra uno con la imposibilidad de que ellas den respuestas coherentes

pues requieren que el análisis se haga en la condición llamada de “mezcla completa” (cuando el soluto cubre casi homogéneamente la sección transversal de su flujo) lo que es difícilmente alcanzable en los primeros instantes de evolución de la pluma de trazador. (Fischer H.B., 1967) (Holley E.R., 1969).

Estas dos circunstancias hacen que sea necesario plantear nuevos modelos al problema, especialmente que tengan la posibilidad de integrar efectos “lejanos” y no estén restringidos por la condición de “mezcla completa”. Para entender cabalmente este desarrollo es necesario revisar algunos de los temas antecedentes.

3. Los antecedentes a la solución del problema de la formación de la pluma de soluto en la teoría de Luna B. Leopold

Un hecho observado en estos procesos fluviales es que existe una relación evidente entre las fuerzas que tallan los cursos naturales de agua y la forma y las proporciones de los lechos de los mismos. Así por ejemplo en un cauce estrecho la fuerza del agua tallará preponderantemente las paredes laterales (A), tratando de ganar más ancho; por otro lado en cauces anchos, esta fuerza tenderá a profundizar el cauce (B). De esta forma los procesos de “tallaje” en un sentido u otro tenderán a equilibrarse dinámicamente en un cierto punto (C). Figura 2.

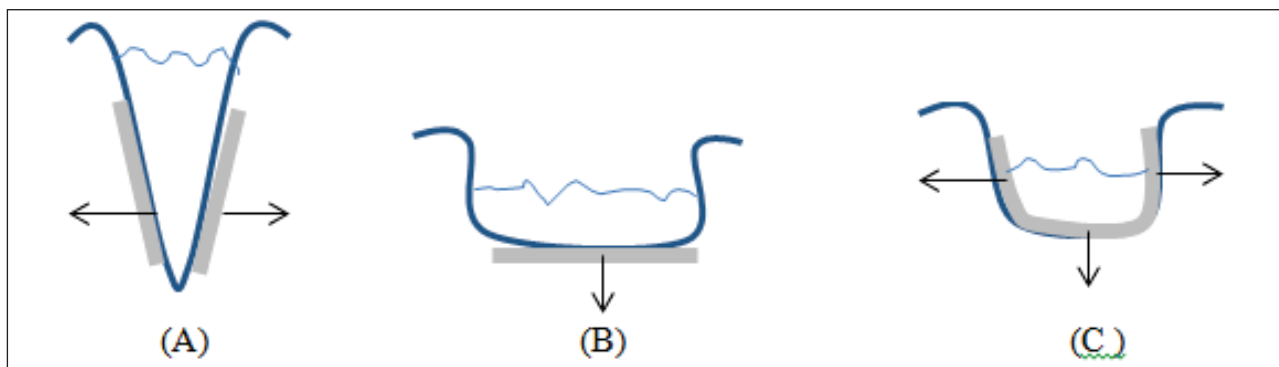


Figura 2. Procesos de “tallaje” en el lecho

El “equilibrio dinámico” (o “Estado estable” como también se le llama) ocurre entonces cuando la sección transversal del cauce logra un valor tal que las fuerzas de “tallaje” en distintas direcciones no predominan la una sobre la otra y la geomorfología del flujo se mantiene aproximadamente en el tiempo. Este estado de “equilibrio dinámico” en el proceso de formación del cauce por el movimiento continuo del agua no solo se interpreta en términos de los cambios en las áreas efectivas de las paredes resistentes del lecho (efecto), sino también, e indisolublemente mediante la velocidad del flujo, la pendiente y la

rugosidad superficial (causas). El efecto final de este proceso de estabilización en sentidos contrarios no solo afecta la dimensión transversal sino también la longitudinal. Así desde el punto de vista del perfil longitudinal del lecho, es que aquellos sitios donde haya una mayor pendiente la deposición de sedimento tratará de suavizar el perfil, y que en aquellos sitios de pendiente “suave” la socavación tratará de “empinar” el perfil, siendo S_b la pendiente. (Christofolletti A., 1981) (Leopold L.B. & Maddock T., 1953) Figura 3.

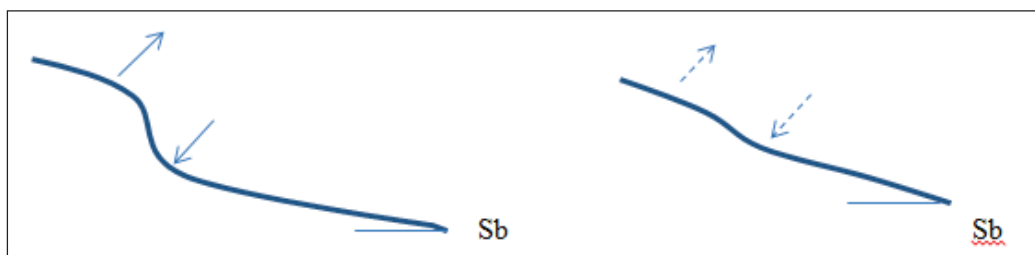


Figura 3. Proceso de igualación del perfil

4. El "equilibrio dinámico" como un proceso que integra diversas informaciones del flujo

El "equilibrio dinámico" puede entonces verse como un fenómeno que integra diversos efectos dinámicos del flujo, permitiendo de alguna forma que la información fluya de las partes "locales" a lo general. Como el transporte de masa en los cauces naturales depende de los mismos parámetros, se puede anticipar que este efecto participa de alguna forma en esa transmisión de información. El objetivo básico de este artículo es mostrar cómo entonces es posible determinar la forma en la que el entorno interfiere con la evolución de las nubes de solutos en los cauces naturales, develando un aspecto teórico con grandes posibilidades de aplicación práctica en los estudios de la hidráulica fluvial.

METODOLOGÍA

Propuesto un objetivo de la investigación, se plantea la siguiente metodología para desarrollar y resolver los diferentes puntos que lo diluciden: 1. Se estudia en primer lugar los aspectos termodinámicos del "Estado estable" que permiten plantear posteriormente mecanismos de transferencia de la información. 2. En seguida se abordan las implicaciones concretas de lo anterior en cuanto a las tasas de transporte en los flujos naturales. 3. Se aplican los conceptos desarrollados al transporte de masa disuelta en el flujo. Aquí se presentan las ecuaciones básicas dentro de las cuales se pueden insertar los conceptos anteriores. 4. Se establecen algunas conclusiones pertinentes.

1. Aspectos termodinámicos para el "equilibrio dinámico" en los cauces naturales: El principio del mínimo trabajo y la distribución uniforme de la energía

Se parte del primer principio de la termodinámica, que liga calor y trabajo aplicado a un sistema cerrado, totalmente irreversible. En este caso se puede ver que la pendiente, S_b aporta un componente inicial de energía potencial gravitatoria, ΔU el cual es transformado en energía cinética, ΔK (movimiento del agua) el cual finalmente es transformado *enteramente* en calor, ΔQ . Figura 4.

$$\Delta U = \Delta Q \quad (1)$$

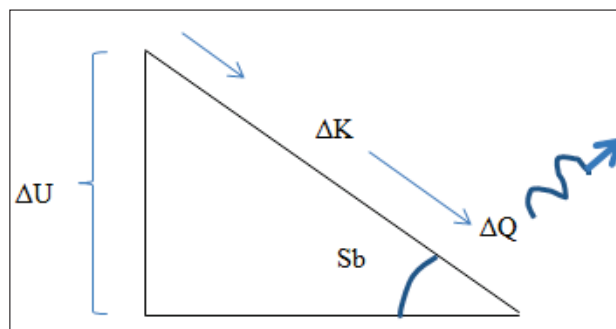


Figura 4. Transformaciones de energía en el flujo

Se ha demostrado que en los sistemas hidrológicos isotérmicos en los que se estudian los cambios de la geomorfología es importante aplicar además el segundo principio de la termodinámica, o principio de la entropía (Prigogine I. & Kondepudi D., 1998). Entonces la producción interna de entropía, S_i , es igual a la entropía intercambiada en la frontera del sistema. Involucrando el calor y la energía y dividiendo ambos miembros por un volumen:

$$\Delta S_i = -\frac{\Delta Q}{T} = -\frac{\Delta U}{T} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta S_i}{V} = -\frac{\Delta Q}{VT} = -\frac{\Delta U}{VT} \quad (3)$$

Ahora bien, si denominamos " q " al caudal ($=V/t$), entonces se puede mostrar que:

$$\left(\frac{\Delta S_i}{\Delta t}\right) \frac{1}{q} = -\frac{\Delta Q}{VT} = -\frac{\Delta U}{VT} \quad (4)$$

Pero el producto " VT " es igual a una presión " P " que es igual a una fuerza por unidad de área, y esta a su vez es igual al trabajo (energía) por desplazamiento unitario, por lo tanto:

$$\left(\frac{\Delta S_i}{\Delta t}\right) \frac{1}{q} = -\frac{\left(\frac{\Delta U}{\Delta X}\right)}{U} \quad (5)$$

Esto implica que el aumento de entropía interna por unidad de volumen lleva continuamente a la disminución de la energía disponible por unidad de desplazamiento, así un *máximo* de entropía interna conlleva un *mínimo* de energía disponible. La entropía creciente dentro del sistema (que tiene que ser evacuada luego) genera una distribución cada vez más uniforme de energía dentro del volumen Ω . Mientras que el miembro izquierdo de la Ec. (5) indica la condición de generación de *mínima* entropía interna, el miembro derecho puede ser interpretada como la distribución más probable distribución de energía en el sistema. (Leopold L.B. & Langbein W.B., 1962)

Esta es otra forma de establecer la convergencia muchas veces verificada entre el *principio del mínimo trabajo y la más probable distribución de la energía en un sistema*. Si esto es así entonces, de acuerdo con la formula estadística de Boltzmann, las probabilidades de los distintos eventos energéticos en el volumen de control Ω , deben iguales.

$$Si = k \times \sum p_i \times \ln(p_i) = \text{Maximo} \quad (6)$$

Implica que:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \dots = p_i \quad (7)$$

2. Equivalencia entre parámetros locales y generales en flujos naturales en “Equilibrio dinámico”: El caso de las tasas de transporte

Lo anteriormente expuesto es significativo para este tipo de sistemas termodinámicos en los que los eventos individuales asociados a los intercambios de energía son *equivalentes* entre sí, o sea *uniformes* (indistinguibles) en todo el volumen (Sistema homogéneo (A)), correspondiente a la distribución estadística *constante* de la figura anterior. Diferente a un sistema en el que estas probabilidades son diferentes para cada punto (sistema heterogéneo (B)), correspondiente a la distribución estadística *variable* de la misma figura. Figura 5.

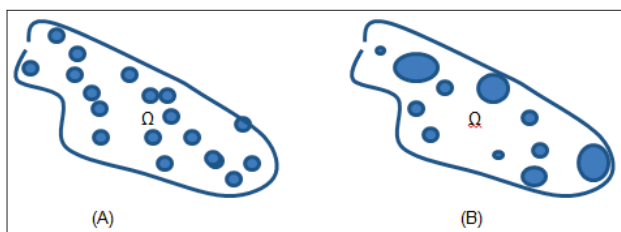


Figura 5. Sistemas homogéneos y heterogéneos

El “equilibrio dinámico” en los cauces naturales va a significar entonces no solo que el flujo neto de masa en las fronteras del sistema es aproximadamente nulo en virtud de la equivalencia entre socavación y deposición (conservación de la masa), sino también que los diversos eventos individuales

descritos mediante los intercambios de energía serán equivalentes, uniformes o indistinguibles en el volumen de control considerado (conservación de la energía y generación de entropía).

Es interesante ahora estudiar las consecuencias concretas que pueden derivarse del “equilibrio dinámico” en los cauces naturales, en especial la circunstancia de la “equiprobabilidad” para diversos sucesos de intercambio de energía dentro del sistema, en este caso la traslación de diferentes porciones de masa dentro del sistema, sea esta una masa disuelta o suspendida en un sistema hídrico.

Partamos del hecho de que en un flujo natural la energía potencial estará representada como se indica a continuación:

$$U = m \times g \times h \quad (8)$$

Supóngase que un cierto intercambio elemental de energía, dentro de un sistema que por motivos de su “localidad” está asociado más bien a un incremento de masa que a uno de altura:

$$\Delta U = \Delta m \times g \times h \quad (9)$$

Si el sistema es *estacionario* (Equilibrio dinámico) entonces los diferentes intercambios de energía derivados de los intercambios de masa de partículas similares de soluto, tendrán igual probabilidad de ocurrir. Pensamos entonces en que los propios intercambios de masa, como distribución estadística en el tiempo estarán “igualados” también por este principio.

Corresponde por lo tanto a una distribución estadística *constante* similar a la de la Figura 5 (A), solo que en lugar de la variable “energía potencial” U se tiene la variable masa M . Interesa además establecer la distribución repartida además en el tiempo.

Para analizar su distribución en el tiempo se define la traslación en el espacio de un elemento de masa Δm en un tiempo Δt . Entonces la “Tasa de transporte de masa” es igual a la razón entre el diferencial de masa movilizada en un punto sobre el diferencial de tiempo en que este evento ocurre. Figura 6.

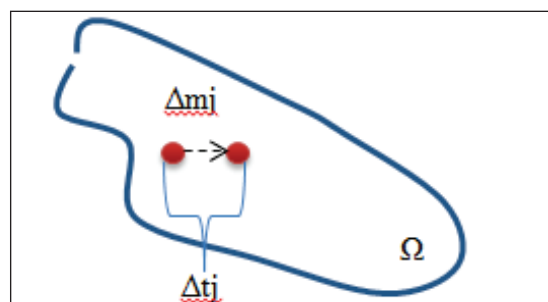


Figura 6. Movilización de un elemento de masa en Ω

Matemáticamente esto se mide así:

$$Ttm_j = \frac{\Delta m_j}{\Delta t_j} \quad (10)$$

La tasa de transporte de masa "general" para el tramo considerado, definida por su valor representativo desde el punto de vista estadístico, es la *esperanza matemática* de los componentes individuales de transporte (Spiridonov V.P. y Lopatkin A.A., 1973). Por lo tanto su definición representativa en todo el dominio del volumen de control Ω será:

$$\langle Ttm \rangle = \frac{1}{j} \sum_j \frac{\Delta m_j}{\Delta t_j} \quad (11)$$

Pero como los elementos discretos de masa transportada son equivalentes (iguales por equiprobables), entonces queda:

$$\langle Ttm \rangle = \frac{1}{j} \times (j \times Ttm_j) \quad (12)$$

Finalmente.

$$\langle Ttm \rangle \approx Ttm_j \quad (13)$$

O sea, la tasa de transporte de masa "general" es convergente con las tasas de transporte de masa "locales" en "estado estable" del cauce, consideradas ellas como indistinguibles (iguales). En este caso lo *general* replica a lo *particular*. Figura 7.

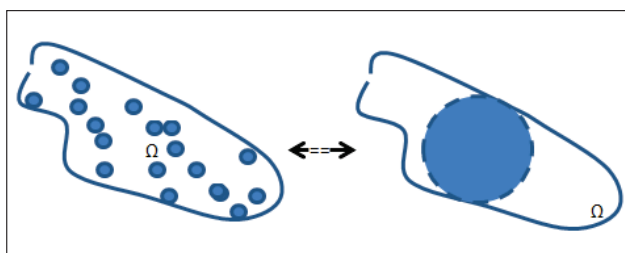


Figura 7. Sucesos locales recíprocamente equivalentes a un suceso general

3. Tasas de transporte de masa en un sistema de flujo en "equilibrio dinámico": Caso de la masa disuelta

Aunque la masa transportada en el flujo puede ser *suspendida* o *disuelta*, es posible realizar un "balance detallado" de ambos tipos de masas desde la óptica de la equivalencia entre "tasas de transporte locales" y "tasa de transporte general" (Prigogine I. & Kondepudi D., 1998). Esta es una consecuencia del equilibrio dinámico, en cuanto en esta condición cada transformación elemental es balanceada por su

correspondiente específica, en el esquema concreto en el que hayan sido planteadas.

Entonces, si:

$$\langle Ttm \rangle (\text{Disuelta} + \text{suspendida}) \approx Ttm_j (\text{Disuelta} + \text{suspendida}) \quad (14)$$

Se sigue que:

$$\langle Ttm \rangle (\text{Disuelta}) \approx Ttm_j (\text{Disuelta}) \quad (15)$$

y

$$\langle Ttm \rangle (\text{Suspendida}) \approx Ttm_j (\text{Suspendida}) \quad (16)$$

Por estas razones se aplicara el principio de equivalencia entre tasas de transporte "locales" y "generales" al componente disuelto, lo que facilita su análisis por medio de trazadores.

3.1. Calculo de la tasa de transporte de masa disuelta "General" el sistema

En un flujo natural el aporte de solutos a la corriente es una característica propia de la cuenca y del caudal al cual se incorporan estas sustancias. Si se llama "Co" a la concentración base resultante de este aporte y "Q" al caudal correspondiente, la relación típica es una curva hiperbólica (Hem, J., 1985). Figura 8.

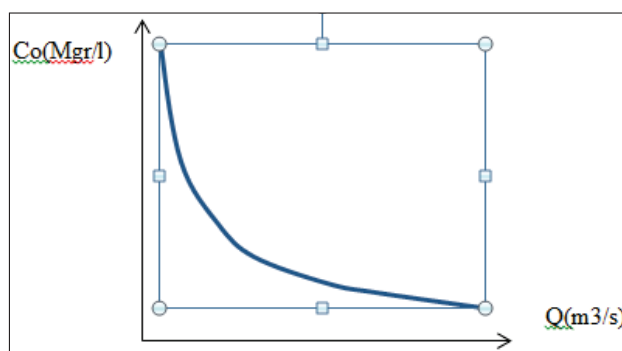


Figura 8. Relación entre concentración base y caudal

Esta relación tiene esta forma toda vez que entre mayor sea el caudal, para un aporte dado de solutos en el lecho, se tendrá un mayor volumen para disolver, o sea menor concentración.

$$Q \times C_o \approx k(\text{Cte}) \quad (17)$$

Atendiendo a la parte dimensional, la "constante" k es miligramos por segundo, o sea una tasa de transporte. Esta tasa es aproximadamente de carácter general pues corresponde a todo el aporte de solutos inyectado a todo el volumen de agua portado por el caudal. En este caso el evento considerado es correspondiente a masa disuelta.

3.2. Tasa de transporte de masa disuelta "local" medida por trazadores

Una forma de medir las tasas "locales" de transporte de masa en los flujos naturales es por medio de trazadores, los cuales vertidos de forma súbita en un punto del tramo del cauce se pueden considerar como "testigos" locales del movimiento "individual" de la masa en el sistema Ω . Figura 9. Para entender apropiadamente como el trazador puede cumplir la misión de medir la tasa local de transporte de masa es necesario estudiar algunos puntos de la dinámica de los mismos.



Figura 9. El trazador como testigo "local" en el flujo

En anteriores artículos los autores han definido a esta función de la siguiente forma, relacionando dos velocidades, una la de dispersión del trazador, V_{disp} , de naturaleza irreversible y medida por su desplazamiento *Random Walk* y la otra la de advección, U , como factor integrante. Aquí Δ y τ son parámetros característicos de desplazamiento y fase del movimiento Gaussiano mono-dimensional de la pluma de trazador. (Constaín A.J., 2013)

$$\phi = \frac{V_{disp}}{U} = \frac{\left(\frac{\Delta}{\tau}\right)}{U} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2E\tau}}{\tau}\right)}{U} = \frac{\sqrt{2E}}{U\tau} \quad (18)$$

Como quiera que V_{disp} mida la rapidez con que las partículas de trazador se alejan recíprocamente, es una función que representa la reacción del sistema a la ruptura súbita del equilibrio químico, y por lo tanto es un potencial termodinámico. La naturaleza especial de Φ se puede caracterizar diciendo que es una función de estado del sistema, definida mediante la siguiente ecuación:

$$\oint_C d\phi = 0 \quad (19)$$

Debido a que $\phi(t)$ es un potencial termodinámico, su valor inicial es el mismo que el final, es por lo tanto es una curva unimodal, con un pico en " t_a ", cuya parte utilizable siempre es posterior. El flanco ascendente corresponde a los fenómenos transitorios y muy rápidos que ocurren cuando el soluto conservativo se acopla en el líquido. Debido a que la velocidad V_{disp} va disminuyendo en la medida en que el sistema tiende irreversiblemente hacia el equilibrio después de t_a , entonces $\Phi(t)$ es decadente en su flanco más externo. La disminución progresiva de ϕ indica que cada vez más masa del trazador está disponible para su difusión, esta disponibilidad, $Dm(t)$ es completa cuando el soluto llega a la condición de "mezcla completa" lo cual ocurre cuando $\phi \approx 0.38$. Figura 10.

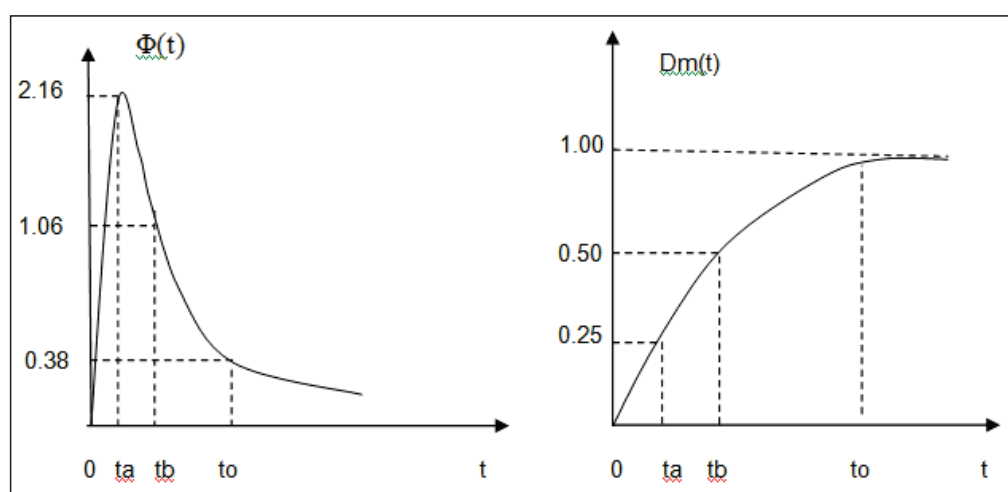


Figura 10. Disponibilidad de la masa para difusión transversal

Ahora, de la Ec. (18) se puede establecer una definición para la velocidad media advectiva:

$$U = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2E}{\tau}} \quad (20)$$

Despejando a E :

$$E = \frac{\phi^2 U^2 \tau}{2} \quad (21)$$

Debe notarse aquí que el tiempo característico Gaussiano τ es diferente a la variable independiente t , ya que la primera se refiere al tiempo en el cual la separación aleatoria de las partículas ocurre mientras esta distancia promedio es Δ , mientras que la escala temporal general se asocia más bien al efecto advectivo de U . La relación entre ambos tiempos se puede establecer mediante una dinámica del tipo Svedberg (Constaín A.J., Peña C., Mesa D.J. y Acevedo P., 2014).

$$\beta = \frac{\tau}{t} = e^{-1.54} \approx 0.215 \quad (22)$$

Ahora, es necesario abordar el tema de la descripción matemática de la concentración del trazador, para ello se parte de la ecuación clásica de Fick, con M la masa de soluto y A la sección transversal del flujo.

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi E t}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \quad (23)$$

Ahora reemplazando la Ec. (29) en la Ec. (31) se tiene con: $\sqrt{2\pi\beta} \approx 1.16$:

$$C(x,t) = \frac{M}{Q_l \phi t 1.16} e^{-\frac{(x-U_x t)^2}{2\beta \phi^2 U_x^2 t^2}} \quad (24)$$

La particularidad de esta ecuación (formula modificada de Fick) es que reproduce bastante bien las curvas experimentales de trazador como se mostrara más adelante. Supóngase que se realiza un vertimiento lateral de trazador desde la orilla de un flujo turbulento, tal como se muestra en la Figura 9 con la pluma de trazador evolucionando en el tramo. Nótese que el caudal comprendido por el "tubo de corriente" que limita la pluma de trazador, Q_l , es un valor "local" toda vez que en principio, el trazador no ha cubierto todo el volumen del flujo real ni participa de la velocidad plena del flujo ($U_l < U$) ni su ancho efectivo es el de todo el flujo ($W_l < W$) ni tampoco que su profundidad (en la orilla) es la del cauce ($h_l < h$).

Debe recordarse además que en un cauce natural turbulento vale aproximadamente una distribución transversal de velocidades (línea punteada) tal como se muestra en la Figura 11. Se muestra también en la gráfica la anchura "local" de la pluma de trazador (línea roja) mediante una pequeña flecha. Se asume que la profundidad es el valor medio de todo el cauce (para simplificar $h_l = h$).

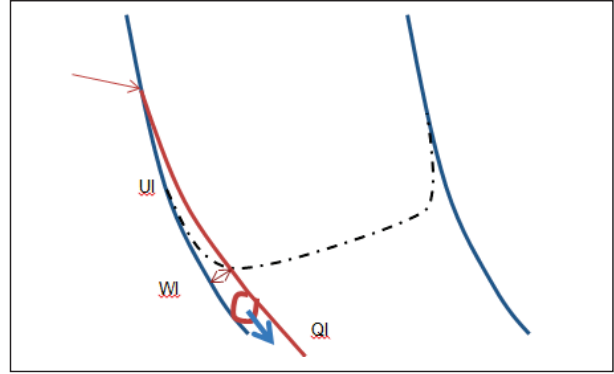


Figura 11. Velocidad y ancho locales para el trazador definiendo caudal local

$$Q_l \approx W_l \times h \times U_l \quad (25)$$

Esta definición debe ser coincidente con la del caudal despejada de la formula modificada de Fick, calculada en el punto de medición con el factor exponencial igual a uno.

$$Q_l \approx \frac{M}{C_p \times \phi \times t \times 1.16} \quad (26)$$

A partir de los conceptos desarrollados anteriormente se puede ahora definir la "tasa de transporte de masa local" con base en experimentos de trazador. En el punto de medición a partir de la Ec. (26) se tiene que la tasa local de transporte de masa es aproximadamente igual a la siguiente ecuación, con C_p como concentración pico para el trazador, considerado conservativo para que su disminución a lo largo del tramo sea debida únicamente al efecto dispersivo.

$$Ttm_j = \frac{\Delta M_j}{\Delta t_j} \approx \frac{M}{t} \approx C_p \times \phi \times Q_l \times 1.16 \quad (27)$$

3.3. Igualación de la Tasa de transporte de masa "general" y "local" en un flujo en "equilibrio dinámico"

En correspondencia con lo establecido en el apartado 3 Ec. (15) para la masa disuelta observada de forma "general" y "local" en un cauce natural, se tiene

que para un flujo en equilibrio dinámico se cumple aproximadamente que:

$$Q \times C_o \approx C_p \times \phi \times Q_l \times 1.16 \quad (28)$$

O sea:

$$\phi \approx \frac{\left(\frac{Q}{Q_l} \right)}{\left(\frac{C_p}{C_o} \right) \times 1.16} \quad (29)$$

Esta ecuación es importante, toda vez que Φ es una función de estado y tiene una significación termodinámica muy especial en tanto que refleja propiedades “generales” del sistema en el que evoluciona, aunque sea medida en zonas “locales”; así trae información del estado particular del proceso de avance de la mancha de trazador (Q_l y C_p), pero también de los procesos generales para el cauce en equilibrio dinámico (como Q y C_o).

CONCLUSIONES

1. Relación entre el tipo de vertimiento y mejoramiento de la mezcla de la solución de trazador

Por tipo de vertimiento del trazador se entiende en este artículo la inyección súbita de soluto conservativo ya sea en un punto (izquierda) o esparcida a lo ancho (derecha). Figura 12.

Cuando se hace un vertimiento súbito *múltiple* simultaneo a lo ancho, en realidad de que se hace es aumentar el valor del ancho local de la pluma, W_l , y de acuerdo con la Ec. (25) se aumenta el valor del caudal local cubierto por la pluma compuesta, Q_l , este valor aumentado (con respecto al de un solo vertimiento puntual) si se aplica a la Ec. (29) hace que la función de estado disminuya, o sea se acerque más a la condición de “mezcla completa”.

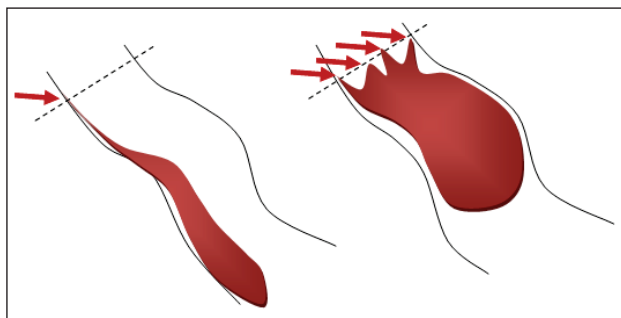


Figura 12. Tipos de vertimiento de trazador y mejoramiento de la mezcla

2. Acople entre aspectos locales y generales en los estudios de hidrología y calidad del agua

El hecho de que la función de estado Φ describa el acople de lo “particular” o “local” a lo “general” y es muy útil sobretodo en cauces muy anchos en los que el trazador no ocupa todo el ámbito del flujo. Figura 13.

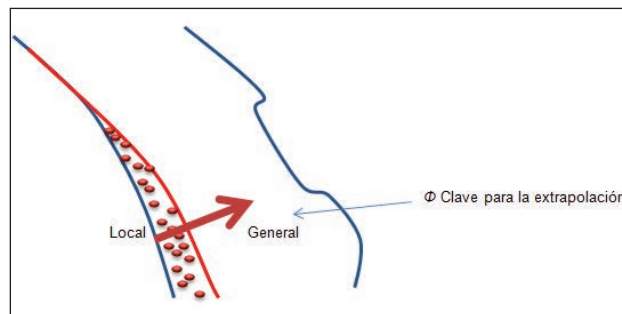


Figura 13. “Acople” del trazador en ríos anchos

En razón de que la función de estado, Φ norma el acople de lo *local* a lo *general*, es factible en cauces muy anchos determinar aproximadamente las características “generales” a partir de mediciones “locales” en las que no es necesario utilizar grandes cantidades de trazador, solamente aquellas dosificaciones que permitan determinar cómodamente los parámetros que se usaran para la extrapolación exitosa. El cálculo teórico de la función Φ , como ya se ha explicado en otros artículos (Constaín A.J., 2014), se hace a partir del tiempo medido entre los dos puntos de inflexión de la curva Gaussiana experimental dividida por el tiempo de transporte y multiplicada por una constante.

REFERENCIAS

- French. R. 1987 Open Channel Hydraulics. Chapter 10. Mc Graw-Hill, New York.
- Fischer H.B., 1967. The mechanics of dispersion in natural streams. *Journal of the Hydraulics division*, November, Pp. 187-216.
- Fischer H.B. 1966. *Longitudinal dispersion in laboratory and natural streams*. KHR-12, PhD thesis dissertation, Caltech.
- Holley E.R., 1969. Unified view of diffusion and dispersion. *Journal of the Hydraulics division*, March, Pp 621-631.
- Christofolletti A. 1981. La noción de equilibrio en geomorfología fluvial. *Revista de Geografía Norte Grande*, 8: 69-86.
- Leopold L.B. & Maddock T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. USGS paper 252.

- Prigogine I. & Kondepudi D. 1998. Modern thermodynamics. Wiley, Chichester.
- Leopold L.B. & Langbein W.B. 1962. The concept of entropy in landscape evolution. USGS Paper 500-A.
- Spiridonov V.P. & Lopatkin A. A. 1973 Tratamiento Matemático de datos fisicoquímicos. Editorial Mir, Moscú.
- Hem J. 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2254.
- Constaín A.J., 2013. Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Análisis detallado del transporte en el canal Caltech. Revista Ingeniería Civil No. 170. CEDEX. Pp. 103-122.
- Constaín A., Peña C., Mesa D. & Acevedo P. 2014 Svedberg's number in diffusion processes. International Conference in hydraulic resources. Santorini.
- Constaín A. 2014. Revalidación de la ecuación de Elder para la medición precisa de los coeficientes de dispersión en flujos naturales. Revista DYNA. Vol 81, No. 186, Medellín.
- Constaín A.J., 2013. A thermodynamic view of tracer plume evolution: Complete mixing condition evaluation. *European Physical Journal*, Vol. 50. No. 20135003001.

SEGURIDAD HÍDRICA: RETOS Y RESPUESTAS, LA FASE VIII DEL PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL DE LA UNESCO (2014-2021)

WATER SECURITY: CHALLENGES AND RESPONSES, PHASE VIII OF THE INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAM OF UNESCO (2014-2021)

Jimenez-Cisneros, Blanca¹

Resumen

Este trabajo describe los grandes retos que a nivel global, regional y local se enfrentan en el tema del agua. Asimismo se presentan las necesidades de adaptación al cambio climático en este mismo campo. Como respuesta, tanto para manejar riesgos y aprovechar incluso posibles oportunidades, el Programa Hidrológico Internacional – que es un programa intergubernamental - tiene por objetivo para los próximos ocho años contribuir a la Seguridad Hídrica. Para definir el contenido de este programa, periódicamente los Estados Miembros de la UNESCO definen las prioridades de investigación, desarrollo tecnológico, innovación y educación. Para implementar estas prioridades, en forma coordinada, además del personal y los proyectos directamente realizados por la organización, los Estados Miembros cuentan con la “familia del Agua de la UNESCO”, compuesta a la fecha por el centro UNESCO-IHE ubicado en Holanda, el Programa Mundial para Evaluar los Recursos Hídricos – asentado en Italia y que produce el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo -, 27 centros de agua bajo los auspicios de la UNESCO y 35 cátedras de agua en diversas partes del mundo. A esta familia se accede mediante solicitud formal de los gobiernos al PHI y al Consejo de la UNESCO.

Palabras clave: Seguridad hídrica, UNESCO, Naciones Unidas.

Abstract

This work describes the main challenges water faces on a global, regional and local scale, while also presenting the adaptation needs when addressing climate change in this field. During the next 8 years, the International Hydrological Program (IHP), an intergovernmental program, aims to contribute in responding to these challenges by managing risks and making the most of possible opportunities. In order to determine the content in this program Member States of UNESCO periodically determine their priorities in research, technical development, innovation and education. To implement these objectives in a coordinated way, in addition to staff and projects directly enacted by the organisation, the Member States include the “UNESCO water family”, currently composed of the UNESCO-IHE in The Netherlands, the World Water Assessment Program -which is located in Italy and produces the United Nations World Water Development Report-, 27 centres under the auspices of UNESCO and 35 water chairs in diverse parts of the world. This family is accessed through formal requests by governments to the IHP and the Council of UNESCO.

Key words: Water security, UNESCO, United Nations

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la salud, el desarrollo humano y los ecosistemas. Además es vital para erradicar la pobreza, promover la equidad de género, y contribuir a la seguridad alimentaria y la energética. Sin embargo, billones de personas en el mundo enfrentan problemas serios por el de agua, como son la escasez del recurso, la contaminación, la deficiencia de servicios (suministro y saneamiento), las inundaciones, las sequías y la extinción irreversible de ecosistemas hídricos y de sus servicios. Se estima que aproximadamente el 80% de la población mundial enfrenta riesgos a su seguridad hídrica de forma directa o indirecta (Vorosmarty et al., 2010). Para paliar algunos de estos problemas, en 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el acceso al agua limpia y al saneamiento un derecho humano. A pesar de

ello, la falta de acceso al servicio sigue siendo un problema global. El objetivo del Milenio referente al incremento en el suministro de agua se cumplió en 2010, pero aún hay más de 600 millones de personas que carecen de este servicio, de los cuales 40% vive en África subsahariana y muchos millones más cuentan con el servicio pero en forma deficiente. En cuanto al servicio de saneamiento, es muy probable que el objetivo del Milenio no se pueda cumplir en el 2015 ya que todavía hay cerca de 2.5 billones de personas sin este. En ambos casos, es la población rural, las mujeres y los niños quienes resultan más afectados (IFAD 2014). En este trabajo se describe cómo el Programa Hidrológico Internacional busca promover un esfuerzo internacional coordinado, para lograr la seguridad hídrica actual y futura frente a los riesgos de cambio global.

¹ Directora de la División de Ciencias de Agua y Secretaria del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO. División de Ciencias del Agua, París, Francia. b.jimenez-cisneros@unesco.org

ANTECEDENTES

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO pertenece a las Naciones Unidas y tiene el mandato de promover la ciencia, la innovación y el desarrollo de las capacidades institucionales y humanas en hidrología. Para ello: (a) moviliza redes científicas y de innovación; (b) fortalece la interface entre científicos y tomadores de decisiones, y (c) desarrolla capacidad institucional y humana (Figura 1). El programa se creó en 1975 como resultado

de la Década Hidrológica Internacional y poco a poco se ha transformado en un programa multi y transdisciplinario para aplicar la ciencia y la innovación para el manejo eficiente de los recursos hídricos y su gobernanza (Figura 2). El Programa se implementa por fases para adecuar su contenido a los cambios de los problemas mundiales. Las fases duraron seis años hasta 2014, fecha a partir de la cual el programa durara ocho años.



Figura 1. Actividades de la Octava Fase del Programa Hidrológico Internacional (PHI-VIII), Seguridad Hídrica Respuesta a los retos Locales, Regionales y Globales 2014-2021

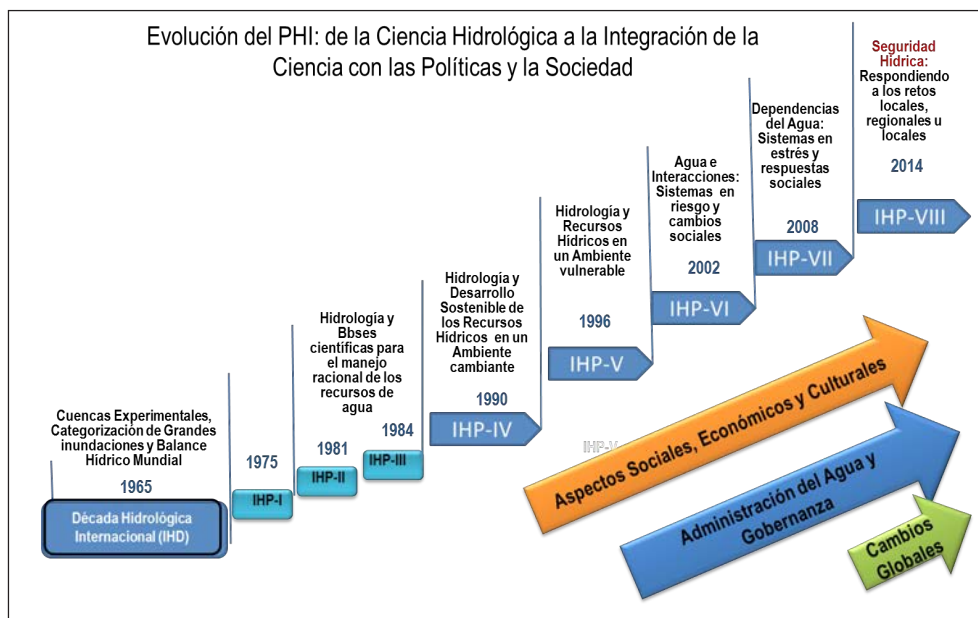


Figura 2. Evolución del Programa Hidrológico Internacional

El destino de la Humanidad está ligado a la forma de empleo de los recursos naturales. Para asegurar “el futuro que queremos”, se requiere usar la ciencia y la innovación para manejar sabia y sustentablemente los recursos naturales. Por ello, los Estados Miembro de la UNESCO decidieron que la octava fase del PHI se orientara a la Seguridad Hídrica. Existen diversas definiciones para la Seguridad Hídrica. Sólo la del

PHI ha sido aprobada por los gobiernos después de intensas discusiones técnicas y políticas. De acuerdo con el PHI, la seguridad hídrica es: “la capacidad de una población para salvaguardar a nivel de cuenca el acceso al agua en cantidades adecuadas y con la calidad apropiada para sostener la salud de la gente y de los ecosistemas así como para asegurar la protección eficaz de vidas y

bienes durante desastres hídricos (inundaciones, deslizamientos y hundimientos de terreno y sequías)". La seguridad hídrica está amenazada por diversos factores humanos y naturales como son el crecimiento poblacional, el uso del suelo, el desarrollo económico y el clima. Estos y otros factores afectan la disponibilidad del recurso, el acceso a los servicios y los riesgos por desastres hídricos. De acuerdo con el 5° reporte del IPCC (2014), el cambio climático pondrá en riesgo la seguridad hídrica y, asociado con ello también la seguridad alimentaria y la energética. Esta afectación aumenta conforme aumentan las emisiones de gases invernadero, en forma lineal hasta 3°C de calentamiento global por arriba del que se tenía en el periodo preindustrial, valor a partir del cual los cambios proyectados son casi todos exponenciales (IPCC, 2014). Como respuesta el PHI-VIII (2014-2021) se orienta a mitigar, adaptar y controlar por medio de la ciencia y la innovación los impactos en el agua causados por riesgos naturales y antropogénicos para lograr la Seguridad Hídrica a nivel local, regional y global. En las siguientes secciones se proporciona un mayor detalle de lo anteriormente señalado.

MANEJO DE RIESGOS POR CAMBIOS HIDROLÓGICOS Y DESASTRES HÍDRICOS

Se estima que el 85% de la población mundial habita en la mitad más árida de la Tierra (Vorosmarty, 2005) y que para el 2030 la mitad de ésta se encontrará en zonas con elevado estrés hídrico (OECD, 2008). Además, entre 6 y 8 millones de personas al año mueren por desastres o enfermedades asociadas con el agua (UN-Water, 2013). De acuerdo con el IPCC (2014), el cambio climático ha modificado el ciclo hidrológico, siendo su impacto mayor en el futuro. Las proyecciones muestran que la disponibilidad efectiva de agua será menos confiable y que el riesgo por desastres hídricos será mayor. Asimismo, la pérdida de nieve y glaciares - que se observa ya en el Ártico, Eurasia y los Andes - continuará en el futuro, incluso para el escenario con menor calentamiento global (el RCP2.6, que corresponde a cerca de dos grados de calentamiento adicional). Bajo este escenario la reducción esperada en permafrost y glaciares es del 20% de área. La disminución de la masa de nieve y la pérdida de glaciares tiene un impacto en la disponibilidad de agua. El permafrost (suelo en el punto de congelación del agua o por debajo del mismo) sirve como almacén de agua, modulando su disponibilidad para su empleo, al igual que una presa. El permafrost es importante para el suministro de agua en altas latitudes en donde las zonas de montaña representan el 24% del área total pero aportan 46% de la escorrentía. En cuencas alimentadas por glaciares (con excepción del este del Himalaya en donde la época del monzón y la del derretimiento de hielo coinciden), la escorrentía alcanza su máximo durante el verano, cuando la demanda de agua es mayor. El cambio climático provoca que el flujo máximo se alcance ahora

al inicio de la primavera. La importancia relativa del permafrost para la recarga de acuíferos, en comparación con la del agua lluvia, se ilustra con un ejemplo para el suroeste de Estados Unidos, en donde el derretimiento de nieve aporta entre 40 y 70% de la recarga mientras que la precipitación pluvial sólo el 25-50% del total (Earman *et al.*, 2006). Antes estos problemas, el PHI cuenta con una iniciativa para evaluar el impacto de la pérdida de permafrost en el recurso hídrico, definir los sistemas de ríos y acuíferos que serán más afectados y las formas para adaptarse a las nuevas condiciones.

Los desastres hídricos son el resultado de interacciones muy complejas entre el océano, la atmósfera y la tierra pero también de la exposición y vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales. De acuerdo con el IPCC (2014), no se cuenta aún con datos suficientes para demostrar que la magnitud y la frecuencia de las inundaciones se han modificado a causa del cambio climático antropogénico, a pesar de ello es claro que las pérdidas socio económicas por las inundaciones aumentaron durante de la segunda mitad del siglo XX como resultado de una mayor exposición y vulnerabilidad de la población. Para el futuro, las proyecciones muestran en todos los escenarios de cambio climático que la frecuencia e intensidad de las inundaciones aumentará, en especial en el sur, sureste y noreste de Asia, África tropical y Sudamérica (IPCC, 2014). Para finales del siglo XXI la gente expuesta a una inundación con un periodo de retorno de 100 años será tres veces mayor en el escenario con altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) que para el escenario con bajas emisiones (RCP2.6, IPCC, 2014). Los mayores daños se observarán en Asia, mientras que para Europa, los costos anuales por los efectos duplicarán para la década 2080s en el escenario B2 y triplicarán para el A2², en comparación con los costos reportados para el periodo 1961-1990 (6.4 billones de Euros y 200,000 personas, Feyen *et al.*, 2012).

Para las sequías la situación anterior es similar: no es claro que éstas hayan aumentado en frecuencia o intensidad como resultado del cambio climático, sin embargo, en todos los escenarios futuros las proyecciones las sequías serán más frecuentes (IPCC, 2014). Las regiones más afectadas serán la del Mediterráneo, Europa Central, el Centro de Norte América y el Sur de África. Uno de los problemas asociado con las sequías es que son una de las

² The A2 scenarios are of a more divided world. The A2 family of scenarios is characterized by (a) A world of independently operating, self-reliant nations, (b) Continuously increasing population; and, (c) Regionally oriented economic development.

The B2 scenarios are of a world more divided, but more ecologically friendly. The B2 scenarios are characterized by: (a) Continuously increasing population, but at a slower rate than in A2; (b) Emphasis on local rather than global solutions to economic, social and environmental stability, (c) Intermediate levels of economic development; and, (d) Less rapid and more fragmented technological change than in A1 and B1.

principales limitantes del desarrollo en África, ya que dependen de la agricultura de temporal.

Para paliar los efectos de la incertidumbre en la disponibilidad del agua, se requiere entender mejor las causas de las inundaciones y las sequías y hacer un mejor manejo de los riesgos por medio del desarrollo de políticas nacionales apropiadas. Por otra parte, para controlar los efectos de los desastres hídricos es necesario disminuir la vulnerabilidad y la exposición de la población mediante una eficiente planeación urbana y territorial, la protección y restauración de los servicios eco-sistémicos, la disminución de la inequidad y de la pobreza y de una adecuada valoración de la información sobre los riesgos tanto por parte de los gobiernos como por parte de la sociedad. Todos estos son objetivos del Tema 1 del PHI-VIII, Desastres Hídricos y Cambios Hidrológicos cuyos detalles se muestran en la Tabla 1.

MANEJAR SUSTENTABLE Y VISIBLEMENTE EL AGUA INVISIBLE

El agua subterránea representa el 98% del agua dulce no congelada en el Mundo, cumple con diversas funciones ecológicas y en muchas regiones

es la única fuente disponible de agua. En los últimos 50 años, su empleo ha aumentado vertiginosamente por su confiable disponibilidad - incluso en épocas de sequía-, su buena calidad y en muchos casos su costo accesible (Llamas and Martínez-Santos, 2005). El agua subterránea es fundamental para la sobrevivencia de 1.5 billones de personas que viven en zonas rurales pobres de África y de Asia. También representa el 50% del suministro del agua urbana. A pesar de ello, se conoce muy poco de este recurso, su manejo es deficiente y los estudios de los efectos del cambio climático son escasos. Como resultado es necesario conocer mejor los acuíferos en todos sus aspectos para evitar su sobreexplotación, contaminación e inadecuada dependencia del mismo. Todo ello forma parte de las tareas del tema 2 del PHI-VIII El Agua subterránea en un Ambiente Cambiante. En especial, el programa ISARM (Manejo de Recursos Acuíferos Compartidos a Nivel Internacional, por sus siglas en inglés) se aboca a mejorar el entendimiento de los aspectos científicos, sociales, económicos, legales y ambientales de los acuíferos transfronterizos y el proyecto WHYMAP a caracterizar el recurso. En particular este último ha dado como resultado la elaboración de mapas sobre el recurso subterráneo con datos de todo el mundo.

Tabla 1. Áreas focales del Programa Hidrológico Internacional, Fase VIII

Tema 1: Desastres hídricos y cambio hidrológicos 1.1 Manejo del riesgo y adaptación a cambios globales 1.2 Conocimiento de los impactos conjuntos por procesos humanos y naturales 1.3 Adquisición remota de datos y validación en campo 1.4 Manejo de incertidumbre y mejora en la comunicación de riesgos	Tema 2: El agua subterránea (el recurso invisible) en un ambiente cambiante 2.1 Mejoras en el manejo sustentable del agua subterránea 2.2 Estrategias para recargar acuíferos 2.3 Adaptación al cambio climático 2.4 Protección de la calidad del agua 2.5 Manejo de acuíferos transfronterizos
Tema 3: Retos por la Cantidad y Calidad del agua 3.1 Administración, derechos y uso eficiente de agua 3.2 Manejo de la escasez actual y prevención de tendencias no deseadas en la demanda 3.3 Herramientas para involucrar usuarios y crear conciencia; Manejo y resolución de conflictos 3.4 Atención de problemas de calidad de agua y de contaminación bajo un enfoque de manejo integrado del recurso y con base en marcos legales, institucionales y de desarrollo de la capacidad humana 3.5 Herramientas novedosas para proteger la seguridad del suministro y controlar la contaminación	Tema 4: Agua y asentamientos humanos para el futuro 4.1 Cambio de enfoques y de tecnologías 4.2 Cambios sistémicos para el manejo integrado del recurso 4.3 Desarrollo Institucional y de liderazgo para integrar el manejo del recurso 4.4 Oportunidades en ciudades emergentes y países en desarrollo 4.5 Integración al desarrollo de asentamientos rurales
Tema 5: Armonización de la Ecohidrología y de la Ingeniería para un mundo sustentable 5.1 Dimensión hidrológica de las cuencas: riesgos y oportunidades para el desarrollo sustentable 5.2 Adaptación de la estructura ecológica de cuencas para mejora de ecosistemas e incremento de la productividad biológica y de la biodiversidad 5.3 Soluciones sistémicas de ecohidrología para manejo de agua, resiliencia de ecosistemas y preservación de servicios ecosistémicos 5.4 Ecohidrología Urbana 5.5 Regulación ecohidrológica para sostener y restaurar la conectividad de ecosistemas costeros	Tema 6: Educación Hídrica, clave para la seguridad del agua 6.1 Mejora de la educación terciaria y formación de capacidades profesionales del sector 6.2 Promoción vocacional y preparación de técnicos 6.3 Educación hídrica para la infancia y la juventud 6.4 Concientización de la sociedad 6.5 Cooperación para el manejo transfronterizo del agua

ASEGURAR LA DISPONIBILIDAD EQUITATIVA Y CONFIABLE DE AGUA EN FORMA UNIVERSAL

En muchas regiones, la escasez de agua es el principal problema para el desarrollo social y el económico. La disponibilidad del agua depende de la cantidad del recurso pero también de su calidad así como del acceso oportuno a un servicio eficiente y a un costo razonable. La escasez se debe tanto a factores naturales como antropogénicos, incluidos aspectos políticos. Muchas veces, asegurar el acceso al recurso implica la necesidad de coordinación. El 90% de la población mundial comparte recursos de agua y al menos 145 países tienen 445 acuíferos conjuntos (GEF, UNEP, TWAP, 2014), en algunos casos hasta por cuatro países. El calentamiento global afecta la disponibilidad del recurso. Por cada grado que la temperatura aumente hasta 3°C, hay reportes que señalan que el 7% de la población mundial tendrá 20% menos de agua. Además, con la temperatura se incrementará la demanda de agua para todos los usos, poniendo en riesgo no sólo la seguridad hídrica sino también la energética y la alimentaria. Por otra parte, la intensa urbanización, el crecimiento demográfico, el empleo intensivo de fertilizantes y de recursos naturales, están afectando – directa o indirectamente- la calidad del agua. Cerca del 85% del agua residual se descarga sin tratamiento alguno al ambiente. Como resultado del cambio climático, se espera que los episodios de contaminación asociados con la mayor temperatura del agua (como la eutrofización), las lluvias intensas (por arrastre de contaminantes del suelo y del aire a los cuerpos de agua) y las sequías (que causan una menor capacidad de dilución de contaminantes) sean más frecuentes e intensos. El panorama futuro se presenta complejo ya que por una parte los impactos del cambio climático en la calidad del agua no son lineales (con excepción del incremento de la temperatura del agua) y, por otra, porque sus efectos hay que añadir los ocasionados por las muchas otras causas de la contaminación. Así, los operadores de los servicios de agua tendrán que enfrentar retos asociados con la pérdida del almacenamiento natural de agua como nieve o glaciares, la mayor variación de la disponibilidad del agua y la creciente demanda y competencia por el recurso. El Tema 3 del PHI-VIII Cantidad y Calidad del Agua aborda todos estos aspectos bajo una óptica multi y transdisciplinaria para el manejo holístico del recurso considerando las interrelaciones entre usos y usuarios así como la cantidad y la calidad de manera integrada. El objetivo es promover el manejo sustentable del recurso para lograr la disponibilidad y accesibilidad al agua de manera eficiente y universal. Para ello, el PHI pretende mejorar el conocimiento de la cantidad, calidad y los usos del agua, así como desarrollar mecanismos efectivos para prever y controlar la contaminación, hacer un uso eficiente del recurso, compaginar la demanda

con la disponibilidad, manejar los recursos hídricos transfronterizos, generar herramientas legales, sociales y económicas para mejorar la gobernanza del agua y tomar decisiones bajo escenarios con alta incertidumbre.

DOTAR DE SERVICIOS DE AGUA HOY Y MAÑANA A LA TODA GENTE

Hoy en día, 750 millones de personas carecen del servicio de suministro de agua y muchos millones más tienen acceso a un servicio deficiente. Por otra parte, en los próximos 40 años, cada semana habrá 800,000 nuevos habitantes en las ciudades. La falta absoluta o parcial del servicio, el crecimiento poblacional, la rápida urbanización y el crecimiento económico han sido y seguirán siendo los factores que demanden una mayor y mejor cobertura de servicios de agua. También, es evidente ahora que la infraestructura hidráulica urbana está envejeciendo en muchas ciudades y será necesario hacer inversiones significativas para renovarla. En adición, la mayor variabilidad de la calidad del agua que entra a las plantas potabilizadoras y depuradoras por eventos extremos disminuirá la eficiencia del tratamiento y durante inundaciones intensas será necesario parar totalmente el funcionamiento de esta infraestructura.

Ante la urbanización creciente se requieren nuevas formas de concebir y operar los servicios, incluidos los del agua. Se requieren nuevos enfoques para optimizar el manejo conjunto del agua, el suelo y la energía a la par que minimizar la huella hídrica de las ciudades y evitar el transporte de contaminantes entre el agua, el suelo y el aire. Este nuevo enfoque forma parte de los objetivos del Tema 4 del PHI-VIII Agua y Asentamientos del Futuro (Tabla 1). El tema también abarca el suministro de agua a zonas rurales. Desafortunadamente, en estas zonas en especial de países en desarrollo la cobertura de servicios en agua así como de saneamiento es muy escasa y los retos técnicos, legales e institucionales importantes. Estos aspectos son abordados por el PHI.

COMBINANDO LA INGENIERÍA Y LA ECOLOGÍA PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DEL RECURSO

Ante la mayor inestabilidad del clima, por un lado, y el crecimiento poblacional y económico no sostenibles, por el otro, urge no únicamente detener la degradación ambiental sino también revertirla. Entre 1970 y 2000, las especies de agua dulce que conforman el Índice del Planeta Vivo disminuyeron en 50% mientras que las marinas y terrestres desaparecieron en 30% (MA 2005a). Además, la economía global y la urbanización han modificado el ambiente natural para transformarlo en vastas zonas agropecuarias con intensas manchas de áreas urbanas en muchos sitios. Se espera que en un

futuro, el riego agrícola afecte el flujo ecológico de manera más intensa que hasta ahora lo han hecho todas las causas antropogénicas. Esta situación se agrava bajo escenarios de cambio climático. Para la década de 2050, las proyecciones muestran que el impacto en el flujo de los ríos será más intenso que hasta el ahora producido por la construcción de presas hasta el año 2000 (IPCC, 2014). Por ello, se requiere manejar las cuencas hídricas considerando su capacidad de carga para armonizarla con sus usos y necesidades sociales. El Tema IV del PHI-VIII busca realizar lo anterior, combinando soluciones de Ecohidrología y de ingeniería. De esta forma se pretende desarrollar nuevos métodos para regular los ciclos ambientales, incluidos los “nuevos ecosistemas” así como entender mejor el papel que tienen y pueden tener los ecosistemas en las actividades humanas como la agricultura y las ciudades. Como parte de este tema se contempla continuar con los Proyectos Demostrativos del PHI que emplean prácticas sustentables, transdisciplinarias e innovadoras para el manejo del agua. La UNESCO cuenta con 30 sitios demostrativos; dos de ellos se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1.

Proyectos Demostrativos de Ecohidrología

Rio Pilica, Polonia. Este proyecto forma parte de la red de las 67 cuencas HELP (Hydrology for the Environment, Life and Policy) que hacen un manejo integrado del recurso con apoyo de una red de expertos y tomadores de decisiones en aspectos legales, administrativos y científicos. En el Rio Pilica se logró controlar los problemas de salud y ecológicos que se generaban a causa de la toxicidad por cianobacterias. Para ello se implementaron medidas hidrogeológicas que redujeron la carga de nutrientes. El proyecto además disminuyó la descarga de nitrógeno y fósforo al Mar Báltico cumpliendo con la Directiva Marco de la Unión Europea en Materia de agua.

Planes de agua, Australia. En este proyecto se reformó el manejo de agua a nivel de Cuenca por medio de Planes Hídricos que consideraban en forma conjunta los sistemas hidrológicos, ecológicos, sociales y culturales. El trabajo se desarrolló de manera conjunta entre el gobierno y las comunidades del Sur de Australia, Queensland y el Territorio del Norte. En el proceso se incluyeron soluciones de manejo de agua y de concepción de valores indígenas y se integraron aspectos socioeconómicos, culturales y ecológicos en los criterios para otorgar derechos de agua. Entre las herramientas desarrolladas se encuentra un modelo de participación para uso de acuíferos y la identificación de valores ambientales, sociales y económicos como agente de cambio en el manejo de humedales.

LOGRAR UN CAMBIO DE MENTALIDAD PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA

Por razones históricas el manejo del agua, como de muchos otros bienes, se hace por medio de modelos compartimentalizados. Al igual que las instituciones, la educación y la investigación siguen este mismo esquema separando los estudios por disciplinas, temas y problemas muchas veces unidimensionales. Esto se torna en un ciclo vicioso pues los recursos humanos y los resultados de las investigaciones así generados promueven la preservación de instituciones y políticas aisladas, creando ministerios y oficinas que trabajan de manera independiente, repiten funciones o realizan actividades incluso contrapuestas. Por ello, para lograr la Seguridad Hídrica es preciso cambiar este esquema y formar una nueva generación de recursos humanos capaces de entender y manejar el recurso en forma integrada con un enfoque multi y transdisciplinario. En este contexto, el PHI VIII Educación Hídrica, clave para la seguridad del agua, promueve una revisión crítica del currículo de educación en hidrología desde los niveles más básicos de enseñanza, hasta los de más alta especialización, incluyendo la formación de técnicos (Tabla 1). El programa también busca crear conciencia en todos los sectores de la sociedad para lograr la seguridad del agua (Cuadro 2).

CON QUE CUENTAN LOS PAISES PARA IMPLEMENTAR EL PHI-VIII

Para implementar el PHI-VIII se cuenta con la Familia del Agua de la UNESCO (Figura 4) así como con una serie de redes e iniciativas internacionales (Tabla 2). Esto representa más de 1500 expertos en todo el mundo. En efecto, además del personal especializado en el tema del agua de la UNESCO y que se encuentra tanto en París como en las oficinas regionales de Montevideo, Yakarta, Nairobi y Egipto y algunas oficinas nacionales de la UNESCO, se cuenta con 169 representantes nacionales del programa, un centro de categoría 1 especializado en educación de alto Nivel – el centro UNESCO-IHE ubicado en Holanda, el Programa para la Evaluación de los Recursos Mundiales del Agua o WWAP ubicado en Italia y que produce el reporte periódico del Desarrollo del Agua en el Mundo, 27 centros regionales o internacionales de categoría 2 bajo los auspicios de la UNESCO y especializados en diversos campos del agua, y 35 cátedras UNESCO del Agua que contribuyen activamente al desarrollo de la capacidad humana.

CONCLUSIONES

Los retos en materia hídrica, con el tiempo, han ido creciendo en lugar de disminuir. Es tiempo de actuar con oportunidad ya que hoy en día la seguridad hídrica está en riesgo. Para ello, es importante conocer no únicamente las causas de los problemas sino también

sus riesgos, formas de control y de prevención, e incluso y de ser posible, obtener beneficios. Para lograrlo es indispensable desarrollar conocimiento e innovación, pero más aún emplear ambos en la práctica. El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO en su fase VIII es una herramienta que los países tienen para hacer esto una realidad, en forma coordinada y con impacto global. El Programa

puede ayudar al desarrollo de soluciones flexibles y adaptables a diversos contextos que coadyuven en la transformación de las sociedades de todas las culturas en sociedades resilientes a los cambios globales. Este reto, que es muy amplio, sólo se puede enfrentar haciendo uso de la cooperación internacional, el acercamiento de la ciencia y la innovación a los tomadores de decisiones.

Cuadro 2. IHP Programas e iniciativas transversales del PHI

HELP (<i>Hydrology for the Environment, Life and Policy</i>- Hidrología para el Ambiente, la Vida y las Políticas). Programa para desarrollar un nuevo enfoque para el manejo integrado de cuencas de agua a partir de construir marcos legales y redes de expertos en política, administración y ciencia. FRIEND-Water (<i>Flow Regimes from International Experimental and Network Data</i>,-Regímenes Hídricos a partir de Datos Experimentales y Redes de Información). Red internacional de expertos que buscan mejorar el entendimiento de la hidrología y del ciclo del agua a nivel regional. GRAPHIC (<i>Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change</i>, Evaluación del Estado de los Recursos de Agua Subterránea que están bajo Estrés por la Humanidad y el Cambio Climático). Un proyecto que busca mejorar el entendimiento de cómo el recurso subterráneo de agua interactúa con el ciclo global del agua, sirve de sustento a las actividades humanas y a los ecosistemas, y responde a las complejas presiones antropogénicas como es el cambio climático. G-WADI (<i>Global Network on Water and Development Information in Arid Lands</i>- Red Global de Información en Agua y Desarrollo para Regiones Áridas). Es una red global que promueve la cooperación regional e internacional para el manejo del agua en zonas áridas y semiáridas IDI (<i>International Drought Initiative</i>-Iniciativa Internacional en Sequías). Esta iniciativa busca promover, coordinar e implementar investigación y desarrollo de la capacidad humana en el tema de sequías. IFI (<i>International Flood Initiative</i>- Iniciativa Internacional sobre Inundaciones). Es una iniciativa de diversas agencias internacionales para promover un enfoque integrado en el manejo de las inundaciones, incluyendo el aprovechamiento de sus ventajas, el empleo de las planicies de inundación y la reducción de los riesgos sociales, ambientales y económicos. ISARM (<i>Internationally Shared Aquifer Resources Management</i>- Manejo de Recursos Acuíferos Compartidos Internacionalmente). Iniciativa que busca establecer una red de especialistas y expertos para desarrollar un inventario de acuíferos transfronterizos, promover prácticas y guías para su manejo. ISI (<i>International Sediment Initiative</i>- Iniciativa Internacional de Sedimentos).Iniciativa para evaluar la erosión y el transporte de sedimentos a ambientes marinos, lagos o reservorios aplicando un enfoque holístico de remediación y conservación de los cuerpos superficiales de agua así como ligando la ciencia con las necesidades de política y de manejo. JIIHP (<i>Joint International Isotope Hydrology Programme</i>- Programa Conjunto Internacional de Hidrología Isotópica). Programa que promueve el empleo de isótopos en hidrología por medio del desarrollo de herramientas, integración del tema en el currículo de carreras universitarias y el apoyo de proyectos de agua con técnicas isotópicas. PCCP (<i>From Potential Conflict to Cooperation Potential</i>- Del Conflicto Potencial al Potencial de Cooperación). Un proyecto que facilita el diálogo entre gente de diverso nivel y disciplinas para promover la paz, la cooperación y el desarrollo por medio del manejo de recursos hídricos compartidos. UWMP (<i>Urban Water Management Programme</i>- Programa para el Manejo del Agua Urbana). Programa que busca generar enfoques, herramientas y criterios para que las ciudades mejoren el conocimiento en el tema del agua urbana y desarrollen estrategias eficientes para su manejo. IIWQ (<i>International Initiative on Water Quality</i>- Iniciativa Internacional en Calidad del Agua) Es una plataforma para reforzar el conocimiento, la investigación y las políticas con enfoques novedosos para atender los problemas de calidad del agua. WHYMAP (<i>World Hydrogeological Map</i>- Cartografía de los Recursos Subterráneos de Agua). Una iniciativa para acopio, integración y visualización de información hidrogeológica a la escala global con información útil para analizar los retos referentes al manejo de recursos subterráneos de agua.

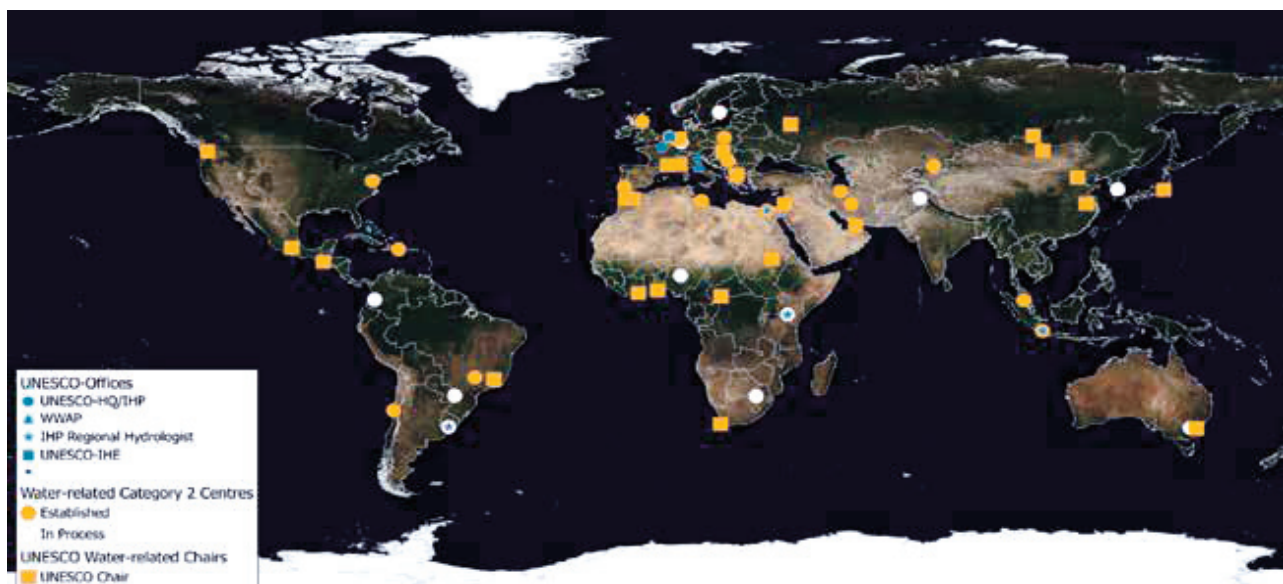


Figura 4. La Familia del Agua de la UNESCO

REFERENCIAS

Earman, S., A.R. Campbell, F.M. Phillips, and B.D. Newman, 2006: Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: Estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D9), D09302.

Feyen, L., R. Dankers, K. Bodis, P. Salamon, and J.I. Barredo, 2012: Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change*, 112(1), 47-62.

GEF, UNEP, TWAP (2014) http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/TWAP_A5_Brochure.pdf, consulted on September 2014.

IFAD (2014) Gender and water Securing water for improved rural livelihoods: The multiple-uses system approach http://www.ifad.org/gender/thematic/water/gender_water.pdf, consulted on August 2014.

IGRAC (2014) <http://www.un-igrac.org/publications/456#>, consulted on September 2014.

Llamas R., and Martinez-Santos P., (2005) JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND

MANAGEMENT ASCE / SEPTEMBER/OCTOBER / 337-341MA (2005a). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment. World Resources Institute. Island Press, Washington, DC.

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). 2008. OECD Environment Outlook to 2030. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Vörösmarty, C. J., Green P., Salisbury J. and Lammers R. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth *Nature* 467, 555-561 (2010).

Vörösmarty, C. J., C. Leveque, and C. Revenga. 2005. Fresh Water. In Millennium Ecosystem Assessment, Volume 1, *Conditions and Trends Working Group Report*. Washington, DC: Island Press.

UN-Water, 2013 <http://www.unwater.org/water-cooperation-2013/water-cooperation/facts-and-figures/en/>, consulted on September 2014.

IDENTIFICACIÓN DE ACTORES: UNA CONTRIBUCIÓN A LA GESTIÓN DE LOS COLECTORES DE DRENAJE DE LA CIUDAD DE CIPOLLETTI (RÍO NEGRO, ARGENTINA)

STAKEHOLDER MAPPING: A CONTRIBUTION TO DRAINAGE COLLECTORS MANAGEMENT IN CIPOLLETTI CITY (RÍO NEGRO, ARGENTINA)

Lozeco, Cristóbal¹; Schreider, Mario¹; Petri, Daniel²; Paris, Marta¹

Resumen

La Ciudad de Cipolletti, con aproximadamente 100.000 habitantes, está ubicada en el Alto Valle del Río Negro, en la confluencia de los Ríos Neuquén y Limay, que dan origen al Río Negro. El sistema de riego del Alto Valle nace en el Dique Ballester, sobre el río Neuquén y riega unas 50.000 ha, principalmente con producción frutícola (manzanas y peras). Los colectores de drenaje del sistema de riego fueron construidos para captar excedentes de riego, controlar la posición de la capa freática, evitar riesgos de salinización de los suelos y evacuar excedentes pluviales de las principales ciudades del Alto Valle. Sin embargo, en la actualidad actúan además como receptores de descargas industriales y cloacales en algunos casos con tratamientos que respetan las normas de vuelco que fija la normativa provincial y en otros casos no. A ello se suman descargas clandestinas de efluentes sin tratamiento alguno y una gran cantidad de residuos sólidos urbanos que provienen de los asentamientos informales ubicados en las inmediaciones de estos colectores. En este trabajo se presentan los resultados de la identificación y caracterización de los actores clave y el análisis de su relevancia social en el marco de la problemática ambiental descrita. Este análisis social se considera sustantivo para el diseño de una estructura organizacional que gestione los colectores de drenaje bajo la visión de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). Fundado en estos conceptos se propuso la creación del Consejo de los Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti cuya misión es definir las políticas de gestión e implementar las acciones estructurales y medidas no estructurales necesarias para su funcionamiento sostenible. El Consejo está integrado por un Comité Ejecutivo en cuyo ámbito se habrán de gestionar las medidas de acción que se requieran en orden a cumplir con la misión del Consejo; un Comité de Usuarios, que constituye una estructura deliberativa en la cual los usuarios del sistema puedan llevar sus inquietudes, establecer prioridades y elevar requerimientos al Comité Ejecutivo; y un Comité Asesor, que constituye una estructura de consulta y apoyo a la toma de decisiones. Por último integra el Consejo una Mesa de Diálogo entendida como un espacio de negociación y acuerdo, que adquiere relevancia en situaciones de desacuerdo o eventuales conflictos entre los principales actores que integran el Consejo.

Palabras clave: Colectores de drenaje, gestión integrada de los recursos hídricos, actores clave, estructura organizacional

Abstract

The city of Cipolletti, hosting approximately 100,000 inhabitants, is located in the High Valley of Río Negro, at the confluence of the Neuquén and Limay rivers, which form the Río Negro. The valley's irrigation system starts at the Ballester Dam, on the Neuquén River and irrigates approximately 50,000ha, whose main production is fruits (apples and pears). The drainage collectors from the irrigation system -built to capture exceeding irrigation, control the depth of water table and prevent salinization risks and receive the urban rain drainage from the main cities of High Valley. However, at present, these collectors also receive industrial and sewage effluents, and in some cases with treatments according to the state regulations. On the other hand, there are also some illegal effluents and solid waste without any treatment, coming from the informal settlements located nearby. In this paper the results of the identification and characterization of the key actors, along with the analysis of their social relevance in the frame of the environmental issue described above, are shown. This social analysis is the basis for the design of an organizational structure that manages the drainage collectors under the principles of Integrated Water Resources Management (IWRM). Therefore, the creation of the Council of Drainage Collectors in the city of Cipolletti is proposed with the aim of defining the management policies and implementing structural and non-structural measures necessary to ensure their sustainable functioning. This Council is formed by: an Executive Committee which is in charge of managing the action measures required in order to fulfill its mission; a User Committee through which the users of the system can present their concerns and define priorities to the Executive Committee; and a Consulting Committee which advises the other committees and supports the decision making. Lastly, there is also a Board of Negotiation which becomes relevant when there are conflicts or disagreements among the main actors involved in the Council.

Key words: Drainage collectors, integrated water resources management, key actors, organizational structure

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina; plozeco@hotmail.com;

² Departamento Provincial de Aguas, Río Negro, Argentina

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Cipolletti está ubicada en el Alto Valle del Río Negro, en la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, que dan origen al Río Negro (Figura 1). El sistema de riego del Alto Valle nace en el Dique Ballester sobre el Río Neuquén y cubre unas 52.000 ha dedicadas principalmente a la producción frutícola (manzanas y peras). Este sistema está constituido por una red de canales de riego con un desarrollo de 1.980 km (Figura 2) y una red de drenaje conformada por más de 500 km de canales colectores (Peri, 2004; Rodríguez Díez & Rodríguez Díez, 2003). La red de drenaje fue construida con la

finalidad de controlar la posición de la capa freática, evitar riesgos de salinización de suelos y captar los excedentes de riego del área frutícola. Además, para que los colectores actúen como desagües pluviales de las principales ciudades del Alto Valle, así como de descarga de los aluviones que ante lluvias de gran intensidad escurren por los zanjones y cauces, habitualmente secos y con fuertes pendientes, existentes entre la barda y el río. En la Figura 3 se presentan los colectores de drenaje próximos a la Ciudad de Cipolletti, de los cuales los principales son los Colectores P2 y R1 (Canal de los Milicos).

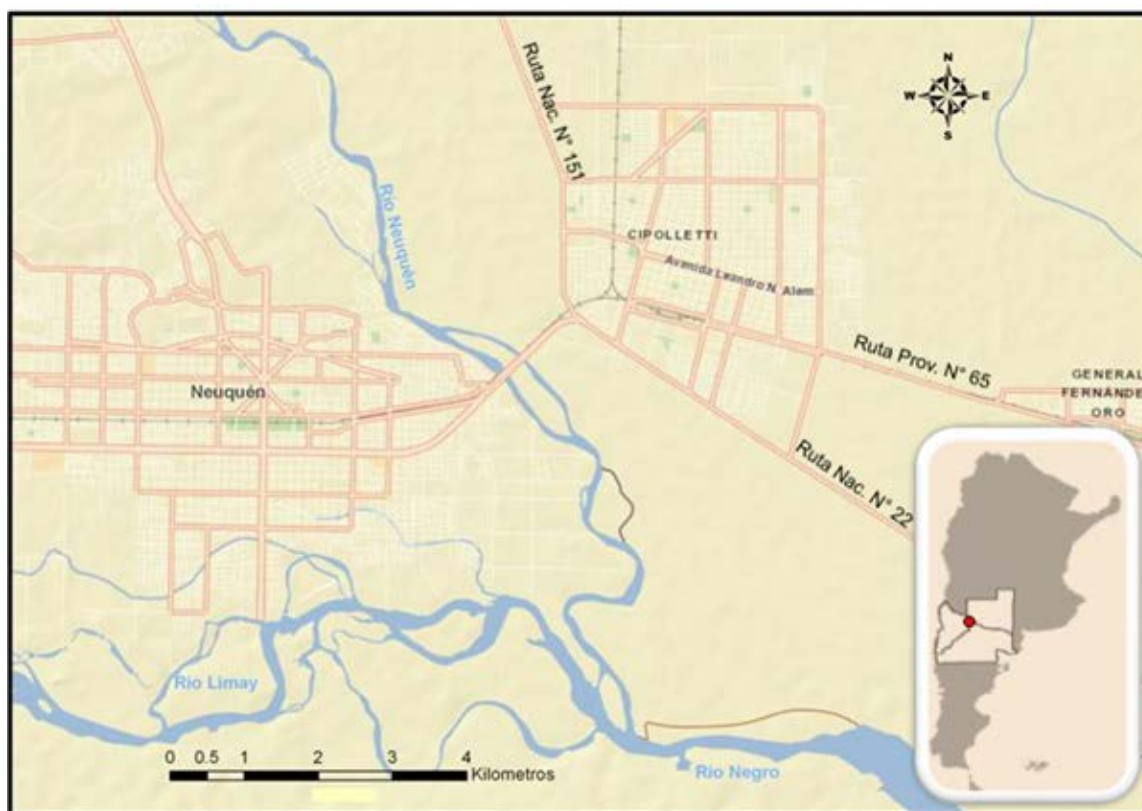


Figura 1. Ubicación general de Cipolletti en el Alto Valle del Río Negro (Provincia de Río Negro - Argentina)

Sin embargo, la normativa vigente en la provincia de Río Negro (DPA, 1996) permite que los colectores de drenaje actúen también como receptores de descargas industriales y cloacales tratadas, respetando las normas de calidad de vertido. En la actualidad también se suman las descargas de efluentes clandestinos y gran cantidad de residuos sólidos urbanos que generan los asentamientos informales ubicados en las inmediaciones de los colectores de drenaje. Estas descargas no fueron contempladas al momento del diseño y construcción de los colectores, provocando afectaciones ambientales en los mismos y en su descarga en los Ríos Neuquén y Negro. Desde el año 2007 se realiza un monitoreo sistemático de la calidad ambiental de los colectores de drenaje en diversos puntos de los

mismos (en particular del P2 y del R1). Esta tarea está a cargo del Programa de Control de Calidad y Protección de los Recursos Hídricos (CoCaPRHi) que depende del Departamento Provincial de Aguas (DPA). La información detallada de los puntos de muestreo y el registro de la información recogida se presentan en Lozeco (2013).

Si bien la situación descrita se presenta en distintos puntos del Alto Valle, es en el área urbana y periurbana de Cipolletti donde se encuentran los problemas más concentrados y por ende donde se genera un mayor impacto ambiental en los colectores de drenaje. Las Figuras 4 a 7 ilustran el estado actual de estos colectores de drenaje.



Figura 2. Sistema de riego del Alto Valle del Río Negro

Lo señalado obliga a esfuerzos de parte del Estado provincial, del Consorcio de Riego de Cipoletti y de la Municipalidad de Cipoletti para tratar de resolver los problemas ambientales de los colectores de drenaje en distintos sectores de la ciudad. Merece destacarse que a tal fin se han llevado a cabo acciones estructurales, algunas de ellas aún en desarrollo, pero sin que su ejecución obedezca a una estrategia de planificación, ni al accionar coordinado de los organismos involucrados, evidenciando un esquema de gestión fragmentada y sectorial. Entre estas obras se pueden citar las siguientes: construcción de la planta de tratamiento de líquidos cloacales de la ciudad; traslado de la planta de tratamiento de efluentes de una importante industria faenadora de pollos que antes descargaba sus efluentes en el Colector P2 (Pollolín, 2012); relocalización del Barrio Puente de Madera que antes estaba muy próximo al Colector P2; entubado del Canal de los Milicos (Colector R1) en Barrio Labraña; obras de protección contra inundaciones del Río Neuquén en Barrios Costa Norte, Costa Sur y Labraña.

La complejidad del problema y la diversidad de actores involucrados en la problemática, impide pensar en el diseño de un esquema de gestión que opere en forma eficiente y sostenible los colectores de drenaje en el área urbana y rural de Cipoletti, sin una adecuada identificación y valoración de todos esos actores.



Figura 3. Colectores de drenaje

En este trabajo se describen los resultados logrados a partir de dos enfoques metodológicos para la identificación de actores que da sustento a un modelo de organización para la gestión de los colectores de drenaje de la Ciudad de Cipolletti que resulte

participativo, sostenible y eficiente, de acuerdo con los principios que guían la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (Cap-Net, 2008; GWP, 2000; Torregosa Martí, 2007).



Figura 4. Vegetación acuática en colectores



Figura 5. Árboles en Colector P2



Figura 6. Descarga Colector P2 en el río Negro



Figura 7. Colector R1

2. METODOLOGÍA

La identificación de los actores clave se realizó con el apoyo de funcionarios del Departamento Provincial de Aguas (DPA) de la provincia de Río Negro y de la Municipalidad de Cipolletti, conocedores de las problemáticas de los colectores de drenaje y de los barrios aledaños a los mismos. En la mayoría de los casos se realizaron entrevistas en base a la metodología de diálogo semiestructurado. Con esta técnica se busca evitar algunos de los efectos negativos de los cuestionarios formales, como son: temas cerrados, falta de diálogo, falta de adecuación a las percepciones de las personas. La diferencia entre un diálogo y una entrevista, es que se busca un intercambio. Por este motivo en el diálogo semiestructurado sólo se tiene una serie de temas preparados a título indicativo (Geilfus, 2009).

Merece destacarse que en el caso de las industrias la información fue proporcionada por personal del CoCaPRHi (DPA, 2008; DPA, 2010a; Fernández et

al., 2006; Conghos et al., 2013), mientras que en el resto de los actores fue obtenida a campo o bien a partir de información secundaria.

La identificación de actores clave se hizo desde dos dimensiones que resultaron congruentes y complementarias. Al tradicional análisis a partir de la esfera de acción (Urrutia, 2004), se sumó el enfoque de influencia (Análisis Social CLIP) que los distintos actores tienen sobre el proyecto o política de intervención considerada (Chevalier & Buckles, 2009).

Según el primer enfoque, y basado en el trabajo de campo, la totalidad de los actores identificados se agruparon en tres esferas de acción: económico, político-institucional y social. Se consideró que los 6 aspectos ambientales resultan transversales a las restantes categorías y por ende son parte de cada una de ellas.

Para el segundo enfoque se recurrió al Análisis Social CLIP (Colaboración/Conflicto, Legitimidad, Intereses, Poder). Esta metodología ayuda a crear los perfiles de los actores involucrados en un problema o acción. Estos perfiles se basan en cuatro factores: poder (P), intereses (I), legitimidad (L) y relaciones existentes de colaboración y conflicto (C). Esta técnica permite describir las características y las relaciones de los principales actores involucrados en una situación concreta y explorar formas de resolver los problemas sociales. A tal fin, establece las siguientes categorías de actores: Dominante, Fuerte, Influyente, Inactivo, Respetado, Vulnerable y Marginado. El Análisis Social CLIP permitió entender los roles que cada uno de estos actores tiene y cómo ello debe ser considerado a la hora de proponer una estructura de organización que gestione el Sistema de Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti.

El siguiente Diagrama de Venn (Figura 8) permite comprender el significado de cada una de las categorías de actores.

Se dispuso así de dos elementos claves para definir un esquema de organización: las instituciones y actores sociales involucrados, y las vinculaciones existentes entre ellos.

Para la aplicación de las metodologías antes mencionadas se realizaron más de 30 entrevistas, resultando identificados un total de 17 actores. En el apartado Resultados, se identifican los diferentes actores de acuerdo a su esfera de acción y al modo en que participan de la problemática. Por su

parte, como resultado del análisis de influencia se identifican los perfiles y roles de esos actores y el modo en que se vinculan en el marco del modelo de organización propuesto.

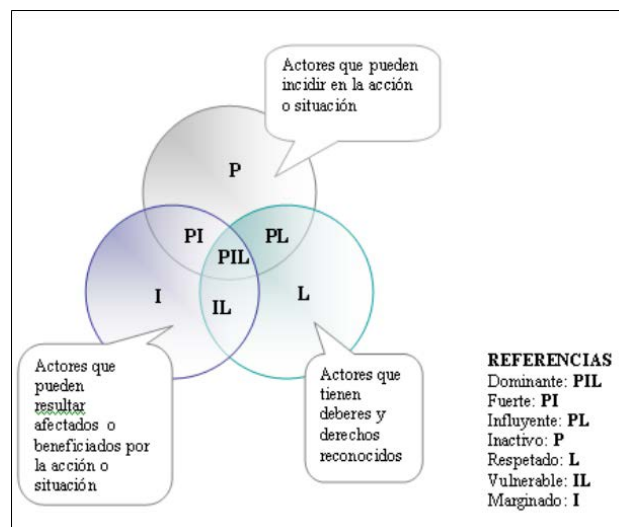


Figura 8. Categorías de actores
(adaptado de Chevalier & Buckles, 2009)

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de los actores

El análisis desde la “esfera de acción” permitió identificar a los actores desde el ámbito de actuación en el que se desempeñan.

Tabla 1. Actores clave según la esfera de acción

Esfera de acción de los actores		
Económica	Político – Institucional	Social
Industrias	Departamento Provincial de Aguas (DPA)	Barrios
Productores	Aguas Rionegrinas Sociedad Anónima (ARSA)	Asentamientos
	Consorcio Riego de Cipolletti	Escuelas
	Municipalidad de Cipolletti	Centros de promoción comunitaria
	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)	ONG
	Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC)	Cooperativas de viviendas
	Poder Judicial	Medios de comunicación
	Universidades	

Tabla 2. Clasificación de actores en función del Análisis Social CLIP

Dominantes	Fuertes	Influyentes	Respetados	Vulnerables	Marginados
DPA	Industrias	INTA	Centros de promoción comunitaria	Asociaciones vecinales (Barrios)	Asentamientos
Municipalidad de Cipolletti	Productores	AIC	Escuelas	Cooperativas de viviendas	
ARSA		Universidades	ONG		
Consorcio de Riego de Cipolletti		Medios de comunicación			
Poder Judicial					

Para un mejor entendimiento de los roles que desempeñan y su vinculación con la problemática en estudio, a continuación se caracterizan los principales actores involucrados agrupados según el ámbito de influencia definido por el Análisis Social CLIP.

Actores dominantes:

- Departamento Provincial del Agua (DPA) es la Autoridad Única de Agua en la Provincia de Río Negro. En relación con la problemática de los colectores de drenaje, tiene entre sus funciones el control de los efluentes industriales y urbanos (cloacales) que descargan en los mismos, y el control de la calidad de sus aguas. Desde el punto de vista de su influencia, es sin duda un actor dominante ya que cuenta con los recursos humanos y materiales para la gestión de los colectores. De hecho, su opinión técnica es relevante y sus resoluciones son de cumplimiento obligatorio.
- Municipalidad de Cipolletti: Es la institución gubernamental local que debe atender las inquietudes y reclamos de los vecinos. Debe, además, prestar por sí o a través de terceros los servicios básicos de alumbrado, limpieza, recolección de residuos, etc. Asimismo, a través de su Consejo Deliberante, establece las ordenanzas que, entre otros aspectos, regulan el ordenamiento territorial de la ciudad. En el caso particular de los colectores de drenaje, le compete hacerse cargo de parte del mantenimiento y limpieza del P2 y el R1, dado que en gran parte de sus recorridos estos desagües agrícolas cumplen funciones también como desagües urbanos. Es sin duda un actor dominante, pues la problemática de los colectores de drenaje es altamente urbana. Comparte con el Consorcio de Riego el uso de los colectores en su condición de desagües pluviales. Posee recursos humanos y materiales para colaborar con el DPA en la gestión de los colectores.
- Aguas Rionegrinas Sociedad Anónima (ARSA) es la prestadora del Servicio de Agua Potable y Saneamiento en Cipolletti y otras ciudades de la Provincia de Río Negro, en el marco de la Ley 3309. Este organismo actualmente depende del Ministerio de Obras y Servicios Públicos. El DPA es quien audita las obligaciones que le caben a ARSA como prestador. De acuerdo a los roles que le son propios, le cabe la función de promover la mejora de las condiciones ambientales a través de un eficiente provisión de servicios. Sin embargo cumple parcialmente con ello en lo que hace a la problemática en análisis, ya que la empresa misma es uno de los factores contaminantes de los colectores de drenaje al volcar al Colector P2 los efluentes de la planta con algunas deficiencias en el tratamiento de los líquidos cloacales.

- Poder Judicial: administra justicia apelando a audiencias de conciliación en casos de conflictos entre pobladores de barrios y asentamientos próximos a los colectores de drenaje o exigiendo a las industrias que adecuen los tratamientos de sus efluentes. En este punto es importante destacar que, a partir de la intervención judicial en los casos de industrias con mayores dificultades para cumplir con la normativa relacionada con la descarga de efluentes, se lograron mejores resultados que los obtenidos con anterioridad por gestión de la propia autoridad de aplicación (DPA).

Actores fuertes:

- Industrias: descargan sus efluentes a los colectores de drenaje de Cipolletti, Están habilitadas a hacerlo por lo normado en el Código de Aguas de la Provincia de Río Negro (DPA, 1996) aunque deben respetar límites de calidad en los efluentes que descargan, cosa que no siempre sucede. Por el esquema de control al que se las somete desde el DPA, están llamadas a marcar el rumbo de los cambios en la gestión de los colectores. Para ello es imprescindible que adecúen a las normas la calidad de los efluentes que vuelcan a los mismos.
- Los productores agrícolas que poseen sus chacras al norte, al oeste y al sur del ejido urbano están relacionados con la gestión de los “colectores de drenaje urbanos” de Cipolletti, toda vez que las actividades de riego están íntimamente ligadas a los mismos.

Actores influyentes:

- Organismos Científico Técnicos (INTA, AIC, universidades): si bien es indiscutible su capacidad para proveer soluciones a los problemas que se plantean, su participación hasta el presente ha sido limitada. Precisamente la falta de una estructura orgánica que les dé cabida puede haber sido la causa de ello. Su rol en la estructura que propone este trabajo persigue una mayor involucramiento de estos actores y un rol más destacado congruente con sus potencialidades.
- Medios de comunicación: Cumplen un rol destacado como ámbito de expresión de los distintos actores. También deben constituirse en ámbito divulgación y generación de conciencia. Es por ello que resulta importante su involucramiento en la futura estructura de gestión en un rol acorde a las funciones que le son propias.

Actores respetados:

- Centros de promoción comunitaria, Escuelas, ONG Si bien cuentan con el reconocimiento social de sus labores, estas no son orgánicas ni se encuentran sujetas a un trabajo planificado.

Resulta necesario un empoderamiento de estas organizaciones en la futura estructura de gestión, de modo de fortalecer su accionar y darle organicidad.

Actores vulnerables:

- Asociaciones vecinales de barrios y cooperativas de viviendas. Su nivel de organización es limitado y dependen de la ayuda gubernamental. Ello limita su capacidad de acción, la que generalmente queda supeditada a la acción de los actores dominantes o fuertes. Su empoderamiento es posible en un esquema de organización en el que la planificación urbana ocupe un lugar destacado.

Actores marginados:

- Asentamientos informales: Su condición misma los vuelve el eslabón más débil de la cadena. Su precariedad los convierte en víctimas de los procesos de contaminación pero también en causantes de los mismos.

El Análisis Social CLIP, permitió identificar tres grupos de relaciones: de colaboración, de conflicto y de colaboración y conflicto (Tabla 3). Asimismo, en la Figura 8 se ilustra la red de intereses que vinculan a los distintos actores, que han sido categorizados según su poder: en los círculos naranja se señalan los actores dominantes, en verde claro los actores fuertes, en azul los actores influyentes, en amarillo los actores respetados y en blanco aparecen los actores vulnerables y marginados.

Tabla 3. Relaciones de colaboración y conflicto entre actores

Relaciones de:		
Colaboración	Conflicto	Colaboración y Conflicto
DPA – Escuelas	Asociaciones vecinales – ARSA	Municipio – Asociaciones vecinales
ARSA – Escuelas	Asociaciones vecinales – Consorcio de Riego	Municipio – Cooperativas de viviendas
DPA – AIC	Industrias – Consorcio de Riego	DPA – ARSA
Municipio – Centros de promoción comunitaria	Asentamientos – Consorcio de Riego	DPA – Cooperativas de viviendas
Municipio – Escuelas	Asociaciones vecinales – Asentamientos	ARSA – Cooperativas de viviendas
Consorcio de Riego – Productores	Industrias – DPA	Municipio – DPA
INTA – Productores	DPA – Asentamientos	Municipio – ARSA
INTA – AIC		Municipio – Consorcio de Riego
INTA – DPA		Industrias – Municipio
Asociaciones vecinales – Centros de promoción comunitaria		Industrias – ARSA
Asentamientos – Centros de promoción comunitaria		Municipio – Asentamientos
Escuelas – Centros de promoción comunitaria		DPA – Consorcio de Riego

El análisis realizado permite señalar que el DPA constituye un actor preponderante en la red de relaciones que vinculan a los distintos actores. Tiene relaciones de conflicto con las industrias, a las cuales debe controlar el vertido de efluentes a los colectores, y también con los asentamientos, pues en algunos casos éstos usurpan las banquetas de los colectores. Mantiene vínculos con otros actores político - institucionales, por ejemplo, con INTA y la AIC. Con el Consorcio de Riego Cipolletti, ARSA y la Municipalidad de Cipolletti posee una relación de colaboración y conflicto, dada la actuación específica de estos organismos sobre los colectores de drenaje. Su rol como referente institucional es reconocido por el resto de los actores, lo cual le da un liderazgo que

deberá ser debidamente considerado a la hora de proponer el esquema de organización.

El tercer actor es ARSA, con una situación un poco más compleja en relación con ciertos déficits en la atención del servicio de agua potable y en particular del saneamiento. El Consorcio de Riego es otro actor relevante que mantiene vínculos de colaboración y conflicto con muchos actores, entre ellos las industrias, el DPA, la Municipalidad, las asociaciones vecinales y los asentamientos.

Los actores fuertes, productores e industrias, mantienen importantes vinculaciones con el Consorcio de Riego, en un caso de colaboración y en otro de conflicto. Los actores influyentes, como la

AIC, el INTA, mantienen relaciones con numerosos actores. Los actores respetados (en particular los centros de promoción comunitaria y las escuelas) aparecen con relaciones que los vinculan al resto de los actores.

El segundo actor dominante es la Municipalidad por sus múltiples vínculos y su capacidad de acción. En particular se observan las fuertes vinculaciones de cooperación y conflicto que mantiene con los otros actores dominantes (DPA, ARSA y Consorcio de Riego).

Entre los actores vulnerables y marginados son visibles las situaciones de conflicto de los asentamientos informales y las asociaciones vecinales de los barrios,

tanto entre sí como hacia los actores dominantes, ARSA, DPA y Consorcio de Riego. No es el caso de las cooperativas de vivienda que mantienen una relación de cooperación tanto con ARSA y DPA, y alternativamente de colaboración y conflicto con la Municipalidad con relación a los planes de vivienda.

En la Figura 9 no se ha incluido el Poder Judicial, ya que por su carácter intrínseco mantiene una independencia del resto de los actores. De manera similar se puede señalar a los medios de comunicación. En el caso de las Universidades y las ONG, no se han detectado en la actualidad relaciones significativas de estos actores con la problemática descrita.

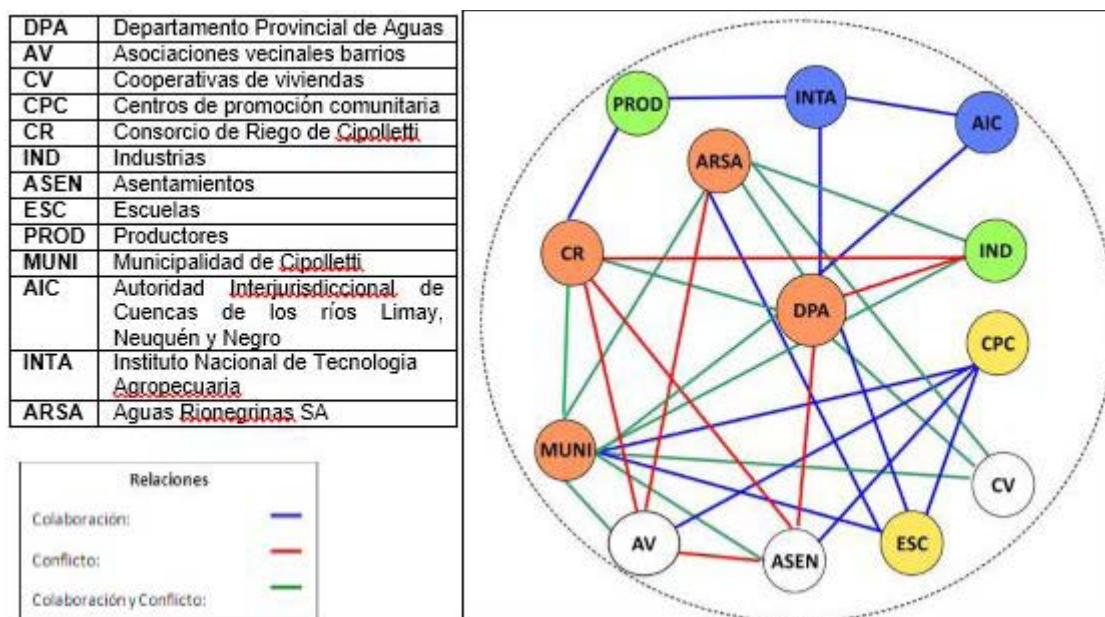


Figura 9. Relaciones de colaboración y conflicto entre actores

3.2. Estructura organizacional

Una vez caracterizados los actores e identificadas las relaciones de colaboración y conflicto existentes entre ellos, es posible plantear una estructura de organización para gestionar los colectores de drenaje de la Ciudad de Cipolletti, la cual deberá:

- contener a los distintos actores reconociendo sus roles actuales, potenciando sus fortalezas y mitigando sus debilidades.
- visibilizar las relaciones que vinculan a los distintos actores, promoviendo espacios de comunicación que brinden protagonismo a todos los interesados.
- diferenciar las instancias ejecutivas de las deliberativas.
- disponer de una instancia de negociación y resolución de conflictos.

Sobre estas premisas se propone la conformación del Consejo de los Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti, el cual tendrá como misión institucional definir las políticas de gestión e implementar a través de los organismos que lo integran las acciones

estructurales y medidas no estructurales necesarias para el funcionamiento sostenible de los colectores de drenaje de la Ciudad de Cipolletti, en un esquema de coordinación interinstitucional y teniendo en cuenta los intereses y necesidades de los distintos actores.

El Consejo está compuesto por tres Comités y una Mesa de Diálogo, tal como se presenta en la Figura 10.

- Comité Ejecutivo: Es el ámbito a través del cual se gestionarán las medidas de acción que se requieran en orden a cumplir con la misión del consejo. Es una instancia ejecutiva, pero con un esquema de participación, consulta y asesoramiento con los restantes comités integrantes del consejo. Estará constituido por representantes de las siguientes instituciones (un titular y un alterno por cada una): DPA, Municipalidad de Cipolletti y Consorcio de Riego. También integrarán este comité un titular y un alterno en representación de los usuarios.

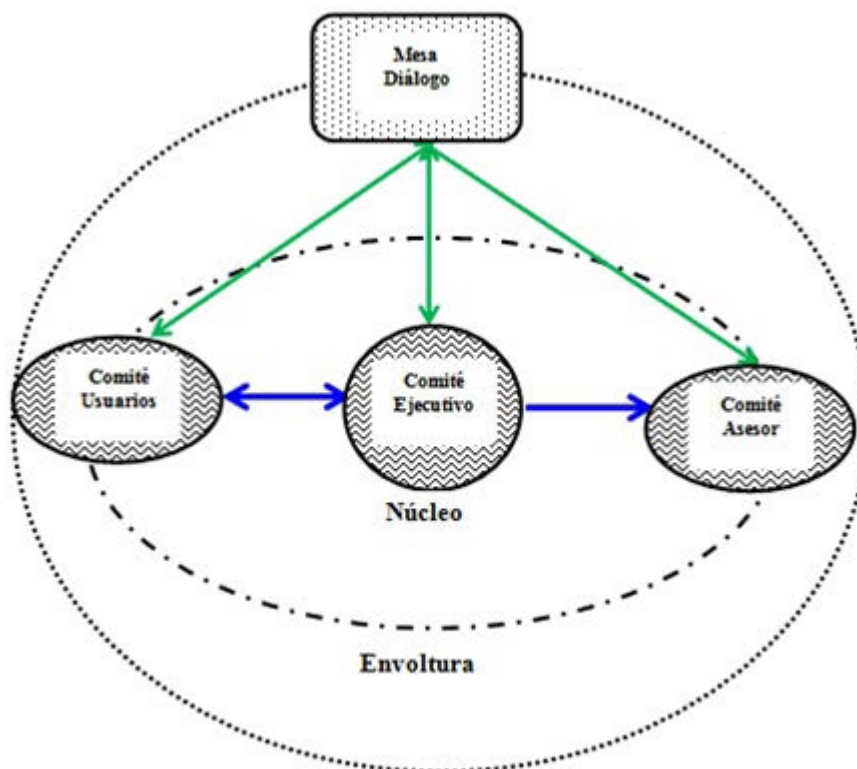


Figura 10. Estructura del Consejo de los Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti

- **Comité de Usuarios:** Es una estructura deliberativa en la cual los usuarios del sistema puedan llevar sus inquietudes, establecer prioridades y elevar requerimientos al Comité Ejecutivo. Es un ámbito de expresión y de control entre pares, que promueve una participación efectiva que responda a los principios de la GIRH. Estará constituido por representantes de ARSA, las industrias, los productores, las cooperativas de viviendas, los barrios y los asentamientos vinculados a los colectores de drenaje. En este comité cada uno de los actores mencionados tendrá un representante titular y un alterno.
- **Comité Asesor:** es una estructura de consulta y apoyo a la toma de decisiones que interactúa tanto con los restantes comités como con la Mesa de Diálogo. Se configura como una instancia de facilitación técnica en el abordaje de los distintos problemas o situaciones de conflicto que deban ser resueltas. Es una red de instituciones del sistema científico tecnológico, organismos técnicos y actores de la sociedad civil, que aportarán sus saberes para el mejor cumplimiento de la misión del Consejo. La coordinación del Comité Asesor será ejercida en forma rotativa por una de las instituciones miembros del mismo. Estará constituido por representantes de los centros comunitarios, escuelas, universidades, ONG, INTA, AIC, medios de comunicación y nuevos actores que pudieran sumarse.
- **Mesa de Diálogo:** Como se indicó, la Mesa de Diálogo es un espacio de negociación y acuerdo, que adquiere relevancia en situaciones donde las instancias ejecutivas, deliberativas y de consulta no logran cumplir con la misión institucional del consejo y no se puede alcanzar un correcto desempeño de las funciones que tiene cada uno de los comités. Es un espacio de interlocución y diálogo para la prevención, gestión y resolución de conflictos, que tiene el propósito de reducir los litigios judiciales, favorecer el logro de consensos y promover procesos de integración de visiones hacia un enfoque de GIRH (Ormaechea Choque, 2011).

La estructura descrita permite concluir que:

1. El consejo se estructura en base a comités
2. Las estructuras gubernamentales consideradas dominantes participan mayoritariamente en las instancias de decisión, esto es el Comité Ejecutivo
3. Los usuarios del sistema debidamente organizados, entendiendo por tales a aquellas instituciones, organizaciones de la sociedad civil, industrias y productores que descargan efluentes o excedentes a los colectores, participarán en las instancias deliberativas y tendrán representación en las instancias de decisión

4. Los actores influyentes y respetados que no guardan una vinculación directa con los colectores de drenaje, pero que pueden brindar apoyo técnico, legal, comunicacional o educativo, participarán en las instancias de consulta
5. Los conflictos tratarán de ser resueltos en una Mesa de Diálogo, que se articulará e integrará con las estructuras de gestión y resolución de conflictos existentes, como por ejemplo la Defensoría del Pueblo de Río Negro
6. Las instancias de implementación del plan de acción estarán a cargo de los organismos gubernamentales que participen del Comité Ejecutivo
7. El monitoreo y seguimiento estarán a cargo de las instancias de decisión, con participación de los usuarios y eventualmente de organismos técnicos de consulta que pudieran requerirse

La lectura de las funciones señaladas para cada uno de los componentes del Consejo de los Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti, da una idea del grado de articulación existente entre los mismos. En efecto, las relaciones cruzadas entre el Comité Ejecutivo y el Comité de Usuarios, y las referencias al Comité Asesor y a la Mesa de Diálogo, dan una idea de la forma de vinculación, bajo el esquema de asociación en red, donde el Comité Ejecutivo constituye el núcleo de la misma. Esta red se sustenta en el interés común de sus actores en alcanzar el mejor funcionamiento posible de los colectores de drenaje y su adecuada integración en un esquema de equidad social y sustentabilidad ambiental.

Asimismo, los intereses sectoriales encuentran en la Mesa de Diálogo un ámbito de prevención y resolución de conflictos al que todos pueden acudir, priorizando una instancia de cooperación en lugar de competencia.

Un aspecto destacado de la estructura en red es la contribución que la misma hace a la formación de lazos y vínculos entre diversos grupos sociales, evitando el aislamiento de sus integrantes y promoviendo un poderoso mecanismo para compartir informaciones y conocimientos que faciliten acciones que promuevan el desarrollo sustentable.

4. CONCLUSIONES

La metodología de análisis empleada, que consideramos vías para la identificación de actores (esferas de acción y relevancia social), permitió caracterizarlos dándoles un verdadero protagonismo, muchas veces no debidamente advertido en base a análisis que sólo se limitan a la esfera de acción.

El Análisis Social CLIP permitió entender los roles que cada uno de estos actores tiene y cómo ello debe ser considerado a la hora de proponer una estructura de organización para gestionar el Sistema de Colectores

de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti. En efecto, se dispuso así de dos elementos claves para definir un esquema de organización: las instituciones y actores sociales involucrados, y las vinculaciones existentes entre ellos.

El esquema de organización propuesto, denominado Consejo de los Colectores de Drenaje de la Ciudad de Cipolletti, incluye una definición clara y concreta de los roles y responsabilidades de sus integrantes. Su diseño asegura la participación de los actores que se relacionan entre sí con diferentes visiones y posiciones. El Consejo se compone de tres Comités (Ejecutivo, de Usuarios y Asesor) y una Mesa de Diálogo para resolución de conflictos. Esta estructura asegura una buena gobernanza del sistema de colectores de drenaje en el marco de los principios de la GIRH.

REFERENCIAS

Cap-Net. 2008. Aspectos económicos en la gestión sostenible del agua. Manual de Capacitación y Guía para Moderadores.

[http://www.cap-net.org/sites/cap-net.org/files/Economics_of_water_FINAL_ES\[2\].pdf](http://www.cap-net.org/sites/cap-net.org/files/Economics_of_water_FINAL_ES[2].pdf).

Chevalier, J. & Buckles, D. 2009. Sistemas de Análisis Social – Guía para la investigación colaborativa y la movilización social – Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). Ottawa, Canadá – 1ª edición.

Conghos, M.; Reyes, P. & Fernández, P. 2013. Índices de calidad en colectores de drenaje. Caso particular desagüe P2. Informe interno del DPA (Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro).

DPA - Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro. 1996. Código de Aguas de la Provincia de Río Negro. Ley Q Nº 2952.

DPA - Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro. 2008. Informe cuerpos receptores y descargas industriales de Cipolletti.

DPA - Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro. 2010a Informe sobre monitoreo y evaluación de colectores de Cipolletti.

DPA - Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro. 2010b. Proyecto de defensa contra inundaciones Barrios Costa Norte, Costa Sur y Labraña.

Fernández P., Reyes P., Rossi P & Gil M. 2006. Informe Preliminar Colectores de Drenaje. Informe interno del DPA (Departamento Provincial de Aguas de la Provincia de Río Negro).

Geilfus, F. 2009. 80 Herramientas para el desarrollo participativo – Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - San José de Costa Rica.

GWP - Global Water Partnership. 2000. Manejo integrado de recursos hídricos. Estocolmo, Suecia. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/TAC4sp.pdf>.

Lozeco C. 2013. Desarrollo de un esquema de gestión integrada para los colectores de drenaje de la ciudad de Cipolletti (Río Negro, Argentina). Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Ormachea Choque, I. 2011. Pautas para procesos de diálogo desde la gestión pública. Programa de apoyo para una cultura de paz y el fortalecimiento de capacidades nacionales para la prevención y el manejo constructivo de conflictos. Lima, Perú. http://www.democraticdialoguenetwork.org/documents/view.pl?f_id=1834;lang=es.

Peri, G. 2004. La agricultura irrigada en Río Negro y su contribución al desarrollo regional. Banco Mundial.

Pollolín S.A. 2012. Compartir lo nuestro. Publicación interna. Año 2 N° 4.

Rodríguez Diez, M. A. & Rodríguez Diez, O. M. 2003. Plan Preliminar de Modernización del Sistema de Riego y Drenaje del Alto Valle. Informe Final. Consejo Federal de Inversiones – Provincia de Río Negro.

Torregrosa Martí, M. 2007. El modelo socioeconómico de gestión de los recursos hídricos en la Comarca de La Marina Baja (Alicante). Un enfoque de GIRH. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. Alicante. España.

Urrutia, A. 2004. Identificación de los Actores Claves para el Manejo Integrado de las Subcuencas de los ríos Los Hules.

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE INFILTRACIÓN DE PHILIP PARA ÁREAS PERMEABLES DEL EJIDO URBANO DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA, ARGENTINA

PARAMETER ESTIMATION FOR PHILIP'S INFILTRATION MODEL IN PERVIOUS AREAS OF CORDOBA CITY, ARGENTINA

Weber, Juan Francisco¹

Resumen

Se presentan parámetros para el modelo de infiltración de Philip calibrados a partir de los resultados obtenidos en una campaña de medición in situ en la ciudad de Córdoba (Argentina). Como instrumento se utilizó un microsimulador de lluvia portátil diseñado y construido por este grupo de trabajo. Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m², permite generar lluvias de intensidades comprendidas entre los 65 y 120 mm/h. La selección de los sitios de ensayo respondió al tipo y el uso del suelo. A su vez, se consideraron distintas condiciones de humedad inicial. La campaña de medición se extendió durante 7 meses, realizando entre 2 y 3 ensayos por semana. Los valores medidos fueron digitalizados y procesados, construyéndose las curvas de infiltración acumulada y tasa de infiltración en función del tiempo. A partir de estos valores, se ajustaron los parámetros S y K del modelo mencionado, a través de un procedimiento recursivo especialmente desarrollado que resultó altamente eficiente. El grado de ajuste alcanzado fue muy satisfactorio, con valores de R² medios de 0,999. Se considera que estos parámetros representan un aporte original al conocimiento de la hidrología urbana en la ciudad de Córdoba (Argentina).

Palabras clave: Infiltración, simulador de lluvia, modelo de Philip

Abstract

Parameters are presented for Philip's infiltration model, calibrated from the results of a field measurement campaign in the city of Córdoba (Argentina). A portable rainfall micro-simulator designed and built at the Hydraulics Laboratory (UTN- Facultad Cordoba) was used. This equipment, which can be completely disassembled and defines a test plot of 1 m², can generate rainfall intensities between 65 and 120 mm / h; runoff is collected and manually measured through two graduate cylinders. Site selection was related to two conditions: soil type (indirectly through geomorphology) and soil use (through traffic intensity level). Additionally, different initial moisture conditions were considered. For comparison, we also performed simultaneous measurements with the double-ring infiltrometer technique. The measurement campaign lasted seven months and involved the work of three people simultaneously, performing between two and three tests per week. The measured values were digitized and processed; curves of cumulative infiltration and infiltration rate versus time were constructed. From these values, parameters S and K were adjusted for Philip's model, through a specially developed recursive procedure that was highly efficient. The degree of fit achieved was very satisfactory, with average values of R² near 0.999. These parameters are considered to represent an original contribution to knowledge of urban hydrology in the city of Córdoba (Argentina).

Key words: Infiltration, rainfall simulator, Philip's model

INTRODUCCIÓN

En trabajos ingenieriles vinculados al diseño y cálculo de obras de desagüe pluvial urbano, el proyectista se ve en la obligación, a la hora de cuantificar los caudales de aporte, a considerar dos tipos de superficies en las cuencas: las impermeables y las permeables. Las primeras, sin duda provocan un alto impacto en el volumen de crecidas y una disminución del tiempo de respuesta de la cuenca (Tucci, 2001). En cuanto a las segundas, es posible utilizar diversas formulaciones a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo, y por tanto, la fracción infiltrada, entre ellas el denominado Método Racional (Chow et al., 1994), el conocido método del

CN-SCS (SCS, 1972) muy difundido en su aplicación a través de los populares programas de computadora HEC-1 (USACE, 1981) y más modernamente HEC-HMS (USACE, 2001), el método de Horton (1939), difundido en el ámbito de la hidrología computacional a través de (entre otros) el conocido modelo SWMM (USEPA, 1977). Estos, como muchos otros modelos conceptuales del proceso de infiltración (Ravi & Williams, 1998), intentan simplificar el abordaje riguroso del problema, representado por la ecuación de Richards (Chow et al., 1994), y por tanto son los utilizados más ampliamente en la práctica hidrológica.

¹ Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Argentina. jweber@civil.frc.utn.edu.ar

Una de las principales dificultades que encuentra el modelador a la hora de aplicar estos modelos de infiltración es la de estimar los parámetros de los mismos, tratando de lograr una adecuada representación de la realidad. Lamentablemente, existen grandes dificultades a la hora de disponer de datos medidos de infiltración en áreas permeables urbanas en la República Argentina. En la ciudad de Córdoba, por ejemplo, recién se encara una tarea sistemática de producción de información experimental al respecto a partir del trabajo de Weber et al (2005), desde el Laboratorio de Hidráulica (LH-UTN), dependiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional a través una campaña de obtención de datos experimentales de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, a través de la técnica del infiltrómetro de doble anillo. Este procedimiento de ensayo, también conocido como método de Müntz (Custodio & Llamas, 1976) permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). Son conocidas las severas limitaciones que presentan las mediciones así determinadas, fundamentalmente en relación a la falta de representatividad del proceso lluvioso en la técnica de ensayo, por un lado, y a la fuerte alteración de la superficie del terreno debido al hincado de los anillos; estas limitaciones conllevan a errores experimentales difíciles de cuantificar.

Con el objetivo de obtener una caracterización experimental más verosímil del proceso hidrológico de la infiltración, se propuso utilizar como instrumento de ensayo un simulador de lluvia portátil desarrollado en el LH-UTN; se visualizan como beneficios inmediatos: la mejor simulación del proceso lluvia – infiltración, y la menor alteración de la parcela de ensayo, es decir, se intenta subsanar las limitaciones del procedimiento del infiltrómetro de doble anillo anteriormente utilizado.

El objetivo del presente trabajo es estimar los parámetros del modelo de infiltración de Philip (un modelo hidrológico de base física) para distintos sitios permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, en base a información experimental recabada in situ mediante el uso de un microsimulador de lluvia portátil, en una campaña de medición diseñada y desarrollada a tal fin. El modelo de infiltración de Philip ha sido seleccionado para este trabajo, teniendo en cuenta que se trata de uno de los pocos modelos de infiltración hidrológicos de base física, y el de menor número de parámetros entre ellos; lo que redundaría a favor de su parsimonia.

METODOLOGÍA

El simulador de lluvia

Se describen a continuación las características generales del equipo utilizado en el desarrollo de la presente campaña de medición (Weber et al, 2009; 2010).

El micro simulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la

precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la microcapa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial. Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua. La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis, 1981; Rostagno y Garayzar, 1995). El mayor de estos problemas recae sobre la reproducción de gotas que se asemejen a las de una lluvia natural.

El formador de gotas utilizado se compone de una aguja hipodérmica de 2 pulgadas de longitud y 0.8 mm de diámetros interno, introducida en tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja. Se decidió colocar un total de 289 formadores, distribuidos en 17 filas por 17 columnas, y separados a una distancia de 5.30 cm entre ejes, cubriendo de esta manera cada formador, un área aproximada de 28.10 cm² sobre la base de una batea de 96 cm x 96 cm de lado.

El equipo (Figura 1) consta básicamente de una estructura metálica, de caño de acero de sección cuadrada, formando un prisma cuadrado de 2 m de altura y 1 m de lado. Este prisma se forma a través de cuatro columnas y cerrado por medio de cortinas rompevientos. Las columnas sostienen el sistema de alimentación de agua que está compuesto por dos tanques; uno de alimentación, solamente y el otro de alimentación y regulación de intensidad. La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante (Achutegui et al., 1996). Debajo del sistema de alimentación de agua se encuentra la batea con los 289 formadores de gotas, que producen la lluvia simulada. La base de este prisma está constituida por un marco cuadrado de hierro, de 1 m de lado y 0.10 m de altura, con vertederos en sus cuatro lados y canales para el transporte del agua escurrida. Este marco es hincado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición. El peso total del equipo armado es de 110.6 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 kg.

Para la calibración se utilizaron cinco probetas graduadas de 1 000 ml, con divisiones de 10 ml cada una. En su parte superior se les colocó un embudo de 32 cm de diámetro exterior y 31 cm de diámetro interior, funcionando el conjunto como un pluviómetro.

Se midió el tiempo que tardó en llenarse un volumen fijo de 850 ml en cada pluviómetro para las diferentes cargas sobre formadores estudiadas. Estas fueron 11 cm, 13 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20cm, 22,5cm y 25cm. Cada uno de los puntos fue medido simultáneamente durante un funcionamiento continuo del simulador

de lluvia de aproximadamente 2 h por ensayo, obteniéndose de esta manera 10 datos por pluviómetro, y una muestra total de 50 datos para cada carga analizada. Esto representa un total de 350 datos obtenidos.

Los resultados de estas mediciones debieron ser corregidos por el error sistemático introducido en el posicionamiento de los pluviómetros, que produjo que el número de formadores capturados variara entre 23 y 25.



Figura 1. Simulador de lluvia en campaña

Se verificó la normalidad de la distribución de las observaciones, estandarizando cada serie. Con los valores medios de intensidad obtenidos para cada carga, se trazó la curva de ajuste indicada en la figura 2. En esta figura, las curvas que rodean a la regresión potencial corresponden a bandas de 99% y 90% de certidumbre, respectivamente.

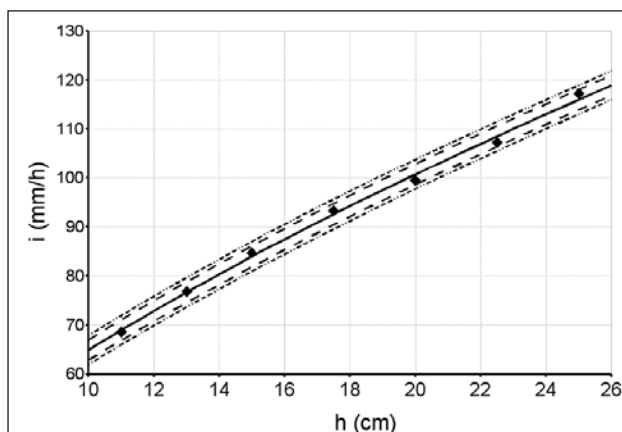


Figura 2. Curva de calibración del simulador de lluvia

La ecuación de regresión obtenida, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,997$ fue

$$i = 15.15h^{0.63} \quad (1)$$

En esta ecuación, i es la intensidad de lluvia producida (en mm/h) y h es la carga (en cm) sobre los formadores.

Del análisis estadístico de los datos, se pudo concluir que los valores de intensidad obtenidos a partir de la ecuación (1) tienen una incertidumbre asociada de 3 mm/h, lo cual representa un error de entre el 3 y el 5 % de la intensidad producida.

Trabajos experimentales

Al igual que en tareas previas (Weber et al, 2005), para la definición de los sitios de ensayo se consideró que las dos variables a priori más influyentes sobre los resultados a obtener eran el tipo de suelo y el uso del suelo. Con respecto al tipo, más que a una clasificación geotécnica se asumió que una clasificación de características regionales resultaría con mayor representatividad hidrológica. Para ello, se fijó como criterio la clasificación de ambientes geomorfológicos desarrollada por Quintana Salvat y Barbeito (1994). Este trabajo detectó básicamente dos ambientes diferenciados en el ejido de la ciudad de Córdoba: la planicie loessoides (correspondiente a un suelo del tipo limo arenoso, de gran cohesión en condiciones de baja humedad) y la terraza de inundación del antiguo cauce del río Suquía (Primero), la cual fue a su vez clasificada por los autores citados en tres subambientes: terraza baja, media y alta, según su cercanía al actual cauce del río que atraviesa la ciudad.

En cuanto al uso del suelo, se distinguió básicamente en tres tipos fundamentales: los patios y jardines de viviendas residenciales (espacios verdes con bajo tránsito), las plazas, parques y paseos públicos (espacios verdes con medio tránsito), y finalmente las calles no pavimentadas (calles de tierra). El principal criterio de selección se basó en la intensidad del tránsito, tanto peatonal como vehicular, debido a su impacto directo en la capacidad del infiltración del suelo. Además, se agregó como punto de interés especial el lecho de una laguna de detención en la zona norte de la ciudad.

En la Figura 3 se muestra el Plano Geomorfológico de la ciudad de Córdoba, con la indicación de los sitios seleccionados (clasificados según el uso de suelo) y los diversos ambientes geomorfológicos descriptos (Weber et al., 2011). Puede observarse la amplitud geográfica de la región involucrada. La Tabla 1 muestra los sitios de ensayo seleccionados clasificados según el uso del suelo y el ambiente geomorfológico. Como puede verse, no fue posible conseguir terreno disponible para realizar el ensayo

correspondiente a espacios verdes de bajo tránsito en la terraza media del río Suquía, debido a que este ambiente cubre un área relativamente pequeña

y fuertemente urbanizada de la ciudad. En total se ensayaron 12 sitios a lo largo del ejido urbano de la ciudad.

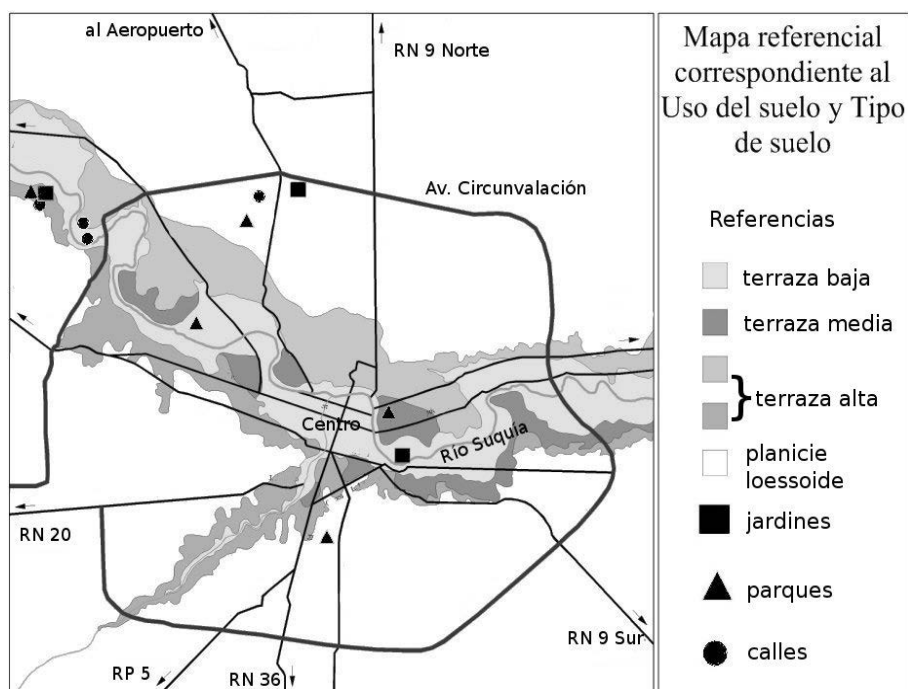


Figura 3. Ubicación de sitios de ensayo

En cada uno de los sitios seleccionados se realizaron tres ensayos con el simulador de lluvia, bajo intensidades relativamente constantes (del orden de los 70 mm/h) con diferentes condiciones iniciales de humedad, las cuales fueron obtenidas o bien por las condiciones climáticas imperantes o bien los terrenos fueron humedecidos (regados) previamente a partir de condiciones secas. Además, en la mayoría de los

sitios se realizó simultáneamente el ensayo clásico de infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo, como control y contraste de las mediciones efectuadas. La campaña de medición se extendió durante siete meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre dos y tres ensayos por semana.

Tabla 1. Sitios de ensayo

Tipo de suelo	Uso del suelo		
(ambiente geomorfológico)	Espacios verdes (bajo tránsito)	Espacios verdes (medio tránsito)	Calles no pavimentadas (alto tránsito)
Terraza alta	ITS Villada	ITS Villada	ITS Villada
Terraza media	-----	Parque General Paz	Justo Liebig 5940 – B° Villa Belgrano
Terraza baja	Torres de B° Junior	Parque de las Naciones	Carlos Gauss 4619 – B° Villa Belgrano
Planicie loessoide	L. Suárez de Figuroa – B° M. de Sobremonte	- parque UTN - Laguna de detención	Hugo Miatello 4600 – B° Poeta Lugones

La duración de los ensayos fue variable, comprendida en general entre 1.5 y 2 h, dependiendo del comportamiento observado in situ del proceso de infiltración, en cuanto a la velocidad con que se alcanzó la condición de régimen. El número y frecuencia de las observaciones también fue dependiente de la condiciones locales encontradas,

observándose una menor frecuencia de medición en el simulador (y por tanto, una mayor frecuencia en el infiltrómetro) en los suelos de mayor capacidad de infiltración. Para facilitar la tarea de medición, se seleccionó en cada caso el volumen de medición, el cual varió desde 50 hasta 500 cm³.

Antes del inicio de cada ensayo, se extrajeron muestras de suelo para la determinación del contenido de humedad antecedente. El contenido de humedad fue determinado gravimétricamente, a través de la extracción de muestras de suelo a 10 cm de profundidad, secándolas en estufa a 110 °C y pesando la muestra seca. La humedad gravimétrica ω se determina a través de la expresión (2):

$$\omega = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

donde m_a es la masa de agua en la muestra de suelo, que resulta de la diferencia entre la masa de la muestra húmeda menos la masa de la muestra seca; y m_s es la masa de la muestra seca. Para relacionar la humedad gravimétrica ω (de uso principal en Geotecnia) con la humedad volumétrica θ (más frecuentemente usada en Hidrología Subterránea) se utilizó la expresión (3) (Tucci, 1993):

$$\theta = \omega \frac{d_a}{d_s} \quad (3)$$

En esta expresión d_a es la densidad del agua (asumida 1 g/cm³) y d_s es la densidad (peso unitario) del suelo. Este valor fue estimado a partir de las observaciones in situ realizadas en tareas anteriores en cada uno de los ambientes geomorfológicos descriptos (Weber et al, 2005).

Los datos así obtenidos fueron digitalizados y procesados. En las figuras 4 y 5 se presentan, a modo de ejemplo, la tasa de escurrimiento superficial y la infiltración acumulada obtenidas para un ensayo en uno de los sitios en particular (L. Suárez de Figueroa – B° M. de Sobremonte) bajo una intensidad de lluvia de 66,6 mm/h.

El modelo de Philip

Philip, en 1957 (Chow et al, 1994) partió de la ecuación de flujo en medios porosos no saturados, o ecuación de Richards, para obtener, mediante la transformación de Boltzmann una ecuación diferencial ordinaria, de cuya solución en series conservó los dos primeros términos, obteniendo su ecuación para la infiltración acumulada $F(t)$:

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad (4)$$

donde K es la conductividad hidráulica y S un parámetro denominado sortividad relacionado con carga de succión capilar o tensión mátrica del suelo. Por diferenciación se obtiene la expresión de la tasa de infiltración:

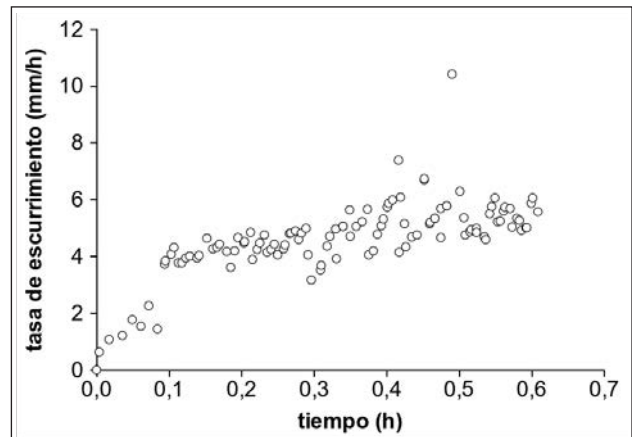


Figura 4. Tasa de escurrimiento superficial – Marqués de Sobremonte

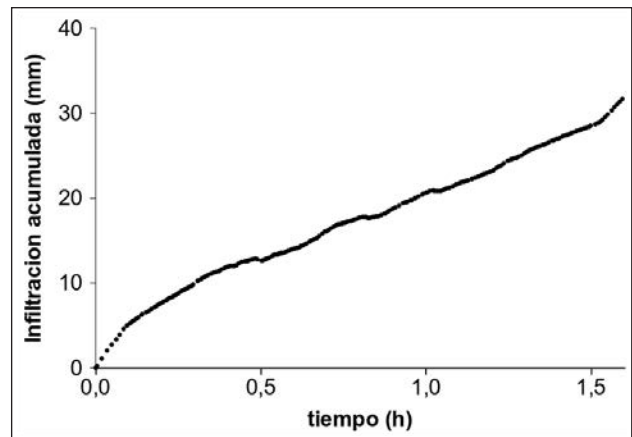


Figura 5. Infiltración acumulada – Marqués de Sobremonte

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad (5)$$

Puede verse entonces que el modelo de Philip es biparamétrico. El parámetro K es el valor de la tasa base de infiltración, ya que si $t \rightarrow \infty$, $f \rightarrow K$, como puede observarse en la Figura 6, donde se representa el valor de $f(t)$ para distintos parámetros del modelo de Philip. Como puede verse, a igualdad de valor de K , para distintos valores de S , el valor al que tiende la tasa de infiltración a medida que aumenta el tiempo es el mismo; además se aprecia la indeterminación asociada al valor $t = 0$, lo que se traduce en la inexistencia de una tasa inicial de infiltración (como en el modelo de Horton, por ejemplo) y presumiblemente una mayor incertidumbre en las estimaciones de la tasa de infiltración en estadios tempranos del proceso. Si bien en teoría K es la conductividad hidráulica del suelo, en la práctica resulta un valor menor, ya que en condiciones habituales es casi imposible el desplazamiento total de la fracción gaseosa en la matriz de suelo y por tanto no se alcanzan los valores máximos correspondientes a la permeabilidad vertical saturada. Otro aspecto a destacar es que a igualdad de valor de K , mayores valores de S dan

lugar a mayores valores de infiltración inicial y un decaimiento más lento de la capacidad de infiltración, como también puede observarse en la Figura 6.

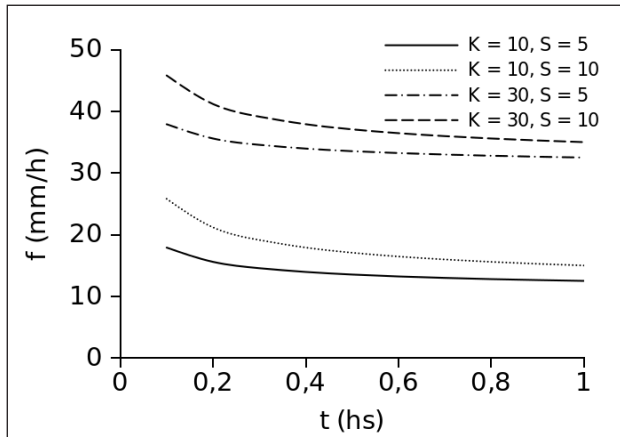


Figura 6. Tasa de infiltración dada por el modelo de Philip para distintos valores de sus parámetros

Ajuste de parámetros

Para el ajuste de los parámetros del modelo de Philip a los datos experimentales recabados, se desarrolló un algoritmo recursivo que permitió realizar en forma eficiente este ajuste. Este ajuste se realizó sobre los datos de infiltración acumulada en lugar de los valores de tasa de infiltración, dado que al ser una variable integral los errores experimentales se reducen y por tanto la incertidumbre asociada a los parámetros estimados. Para ello, se definieron dos variables auxiliares $F^K(t)$ y $F^S(t)$ definidas como:

$$F^K(t) = F(t) - St^{1/2} = Kt \quad (6)$$

$$F^S(t) = F(t) - Kt = St^{1/2} \quad (7)$$

La aplicación del método de mínimos cuadrados permite obtener unas expresiones explícitas para los parámetros S y K:

$$K = \frac{\sum F_i^K t_i}{\sum t_i^2} \quad (8)$$

$$S = \frac{\sum F_i^S t_i^{1/2}}{\sum t_i} \quad (9)$$

De este modo, dándole un valor inicial razonable a uno cualquiera de los parámetros (en este caso, $S = 10 \text{ mm/h}^{0.5}$) se desarrolla el siguiente algoritmo:

1. se calcula el vector F^K a partir de la expresión (6).
2. se calcula un nuevo valor de K a partir de la expresión (8).
3. se calcula el vector F^S a partir de la expresión (7).
4. se calcula un nuevo valor de S a partir de la expresión (9).
5. se evalúan los errores aproximados absolutos en la estimación de K y S, si ambos están por debajo de una tolerancia prefijada (10^{-4}) el proceso finaliza, caso contrario se vuelve al punto 1.

Este procedimiento recursivo, del tipo iteración de punto fijo, permitió hallar los 34 juegos de parámetros S y K para los datos experimentales descriptos, de una forma altamente eficiente, salvando el inconveniente que originalmente surgió al plantear una regresión lineal múltiple sobre los pares (t_i, F_i) lo cual dió lugar en todos los casos a una matriz de coeficientes muy mal acondicionada, con números de condición del orden de 10^{16} .

RESULTADOS

Aplicando el procedimiento indicado anteriormente a la información experimental recabada, se obtuvieron 34 juegos de parámetros para este modelo (ya que hubo dos mediciones que se consideraron no válidas), junto con el propio valor de la función objetivo F.O., el cual es una medida del grado de ajuste alcanzado. En la tabla 2 se presentan los valores ajustados de estos parámetros para cada sitio de ensayo, y para cada medición, para el modelo de Philip. Como puede verse, los valores de R^2 son altos, comprendidos entre 0.9934 y 0.9999, con una media de 0.9986. En la Figura 7 se presentan, a título comparativo, los valores de R^2 obtenidos por el modelo de Philip versus los obtenidos por otros dos modelos biparamétricos de amplio uso en Hidrología, como son el modelo de Kostiakov (Weber y Apestegui, 2014) y el método del CN-SCS (Weber, 2014a). Puede observarse que en la mayoría de los casos, los valores de R^2 de Philip son superiores a los correspondientes de Kostiakov, mientras que en la totalidad de los casos los valores de R^2 de Philip son superiores a los correspondientes del método CN-SCS. Esto muestra que el modelo de Philip resulta ser el que mejor describe el proceso entre los modelos de infiltración usuales de dos parámetros.

En la Figura 8, a título de ejemplo, se presenta la infiltración acumulada resultado de tres mediciones: una en una zona de alto tránsito (primera medición calle Gauss), otra en una de tránsito medio (primera medición parque ITS Villada) y otra en una zona de bajo tránsito (primera medición jardín ITS Villada); junto con el ajuste obtenido por el modelo de Philip;

en los tres casos puede apreciarse un buen ajuste, lo que se manifiesta también en los restantes casos. En la Tabla 3 se presentan los valores medios (junto con su rango de variación) de los parámetros del modelo de Philip en función del uso del suelo.

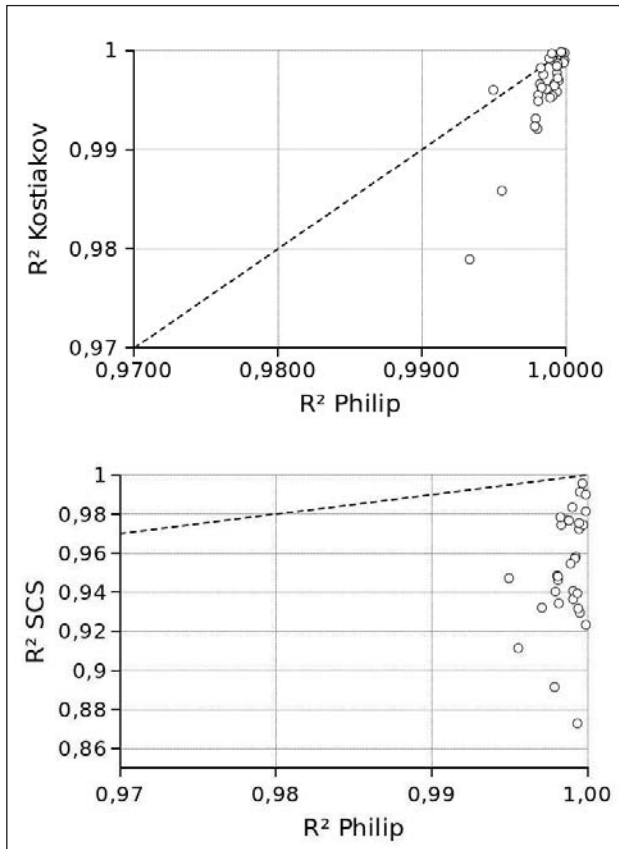


Figura 7. Coeficiente de determinación R^2 obtenido con el ajuste del modelo de Philip versus el R^2 obtenido con el ajuste del modelo de Kostiakov (izquierda) y del método CN-SCS (derecha). La línea de trazos representa la función identidad

Tabla 3. Parámetros medios del modelo de Philip según el uso del suelo.

Entre paréntesis el rango de variación

Uso	K (mm/h)	S (mm/h ^{0.5})
calles	17,42 (2,33-33,02)	9,48 (0,17-18,52)
parques	25,44 (10,73-43,02)	9,40 (2,24-16,11)
viviendas	17,23 (2,86-29,32)	13,15 (7,56-21,31)

En la Figura 9 se representa la relación entre los parámetros S y K del modelo, clasificados según el uso del suelo. A pesar de no existir una correlación entre estos parámetros, puede observarse cierta tendencia al agrupamiento en el plano S-K. Esto se destaca graficando superpuestas, las envolventes convexas de cada uno de los tres conjuntos, como se muestra en esta figura.

Weber (2014b) presentó los parámetros del modelo de infiltración de Horton para este conjunto de datos experimentales. Siendo que el parámetro f_b del modelo de Horton tiene un significado físico cercano al del parámetro K del modelo de Philip, resulta de interés su comparación. En la Figura 10 se presenta la relación entre estos parámetros, en conjunto con la recta de regresión hallada, que corresponde a la ecuación:

$$K = 1,063 f_b - 6,983 \quad [mm/h] \quad (10)$$

con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9241. Puede verse que en casi todos los casos los valores de K son inferiores a los correspondientes valores de f_b .

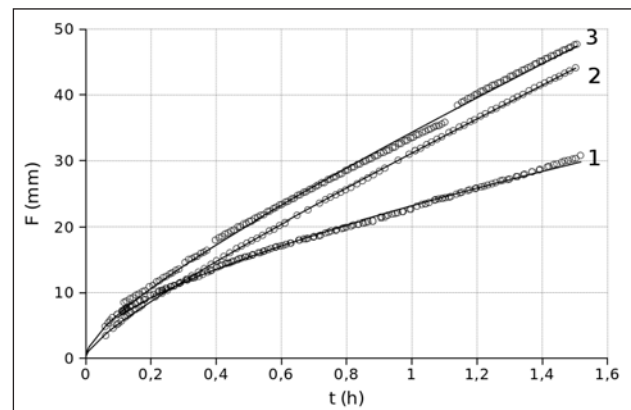


Figura 8. Infiltración acumulada medida (círculos) y obtenida por el modelo de Philip (línea continua) – primera medición calle Gauss (1) ; primera medición parque ITS Villada (2); segunda medición jardín ITS Villada (3)

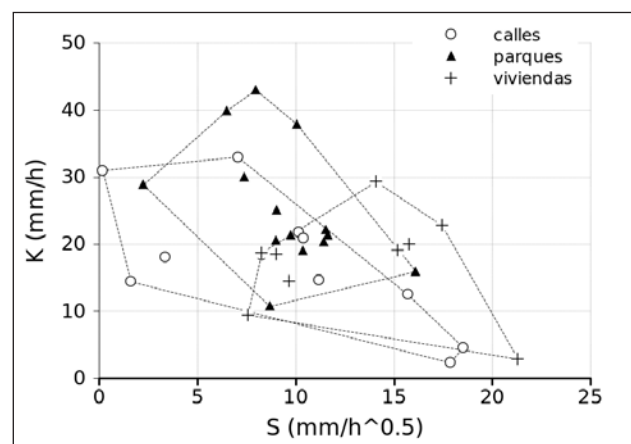


Figura 9. Relación entre los parámetros K y S del modelo de Philip, clasificados según el uso del suelo. Las líneas de trazo representan las envolventes convexas de cada conjunto

Tabla 2. Parámetros del modelo de Philip

Uso	Sitio	1º medición		2º medición		3º medición	
calles de tierra	Gauss 4619	K =	4,594	K =	12,487	K =	14,401
		S =	18,524	S =	15,693	S =	1,610
		R ² =	0,9981	R ² =	0,9979	R ² =	0,9985
	Miatello 4600	K =	21,793	K =	18,377	K =	18,072
		S =	10,135	S =	8,271	S =	3,365
		R ² =	0,9992	R ² =	0,9995	R ² =	0,9994
	Liebig 5940	K =	33,016	K =	30,994	K =	14,627
		S =	7,038	S =	0,173	S =	11,173
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9991	R ² =	0,9999
	ITS Villada	K =	2,325	-----		K =	20,878
		S =	17,855			S =	10,399
		R ² =	0,9971			R ² =	0,9992
parques	Parque Gral. Paz	K =	43,024	K =	20,497	K =	39,898
		S =	7,964	S =	8,982	S =	6,489
		R ² =	0,9995	R ² =	0,9956	R ² =	0,9987
	parque ITS Villada	K =	21,390	K =	28,855	K =	20,369
		S =	9,741	S =	2,240	S =	11,424
		R ² =	0,9999	R ² =	0,9994	R ² =	0,9995
	Laguna de retencion	K =	10,725	K =	19,073	K =	22,134
		S =	8,674	S =	10,377	S =	11,515
		R ² =	0,9982	R ² =	0,9991	R ² =	0,9989
	Parque de las Naciones	K =	37,884	-----		K =	25,064
		S =	10,050			S =	9,031
		R ² =	0,9999			R ² =	0,9981
	UTN	K =	21,337	K =	15,926	K =	30,005
		S =	11,649	S =	16,113	S =	7,373
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9988	R ² =	0,9983
residencias	casa Marques de Sobremonte	K =	29,319	K =	18,459	K =	19,946
		S =	14,085	S =	9,020	S =	15,779
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9994	R ² =	0,9995
	jardín ITS Villada	K =	18,728	K =	19,120	K =	22,787
		S =	8,268	S =	15,174	S =	17,440
		R ² =	0,9950	R ² =	0,9981	R ² =	0,9990
	Torres de Junior	K =	2,857	K =	9,457	K =	14,412
		S =	21,308	S =	7,556	S =	9,675
		R ² =	0,9983	R ² =	0,9934	R ² =	0,9979

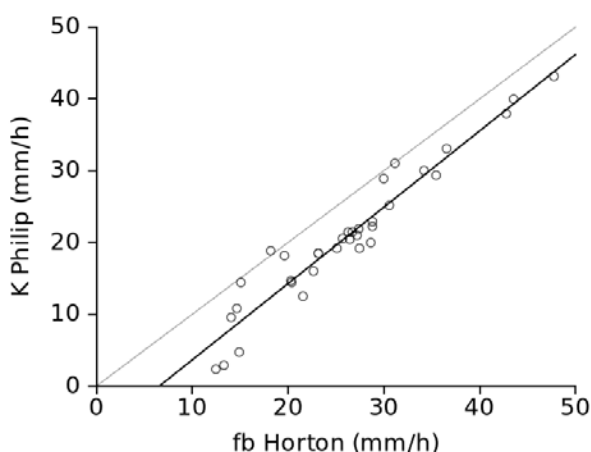


Figura 10. Relación entre los parámetros K del modelo de Philip y f_b del modelo de Horton. La línea de trazos corresponde a la función identidad, mientras que la línea continua corresponde a la regresión lineal

CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada in situ durante la campaña realizada en diversos sitios de la ciudad de Córdoba, ha sido posible ajustar los parámetros del modelo de infiltración de Philip en 34 ensayos distribuidos en 12 sitios de la ciudad. El desempeño del modelo ha resultado satisfactorio, con valores de R^2 altos, y superiores incluso a los de otros modelos biparamétricos en la misma área de estudio.

Al analizar la relación entre los parámetros del modelo y el uso del suelo (nivel de tránsito), si bien se presentan en un amplio rango, se observa cierta tendencia de valores de K y S relativamente bajos en las calles de tierra (lo que se traduce en una menor capacidad de infiltración); valores de K relativamente altos y de S relativamente bajos en parques y paseos públicos (lo que se traduce en una capacidad mínima de infiltración relativamente alta); y valores de K relativamente bajos y de S relativamente altos en áreas verdes privadas, lo que se traduce en una decaimiento relativamente rápido de su capacidad de infiltración.

Es de destacar que en el ajuste de estos parámetros influyen tres fuentes principales de error: los errores experimentales debido a la generación de la lluvia simulada, a la medición del proceso de infiltración, y el error asociado a la estructura matemática del modelo, que surge del truncamiento de la solución en series de la ecuación de Richards. En cualquier caso se considera que, atendiendo a los márgenes de error típicos y aceptados en la práctica de la Hidrología Urbana, los parámetros ajustados permiten representar en forma aceptable el proceso de infiltración en el área de estudio.

Al comparar el parámetro K ajustado para el modelo de Philip, con el parámetro f_b ajustado para el modelo

de Horton en trabajos previos, se observa una correlación significativa, si bien en la grna mayoría de los casos se verifica que $K < f_b$.

En cualquier caso, se considera que el conjunto de parámetros así ajustados resultará de interés para los proyectistas vinculados al manejo del escurrimiento pluvial urbano en la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología (UTN) por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de Investigación consolidado "Caracterización experimental y modelación numérica de los procesos de infiltración, interceptación vegetal e impacto por incendios en cuencas de Córdoba", Código 25/E157. Al Laboratorio de Geotecnia – Facultad Regional Córdoba – Universidad Tecnológica Nacional. A la Dirección de Parques y Paseos, Municipalidad de la ciudad de Córdoba. A los becarios y colaboradores Eliana Baldazar, Matías Bupo, Edwin Rondan, Franco Cosiansi, Emiliano Cobelas. Oscar Gribosqui, Ana Maria Guerrero, Diego Apestegui, Jorge Apestegui, Dario Ferrero, Ignacio Paoli, Francisco Obregón, y al Instituto Técnico Salesiano Villada.

REFERENCIAS

- Achutegui A., X. Abreu & M. L. Páez. 1996. Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gotero con Efecto Vibratorio. *Venesuelos* 4: 24-28.
- Chow, V. T., D. R. Maidment & L. W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Custodio, E. & M. R. Llamas (Eds.). 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega.
- Horton, R. E. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Washington. 693-711.
- Marelli, H. J. 1989. La Erosión Hídrica. Proyecto: Alternativas Mejoradas Conservacionistas de Producción Agrícola Ganadera en el Sur de Córdoba. Publicación técnica N°1. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez, Córdoba, Argentina.
- Pla Sentis, I. 1981. Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. *Rev. Fac. Agron.* 12 (1-2): 81-93. Maracay, Venezuela.
- Quintana Salvat, F. & O. Barbeito. 1994. Base geológica - geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su entorno - Ejido Municipal. *Fotointerpretación* 1(II): 209-256. Córdoba, República Argentina.
- Ravi, V. & J. R. Williams. 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models. Volume I. Technical

- Report No. EPA/600/R-97/128a . United States Environmental Protection Agency , National Risk Management Research Laboratory , Ada, OK 74820.
- Rostagno, C.M. & D. Garayzar. 1995. Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. *Ciencia del Suelo*, 13: 41 – 43 .
- Tucci, C. E. M. 2001. Urban drainage in humid tropics. Volume I *in* Maksimovic, C. Urban drainage in specific climates. IHP-V – Technical Documents in Hydrology No. 40, Vol. 1. UNESCO, Paris.
- Tucci, C. E. M. (Ed.) 1993. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- U.S. Army Corps Of Engineers. 1981. HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual. Davis, CA.
- U.S. Army Corps Of Engineers. 2001. HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual. Davis, CA.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977. SWMM: Stormwater Management Model. Washington, D.C.
- Weber, J. F., L. Apestegui & E. Baldazar. 2011. Medición de la capacidad de infiltración in situ de suelos de la ciudad de Córdoba mediante un microsimulador de lluvia portátil. XXIII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2011, Resistencia.
- Weber, J. F., H. Paoli & L. Apestegui. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina.
- Weber, J. F., H. I. Paoli & L. Apestegui. 2010. Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. *Tecnología y Ciencia*, 9(18): 47-53. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina. ISSN 1666-6917.
- Weber, J. F., J. M. Urbano, E. E. Stuyck, D. Azelart & N. B. Martínez. 2005. Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en suelos de la ciudad de Córdoba. Cuadernos del Curiham. 11(1): 29-38. UNR Editora, Rosario. ISSN 1514-2906.
- Weber, J. F. 2014a. Parámetros del modelo de pérdidas CN-SCS para áreas permeables de la ciudad de Córdoba, Argentina. V Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua - 12 al 14 de noviembre de 2014 – Córdoba, Argentina.
- Weber, J. F. 2014b. Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina. *Revista Ambiente & Água*, 9(1): 161-172. DOI: 10.4136/1980-993X, ISSN: 1980-993X. Brasil.
- Weber, J. F., Apestegui, L. 2014. Parámetros de los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba . 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina, del 23 al 26 de setiembre de 2014 .

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS EN EL EMBALSE DE NOVA PONTE, MINAS GERAIS, BRASIL, POR MEDIO DE LA GEOESTADÍSTICA Y LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA - SIG

SPATIAL VARIABILITY OF NITRATE CONCENTRATION IN RESERVOIR NOVA PONTE, MINAS GERAIS, BRAZIL, USING GEOSTATISTICS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS -GIS

Vieira, Eliane Maria¹; Santos, Nerilson Terra²; d'Almeida Duarte de Azevedo, Izabel Christina³; Fernandes Bezerra Neto, José⁴; Rodriguez Simão, Maria Lélia⁵; Pinto Coelho, Ricardo Motta⁶

Resumen

Las concentraciones de nitrógeno y de fósforo son importantes no solo para el monitoreo del estado trófico de los diferentes ecosistemas acuáticos sino también esos nutrientes se constituyen en parámetros esenciales para calcular la capacidad de soporte de esos sistemas para usos múltiples como la acuicultura practicada en jaulas. En este estudio hemos evaluado diferentes algoritmos de interpolación para determinar la variabilidad espacial de la concentración de nitratos en el embalse de Nova Ponte, Minas Gerais (MG), Brasil. Se trata de un embalse de cabecera, con características predominantemente oligotróficas y un alto tiempo de retención hidráulica. Los datos de concentración de nitratos se obtuvieron *in situ* por medio de una sonda multiparámetros YSI modelo 6920, en agosto de 2008, en un total de 59 puntos de muestreo distribuidos a lo largo de la represa. Para la verificación de la dependencia espacial se calculó la razón de dependencia (RD) obteniéndose un valor de 20,35 que mostró dependencia fuerte, por lo que se optó por Krigeaje. Fueron probados dos métodos de Krigeaje, el Krigeaje Ordinario y el Universal y evaluados por medio del error medio estandarizado de los valores predichos, del error cuadrático medio y del error cuadrático medio estandarizado. De los dos métodos probados el que presentó mejor desempeño estadístico fue el Krigeaje Ordinario. La concentración de nitrato fue espacializada para toda el área de estudio presentando una variación de 273 $\mu\text{g.l}^{-1}$ a 13,28 $\mu\text{g.l}^{-1}$ para la Krigeaje Univeral y de 277,76 $\mu\text{g.l}^{-1}$ a 16,19 $\mu\text{g.l}^{-1}$ para la Krigeaje Ordinario. Los resultados de ambos procedimientos de interpolación sugieren claramente la existencia de una "pluma" de contaminación por nitratos en las aguas subsuperficiales de la represa de Nova Ponte. El aporte de nitratos a la represa ocurre principalmente a través del Río Santo Antônio, donde es posible identificar un claro patrón espacial con concentraciones más elevadas de esa especie de nitrógeno inorgánico aguas arriba, en dirección a la ciudad de Patrocínio (MG). Ese patrón sugiere que tanto las fuentes difusas como la escorrentía de las actividades agrícolas y descargas puntuales de aguas negras aguas arriba de la ciudad, pueden estar impulsando esa contaminación por nitratos.

Palabras clave: Nitrato, geoestadística, SIG, Represa de Nova Ponte

Abstract

The concentrations of nitrogen and phosphorus are important not only for monitoring trophic status of various aquatic ecosystems but also those nutrients constitute essential parameters to calculate the bearing capacity of these systems for multiple uses such as aquaculture in cages. In this study we evaluated different interpolation algorithms to determine the spatial variability of nitrate concentration in the dam of Nova Ponte, Minas Gerais (MG), Brazil. It is a reservoir header with predominantly oligotrophic characteristics and a high hydraulic retention time. The nitrate concentration data were obtained *in situ* by a YSI multiparameter probe model 6920, in August 2008, a total of 59 sampling points distributed along the dam. For verification of spatial dependence was calculated dependency ratio (DR) obtained a value of 20.35 which showed strong dependence, so we opted for Kriging. Two methods were tested Kriging, the Universal Kriging and regular and evaluated using standard mean error of the predicted values, the mean square error and the mean square error standard. Of the two tested methods that presented best statistical performance was Ordinary Kriging. The nitrate concentration was spatialized for the study area presenting a variation of 273 $\mu\text{g.l}^{-1}$ to 13.28 $\mu\text{g.l}^{-1}$ for Univeral Kriging and 277.76 $\mu\text{g.l}^{-1}$ to 16.19 $\mu\text{g.l}^{-1}$ for Ordinary Kriging. The results of both interpolation methods clearly suggests the existence of a "plume" of contamination by nitrates in subsurface waters of the dam of Ponte Nova. The contribution of nitrate to the dam occurs mainly across the Rio Santo Antônio, where it is possible to identify a clear spatial pattern with higher concentrations of the inorganic nitrogen species upstream, towards the city of Sponsorship (MG). This pattern suggests that both diffuse sources such as runoff from agricultural activities and sewage discharge point upstream of the city, may be driving that nitrate pollution.

Key words: Nitrate, geostatistics, GIS, dam Ponte Nova

¹ Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Brasil. E-mail: elianevieira@unifei.edu.br

² Universidade Federal de Viçosa (UFV). Brasil.

³ Universidade Federal de Viçosa (UFV). Brasil.

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Brasil.

⁵ Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). Brasil.

⁶ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Brasil.

Recibido: 16/06/2014

Aceptado: 12/10/2014

INTRODUCCIÓN

Una de las variables más importantes para estudiar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas es la concentración de nitrato soluble, que es una de las principales formas en que se manifiesta el nitrógeno inorgánico en la naturaleza. Los niveles de nitratos son de gran importancia ecológica, especialmente teniendo en cuenta la capacidad de estos iones de acumularse en los ecosistemas, y también por sus efectos nocivos sobre la salud humana. Así los nitratos son considerados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA (Geo-4, 2007) como una de las peores formas de la contaminación en aguas superficiales y subterráneas en todo el mundo.

Los diferentes tipos de nitrógeno inorgánico (nitratos, nitritos y amonio) se miden tradicionalmente por métodos espectrofotométricos (APHA, 1998). Sin embargo, más recientemente, surge la posibilidad de emplear sondas multiparámetros de tercera generación que son capaces de medir con precisión los nitratos. Este tipo de sondas además de permitir una programación para la toma de datos en horarios y profundidades determinadas permite también la sincronización de datos con sistemas de posicionamiento por satélite de alta precisión (D-GPS y estaciones topográficas).

En el caso de embalses, la importancia de la contaminación por nitratos está asociada principalmente con las actividades agropecuarias y la silvicultura intensiva que requieren gran cantidad de fertilizantes ricos en N, P y K. Estos nutrientes llegan a los embalses a través de fuentes difusas (escorrentía) o por fuentes puntuales (aguas residuales o efluentes industriales).

Los nitratos están asociados directamente con el potencial de eutrofización de masas de agua y también a las enfermedades causadas por este ión en los seres humanos como el cáncer de estómago (Zublena et al., 1993) y la metahemoglobinemia (Burakham et al., 2004) que, en los bebés se conoce como "síndrome del bebé azul" (Biswas et al., 2004).

El principal fenómeno que permite el arrastre de los nitratos utilizados en la agricultura a los cuerpos de agua es la lixiviación de nutrientes. Este proceso varía de acuerdo con las características físicas del suelo, como la textura, estructura, profundidad del perfil y principalmente la porosidad. Y atributos químicos, como capacidad para retener los iones y el pH (Santos et al., 2002).

El seguimiento de los nitratos es muy importante no solamente por cuestiones de salud humana, o del control de la eutrofización. Es a partir de la concentración de nitrato, que también se calcula la capacidad de carga de una superficie para el cultivo de peces en jaulas. Según Bhumbla (2009), el nivel de contaminación de cuerpos de agua debido a los nitratos del suelo que les rodean, depende directamente de la cantidad de nitratos presentes

o agregados al suelo, la permeabilidad del suelo, las condiciones climáticas (principalmente lluvias), la irrigación y la profundidad del nivel freático o acuíferos.

El arrastre de nitrato a las fuentes de agua se ve afectada también por otros dos factores relevantes: (1) la erosión, que aumenta la entrada de los fertilizantes y los desechos orgánicos en los cursos de agua, y (2) el desequilibrio entre las tasas de suministro de nitrato al suelo y la capacidad de la cobertura vegetal para absorber y asimilar los nutrientes, y convertirlos a formas orgánicas (Resende, 2002). Por lo tanto, la variabilidad espacial de la concentración de nitrato en un cuerpo de agua depende directamente de las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos circundantes, de la cobertura vegetal de estos y de las condiciones climáticas, además de los factores hidrodinámicos del cuerpo de agua. Esta variabilidad puede ser demostrada mediante análisis de la concentración de nitratos en el agua en puntos de muestreo distribuidos a lo largo de todo el cuerpo de agua y mediante la interpolación de estos niveles para los demás sitios no muestreados.

Hay varios algoritmos implementados en los sistemas informáticos que agilizan el trabajo de interpolación de los niveles de la muestra, la exactitud de cada algoritmo depende del método de interpolación adoptado por este.

Al tener en cuenta el hecho de que siguen siendo muy escasos los estudios limnológicos en Brasil, específicamente en el tema de la contaminación por nitratos y que algunas zonas de la cuenca del embalse de Nova Ponte se ven afectados por la agricultura intensiva y la ganadería, el objetivo de este estudio fue obtener la variabilidad espacial de la concentración de nitratos para el embalse de Nova Ponte, MG, determinado el algoritmo que presente los mejores resultados, comparando diferentes métodos de interpolación.

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en el embalse de Nova Ponte, ubicado en la cuenca del Alto Paranaíba, en el estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Está formado por los ríos Araguari y Quebra Anzol y sus tributarios y comprende los municipios de Iraí de Minas, Nova Ponte, Patrocínio, Pedrinópolis, Perdizes, Sacramento, Santa Juliana y Serra do Salitre.

Se trata de un embalse de cabecera, con características predominantemente oligotróficas y un alto tiempo de retención hidráulica. Almacena 12,8 mil millones de metros cúbicos de agua. La presa tiene 1600 metros de ancho y 141 metros de altura (CEMIG, 2007).

Para componer el límite del área de interpolación para la espacialización de la concentración de nitrato,

se utilizó una imagen Landsat/TM-5 de la represa, tomada en septiembre de 2007, que fue cedida por el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* - INPE, de donde fue extraído el límite de la represa en plena capacidad de operación. Se empleó un Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS® 9.3, trabajando con una composición RGB-345 y el polígono del límite del espejo de agua de la represa fue digitalizado en pantalla.

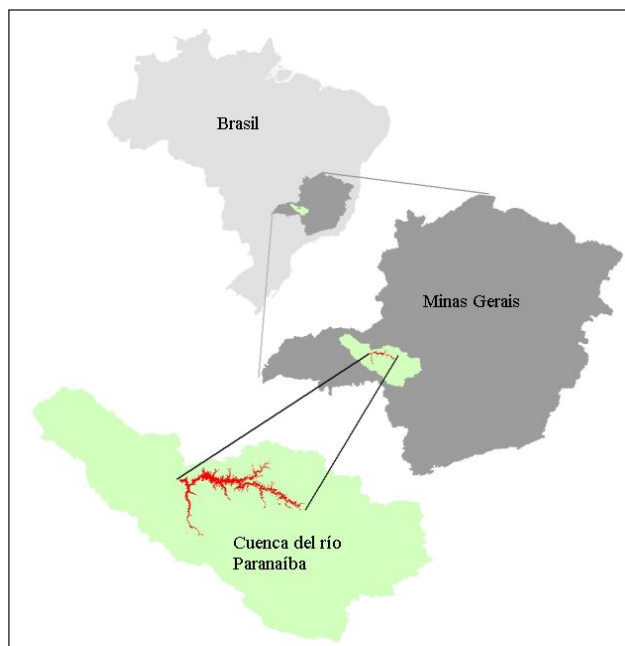


Figura 1. Localización de la Represa de Nova Ponte

Para la distribución espacial de los niveles de nitrato se utilizaron 59 puntos de muestreo en una campaña realizada en agosto de 2008, distribuidos a lo largo de toda la represa, obtenida por medio de una sonda YSI modelo 6920 y la ayuda de un DGPS para la obtención de las coordenadas de estos y la posterior espacialización de los mismos.

Además de los datos obtenidos con la sonda YSI 6920, se tomaron muestras con una botella muestreadora a 0,5 metros de profundidad. Estas muestras fueron filtradas al vacío el mismo día de la colecta usando filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro. Todas las muestras fueron congeladas inmediatamente y trasladadas al *Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios* de la Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG en Belo Horizonte, donde los nitratos se determinaron espectrofotométricamente después de ser reducidos a nitritos por el método de reducción usando el cadmio amalgamado como agente catalítico (APHA, 1998). La comparación de los datos obtenidos por los dos métodos fue necesaria sobre todo teniendo en cuenta que la sonda se calibró previamente a partir de las curvas de regresión hechas con los resultados generados por las dos metodologías. Así, en este artículo,

fueron utilizados los datos generados por la sonda YSI 6920.

Inicialmente, se evaluó la posibilidad de utilizar la geoestadística para elegir el algoritmo de interpolación. Así, se evaluó la dependencia espacial de las concentraciones a través del semivariograma estimado por la ecuación 1, condición esencial para el uso de estos análisis.

$$\gamma(h) = (1/2 N(h)) \sum \{[Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2\} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

$\gamma(h)$ – semivarianza estimada para una distancia h ;

$N(h)$ - número de pares de valores $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$

separados por un vector h ;

x_i – posición espacial de la variable Z , y

Z - valores de la variable estudiada.

Para la elaboración de este, fueron probados diferentes longitudes de *lag*, variando el número de estos, probándose el ángulo de dirección y la tolerancia, y asumiendo anisotropía. Para cada combinación de *lag* y el número de *lags* fueron probados los modelos circular, esférico y gaussiano.

Para la verificación de dependencia espacial se calculó una razón de dependencia (RD), que es una proporción en porcentaje del efecto pepita (C_0) en relación con la meseta total ($C_0 + C_1$), ecuación 2, y la evaluación de la dependencia se hizo de acuerdo a los niveles presentados por Cambardella et al. (1994), una dependencia fuerte para RD menores a 25%, dependencia moderada para RD entre el 25% y el 75% y dependencia débil para valores superiores al 75%.

$$RD = (C_0)/(C_0 + C_1) * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

RD: razón de dependencia

C_0 : efecto pepita

$C_0 + C_1$: meseta total

El hallazgo de la dependencia espacial demostrada por el semivariograma permite estimar los valores para los sitios no muestreados utilizando un Krigeaje, sin sesgo y con una desviación mínima en relación con los valores conocidos, es decir, con una varianza mínima (Vieira et al., 2002).

Encontrada la dependencia espacial, fueron probados dos métodos de Krigeaje, el Krigeaje Ordinario y el Krigeaje Universal. Los métodos se evaluaron utilizando la media estandarizada (Standardized Mean) de los valores, el error cuadrático medio (Root-Mean-Square), el error promedio estándar (Average Standard Error) y el error cuadrático medio estandarizado (Root-Mean-Square Standardized).

Lo ideal sería tener una media estandarizada (Mean Standardized) de los valores predichos cercanos a "0", un error cuadrático medio (Root-Mean-Square) lo más bajo posible, un error promedio estándar (Average Standard Error) próximo al error cuadrático medio y un error cuadrático medio estandarizado (Root-Mean-Square Standardized) cercano a "1" (ESRI, 2008).

RESULTADOS

Fue obtenida una Imagen LANDSAT/TM-5 identificada por la órbita/punto 220/073 del 08/09/07 del INPE, utilizando las bandas RGB-345. El límite del espejo de agua de la represa fue elaborado por medio de la digitalización en pantalla empleando ArcGis 9.3® (Figura 2).

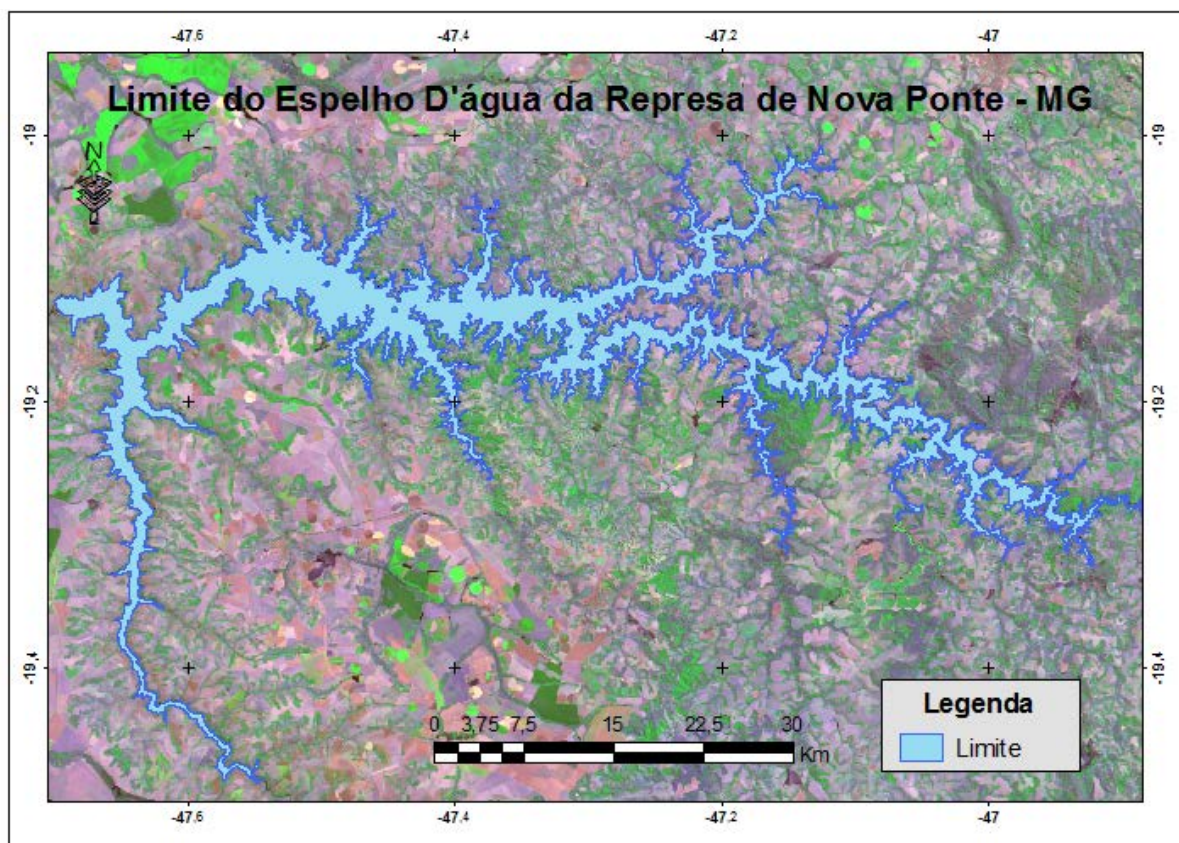


Figura 2. Límite de la superficie del agua de la represa

Para la elaboración del semivariograma fueron probados los *lag* de 2000 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m, 6000 y 7000 m, con un número de *lags* variando de 7 a 10, adoptándose un ángulo de 90° con una tolerancia de 45° y asumiendo anisotropía. Para cada combinación de *lag* y número de *lags*, fueron probados los modelos circular, esférico y gaussiano.

El modelo que mejor se ajustó al semivariograma (Figura 3) fue el gaussiano con un *lag* de 4000 m, un número de *lag* de 7 y un ángulo de 90° grados con tolerancia de 45°, asumiendo anisotropía.

Se calculó la Razón de Dependencia (RD) para la verificación de la dependencia espacial, se obtuvo un valor de 905,19 para el efecto pepita (C0) y de 4447,99 para la meseta total (C0 + C1) fue 4447,99. Por lo que el valor de RD obtenido fue de 20,35, que según Cambardella et. al. (1994), puede ser considerado como un valor típico para una dependencia fuerte. Por lo tanto, podemos estimar los valores para los sitios no muestreados utilizando el Krigeaje con varianza mínima (Vieira et. al., 2002).

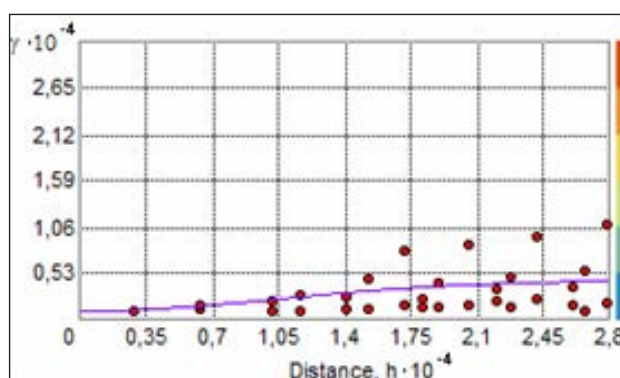


Figura 3. Semivariograma ajustado para la verificación de la dependencia espacial de los datos

Así, fueron probados dos métodos de Krigeaje, el Krigeaje Ordinario y el Krigeaje Universal, ajustando el modelo para cada uno de estos, y teniendo cuidado de limitar el radio de búsqueda del interpolador, ya que se trata de una represa conformada por dos ríos principales, donde los niveles de uno pueden no tener relación directa con los niveles encontrados en

el otro (excepto en el punto de confluencia y aguas arriba de este punto). Hemos adoptado una elipse de búsqueda con el semi-eje mayor de 10000 m y el semi-eje menor de 8000.

La variabilidad de un parámetro, obtenido por medio de puntos de muestreo, regularmente espaciados, en función de la distancia, se puede estimar mediante la comparación de muestras distribuidas en diferentes intervalos de separación entre ellos (llamados "*lag*" o h) y teniendo en cuenta la dirección (ángulo α).

Para los puntos de muestreo distribuidos irregularmente no es posible encontrar suficientes pares de muestras con exactamente la misma distancia h , esto puede ser evitado mediante la adopción de una tolerancia de distancia ($h \pm \Delta h$) y una tolerancia angular ($\Delta\alpha$). Así, en los análisis serán

consideradas todas las muestras que se encuentren dentro de un ángulo $\alpha \pm \Delta\alpha$, y las distancias $h \pm \Delta h$, cubriendo toda el área.

Para Krigeaje Ordinario fueron probados los modelos circular, esférico y gaussiano, siendo el gaussiano el que mejor se ajustó, con un *lag* de 4000, un número de *lag* de 7 y un ángulo de 90° , con tolerancia de 45° grados, asumiendo anisotropía. Y para el Krigeaje Universal fueron probados los mismos modelos y en este caso, también el modelo gaussiano fue el que mejor se ajustó, con un *lag* de 7000, un número de *lag* de 8 y un ángulo de $74,2^\circ$ con tolerancia de 45° grados, asumiendo anisotropía. Los datos fueron interpolados para toda el área de estudio como se muestra en las figuras 4a y 4b.

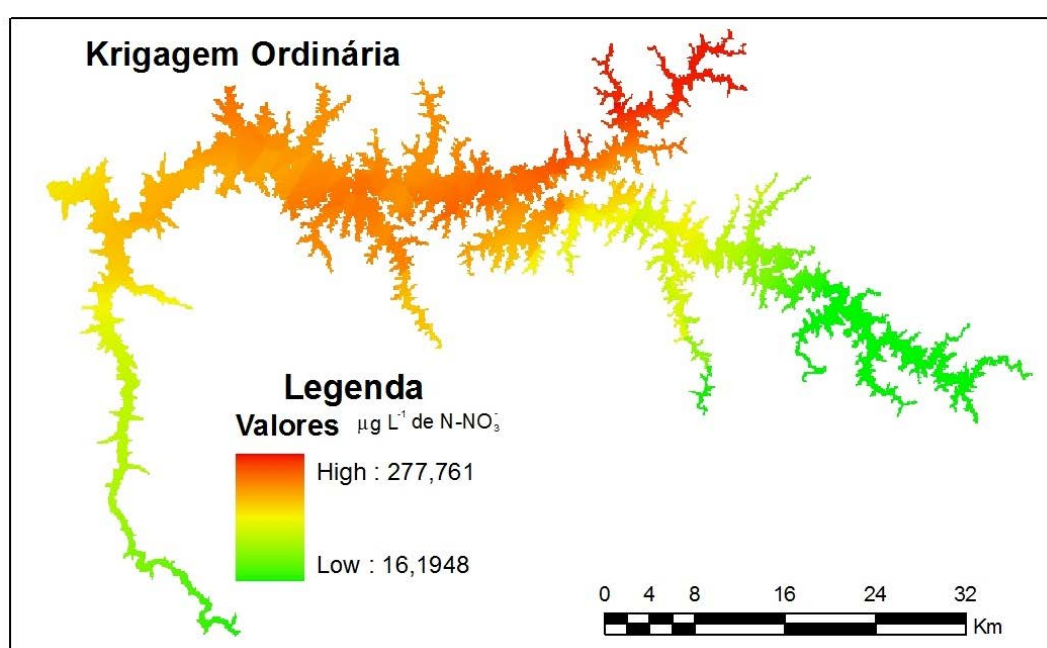


Figura 4a. Espacialización de los niveles de nitrato por el método de Krigeaje Ordinario

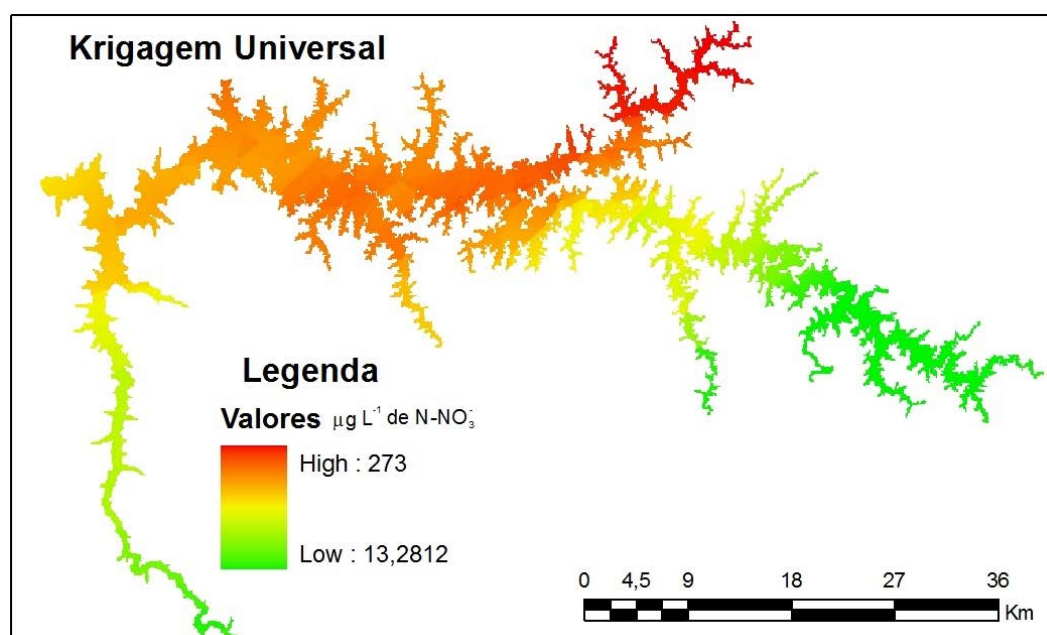


Figura 4b. Espacialización de los niveles de nitrato por el método de Krigeaje Universal

Para el método de Krigeaje Ordinario los niveles interpolados variaron de 277,76 $\mu\text{g.l}^{-1}$ a 16,19 $\mu\text{g.l}^{-1}$; y para el método de Krigeaje Universal los niveles oscilaron entre 273 $\mu\text{g.l}^{-1}$ y 13,28 $\mu\text{g.l}^{-1}$, teniendo este un rango de variación mayor que para el primer método empleado.

Aunque los valores interpolados para las células tienen diferentes (como se muestra por los valores máximos y mínimos de los mapas) no puede identificarse visualmente en las figuras 4a y 4b.

Se obtuvieron la media estandarizada-MS (Mean Standardized) de los valores predichos, los errores cuadráticos medios-RMS (Root-Mean-Square), los errores promedio estándar-ASE (Average Standard Error), y los errores cuadráticos medios estandarizados-RMSS (Root-Mean-Square Standardized), para los dos métodos de Krigeaje analizados como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Evaluación de los errores de los dos métodos de Krigeaje probados

	MS	RMS	ASE	RMSS
Krigeaje Ordinaria	- 0,004021	36,69	36,51	1,024
Krigeaje Universal	0,02398	36,68	37,39	0,9912

Analizando la tabla 1 puede verse que la media estandarizada del Krigeaje Ordinario está más cerca de "0" comparada con el Krigeaje Universal. Los dos métodos presentan un error cuadrático medio muy próximo (36,69 para el primero y 36,68 para el segundo), el error promedio estándar del Krigeaje Ordinario fue próximo del error cuadrático medio y el error cuadrático medio estandarizado también fue cercano a "1". Por lo tanto, el Krigeaje Ordinario presenta un mejor desempeño para la espacialización de la concentración de nitrato para la represa de Nova Ponte, comparado con el Krigeaje Universal.

CONCLUSIONES

Los resultados de ambos procedimientos de interpolación sugieren claramente la existencia de una "pluma" de contaminación por nitratos en las aguas subsuperficiales de la represa de Nova Ponte. El aporte de nitratos a la represa ocurre principalmente a través del Río Santo Antônio, donde es posible identificar un claro patrón espacial con concentraciones más elevadas de esa especie de nitrógeno inorgánico aguas arriba, en dirección a la ciudad de Patrocínio (MG). Ese patrón sugiere que tanto las fuentes difusas como la escorrentía de las actividades agrícolas y descargas puntuales de aguas negras aguas arriba de la ciudad, pueden estar impulsando esa contaminación por nitratos.

Si bien los datos sobre los que esta investigación se basó fueron colectados durante la estación seca, cuando hay una gran estabilización de los patrones espaciales de la represa y no hay ocurrencia de grandes precipitaciones, es importante destacar que se requieren investigaciones adicionales que permitan comprobar la persistencia o incluso la intensificación de esa pluma de nitratos en la represa.

Otro hecho importante a considerar es que pese a que la represa de Nova Ponte todavía se considera un embalse oligotrófico, los datos aquí presentados no dejan ninguna duda de que la represa se encuentra en una fase importante de eutrofización. Esta situación impone un cambio de estrategias de los gestores ambientales responsables para los programas de vigilancia ambiental y recuperación del lago en el sentido de promover cuanto antes una zonificación de las actividades agropecuarias así como una precisa identificación de las fuentes puntuales de contaminación por nutrientes especialmente en el brazo del Río Santo Antônio.

AGRADECIMIENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais - FAPEMIG por el apoyo financiero en el desarrollo del proyecto "Delimitación de parques acuícolas y estimación de la capacidad de soporte de la represa de Nova Ponte -Minas Gerais" al cual este trabajo esta vinculado. A Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais-EPAMIG por la gestión y apoyo logístico y estructural para el desarrollo del proyecto.

A FAPEMIG por la concesión de incentivos de investigación.

REFERENCIAS

- APHA, 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). Washington. 20th Edition.
- BISWAS, S.; CHOWDHURY, B.; RAY, B. C.. 2004. A Novel Espectrofluorimetric Method for the Ultra Trace Analysis of Nitrite and Nitrate in Aqueous Medium and its Application to Air, Water, Soil and Forensic Samples. *Talanta*, n. 64, 308 p.
- BHUMBLA, D. K. 2009. Agriculture practices and nitrate pollution of water. 14/07/2009. <http://www.caf.wvu.edu/~forage/nitratepollution/nitrate.htm>.
- BURAKHAM, R.; OSHIMA, M.; GRUDPAN, K.; MOTOMIZU, S.. 2004. Simple Flow-Injection System for the Simultaneous Determination of Nitrite and Nitrate in Water Sample. *Talanta*, Thailand, n. 64, p. 1259.

- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F & KONOPKA, A. E. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 : 1501-1511.
- CEMIG. 2007. 19/10/2007. <http://www.cemig.com.br/>.
- ESRI. 2008. ArcGIS Geostatistical Analyst Tutorial. ESRI, New York Street, Redlands, USA.42p.
- PNUMA. 2007. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. GEO4, médio ambiente para el desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. ISBN: 978-92-807-2838-5. 574p.
- RESENDE, A. V. 2002. Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato. Planaltina: Embrapa Cerrados. ISSN 1517 – 5111; n. 57. 29p.
- SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P.. 2002. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campinas Grande, v.6, n.1, 12-16.
- VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C. & REYNOLDS, W. D. 2002. Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: Alvarez, V. H.; Schaefer, C. E. G. R.; Barros, N. F.; Mello, J. W. V. & Costa, L. M.. Tópicos em ciência do solo 2. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 1-45.
- ZUBLENA, J. P.; COOK, M. G.; ST CLAIR, M. B. 1993. Pollutants in groundwater: health effects. North Carolina Cooperative Extension Service. Publication AG-439-14. 14/07/2009. <http://www.soil.ncsu.edu/publications/Soilfacts/AG-439-14>.

LOS TANQUES DE REGULARIZACIÓN, ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN AL SERVICIO INTERMITENTE DE AGUA POTABLE EN EL SECTOR “BACHILLERES”, CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO

WATER STORAGE TANKS, AN ALTERNATIVE SOLUTION TO “BACHILLERES” SECTOR’S INTERMITTENT WATER SUPPLY AT CHETUMAL, QUINTANA ROO, MEXICO

Mena Rivero, Roberto; Cruz Argüello, Julio César; Hernández Serrano, Adriana Nayali; Rivero Vega, Gonzalo¹

Resumen

La falta de continuidad del servicio es una problemática común en los sistemas de agua potable en México, donde la mayor parte de las redes opera mediante *tandeos* o *tandeadas*, como se le conoce coloquialmente en México. Esta deficiencia es influenciada por diversos factores, tanto directa como indirectamente: crecimiento descontrolado de los asentamientos humanos, mantenimiento inadecuado, falta de monitoreo de las redes, interrupción de la energía eléctrica. Los horarios de servicio están también estrechamente vinculados con políticas de operación internas de los organismos de agua y saneamiento, y con los costos de energía eléctrica a lo largo del día. Con la finalidad de entender ese fenómeno se analizó la operación del sector de abastecimiento de agua potable “Bachilleres” de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, el cual presenta servicio intermitente en dos zonas, una con dos periodos al día y otra con cuatro. Para ello se llevó a cabo el examen físico de la infraestructura, se evaluaron los tiempos de operación, se obtuvieron las curvas de variación horaria del sector, se estimaron los volúmenes disponibles y utilizados, y se realizó el análisis del costo de bombeo. Los resultados indican que la forma de operar los tanques ocasiona que éstos sólo se aprovechan parcialmente, ya que el diseño interno y/o los accesorios de los equipos de bombeo incumplen las recomendaciones para ese tipo de instalaciones, lo que provoca que aun cuando el nivel del tirante de agua del tanque sea superior al 40%, los equipos se detengan, y con ello el suministro de agua. El realizar adecuaciones para corregir esta problemática y aprovechar el máximo volumen disponible incrementaría el tiempo de suministro continuo de agua al sector en un 73%, lo cual permitiría postergar inversiones en nueva infraestructura y reducir la explotación de los recursos hídricos y energéticos.

Palabras clave: Tanque de regularización, aprovechamiento óptimo de tanques de regularización, solución al servicio intermitente de agua

Abstract

Intermittent service is a common problem in Mexico's potable water systems, where most of the distribution networks operate via *tandeos* or *tandeadas*, as it is colloquially known. This deficiency is influenced by various factors, both directly and indirectly: human settlements' uncontrolled growth, inadequate maintenance, water networks' lack of monitoring, electrical power outages. Service schedules are also closely linked to water and sewerage utilities' internal policies, and to electricity costs throughout the day. In order to understand this phenomenon, the operation of water network sector “Bachilleres”, from Chetumal City, Quintana Roo, was analyzed, as it showcases intermittent operation in two areas, twice a day in the first one, and four times a day in the other. The study included the physical examination of the infrastructure, the assessment of operating times, the estimation of the sector's time variation curves, the appraisal of volumes both available and used, and the analysis of pumping costs. Results indicate that the prevailing method of operation entails tanks' underuse, as their internal design and/or the pumping equipment's accessories do not meet the recommendations for such installations, making the equipment stop, and thereby the water supply, even when the tank's water depth is over 40%. If some adjustments are made to correct this problem and take advantage of the maximum available volume, the sector's hours of continuous water supply would increase by 73%, which also would delay investments in new infrastructure and reduce the exploitation of water and energy resources.

Key words: Water storage tanks, optimum use of water storage tanks, solution to intermittent water supply

INTRODUCCIÓN

La falta de continuidad del servicio de agua es una problemática que presentan los Organismos Operadores de los Servicios de Agua y Saneamiento en México (Centro Virtual de Información del Agua 2010). Un gran porcentaje de las redes operan de manera intermitentemente, por *tandeos* o *tandeadas* como se le conoce en México (Comisión Nacional

del Agua 2007). Este tipo de servicio es ocasionado por diversos factores que influyen directa e indirectamente; como el crecimiento descontrolado del sector, el déficit en el mantenimiento, la falta de monitoreo de la red (Tavera 2013) y la interrupción de energía eléctrica de los equipos de bombeo (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Dirección

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Chetumal, Quintana Roo, México. E-mail: romeri-72mx@yahoo.com.mx

General de Inversiones Públicas 2010). El horario de bombeo está estrechamente vinculado con las políticas de operación y los costos de energía eléctrica a lo largo del día (CONAGUA 2007). La intermitencia del servicio de agua resulta ventajosa porque se reducen las pérdidas físicas debido a que la presión en la red es generalmente baja e inclusive nula y se puede realizar el mantenimiento de la red en forma programada en los momentos sin servicio (K.Elango 2002) y es desventajoso para el sistema porque opera fuera de los parámetros establecido en el diseño inicial, por lo tanto la capacidad de la infraestructura es a veces subutilizada, genera pérdida en la calidad del servicio debido a que el agua no alcanza los puntos alejados de la red, afectando los aparatos de macro y micro medición que suelen estar más propensos al desajuste, aumentando gradualmente las pérdidas comerciales (Tavera 2013).

Uno de los principales problemas asociados al servicio intermitente es que el agua que recibe la población se restringe. Para captar el agua de la red municipal y disponer de ella en cualquier momento, los habitantes colocan un tanque de agua en la azotea de su casa, u otro depósito permanente llamado en México “tinaco”, cuando está en el techo de la edificación, o cisterna cuando está al nivel del piso (J.A. Cabrera Bejar, 2012) y también recurren a la compra de agua en pipa, el almacenamiento de agua de lluvia y la perforación de pozos, entre otros. Por su parte, el Organismo Operador suele enviar pipas de agua de manera continua a esos sectores. Si el problema se agudiza se recurre a la búsqueda y aprovechamiento de nuevas fuentes de abastecimiento y/o la construcción de nueva infraestructura propiciando la necesidad de buscar recursos económicos para invertir en esas acciones así como una mayor explotación del recurso agua y el incremento del consumo de recursos energéticos para la extracción, conducción y distribución; esto se refleja en el incremento de los costos de operación del sistema.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad, contribuir al aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos, energéticos y económicos en un sistema de abastecimiento de agua potable. Se estudia como inciden en el tiempo de suministro de agua la infraestructura de regulación existente en un sector de distribución de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México y se presentan algunos resultados que se podrían alcanzar aprovechando al máximo la capacidad instalada para mitigar los problemas generados por el servicio intermitente.

METODOLOGÍA

Localización de la zona de estudio

El Estado de Quintana Roo se ubica al sureste de la República Mexicana, colindando al norte con el Estado de Yucatán, al sur con Belice y parte de

Guatemala, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Estado de Campeche. Quintana Roo está dividido políticamente en diez municipios. La capital del estado es la ciudad de Chetumal, ubicada al sur de la entidad, tiene una población de 151,243 habitantes que crecen a razón de 3.73% cada año. Ver figura 1.



Figura 1. Localización de Ciudad de Chetumal

En el estado de Quintana Roo, la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (LACAPA) es el organismo público descentralizado responsable de garantizar la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento en la entidad, así como de establecer las políticas y acciones de planeación y desarrollo de los sistemas de agua potable (Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo, 1996) LA CAPA establece como una estrategia en El Programa Institucional de Infraestructura Hidráulica y Sanitaria 2011-2016 de Quintana Roo “Garantizar la distribución del agua potable con continuidad y eficiencia”; ya que –solamente 3 localidades de la entidad tienen servicio continuo de 24 horas todos los días.

La capital del estado está integrada por 116 colonias y el 93.34% de los 51,141 usuarios del servicio de agua potable son domésticos y el restante están clasificados como hoteleros, comerciales, industriales y de servicios generales. La distribución de agua potable está dividida en cinco sectores: Aeropuerto, Insurgentes, Bachilleres Solidaridad y Arboledas; que tienen instalados 14,100 m³ en tanques de regularización.

Descripción del sector de estudio

El sector Bachilleres está constituido por 36 colonias, brindándoles servicio a 14,177 usuarios, que corresponden a 50,657 habitantes, Figura 2.

El 95.8% de los usuarios del sector son domésticos con una cobertura de Micromedición del 62.78%. De acuerdo al trabajo de campo realizado se estima que el 95% de los usuarios poseen en sus domicilios un depósito de almacenamiento con capacidad entre 100 y 1200 litros en promedio. En la Cuadro 1 se puede apreciar la composición de usuarios del sector, su consumo y la medición instalada.

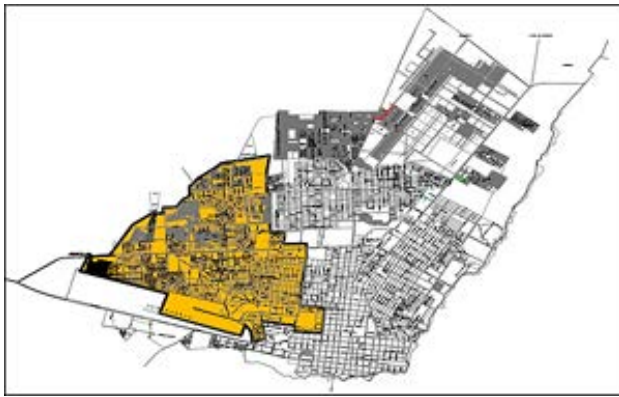


Figura 2. Delimitación del sector Bachilleres, Ciudad de Chetumal Quintana Roo 2013

Cuadro 1. Usuarios pertenecientes al Sector

Tipo de Usuario	Usuarios				Consumo Unitario	Total
	Con Medidor	%	Sin Medidor	%	m³/mes	Usuarios
Doméstico	8,538	63	5,043	37	10.95	13,581
Hotelero	2	100	0	0	199.01	2
Comercial	321	61	203	39	18.93	524
Industrial	0	0	2	100	112.7	2
Servicios Generales	40	59	28	41	94.52	68

Fuente: CAPA 2013

Los registros del área comercial del organismo operador indican que el consumo facturado a los usuarios del sector es de 6,144.48 m³/día, mientras que el equipo de medición electrónico modelo RSG30-Endress+Hauser instalado por el organismo operador en la salida del tanque, indica que se entrega en promedio 13,438 m³/día, por lo que se estima un nivel de pérdidas del 54.28% y una dotación de 265.28 l/hab/día.

Características del tanque y su operación

La CAPA proporcionó información de las características físicas externas e internas de los tanques y los equipos instalados; el tiempo de servicio a las diferentes zonas del área de influencia detallando el número de equipos que opera cada hora y los niveles del tirante de agua a los cuales entran y salen de operación, así como algunas acciones utilizadas para vigilar la operación del tanques.

Curvas de Variación Horaria Operativa

Se utilizaron los registros de los gastos de entrada y salida, el niveles agua del tanque y la presión entregada al sector almacenados en el equipo de medición, el cual registra información en

intervalos de 15 minutos a lo largo de todo un año, y se determinaron las curvas de variación horaria (CONAGUA b, 2007), (López Alegría, 2006) las cuales, por la intermitencia del servicio y el porcentaje de los sistemas de almacenamiento individual en las viviendas, representan la operación de los equipos y no la demanda del sector (Tzatchkov, y otros 2005).

Las ecuaciones 1 a 4 fueron utilizadas para determinar los promedios de las presiones entregadas al sector (PP), los niveles del tanque (PNT) y los gastos de entrada (PQE) y salida (PQS).

$$PP = \frac{\sum_{k=1}^n Pk}{n} \quad (1)$$

$$PNT = \frac{\sum_{k=1}^n NTK}{n} \quad (2)$$

$$PQE = \frac{\sum_{k=1}^n QEk}{n} \quad (3)$$

$$PQS = \frac{\sum_{k=1}^n QSk}{n} \quad (4)$$

Donde Pk, NTK, QEk y QSk son los valores registrados cada 15 minutos durante un año de las presiones entregadas, los niveles del tanque y los gastos de entrada y salida respectivamente y el número total de registros (n).

Para obtener las variaciones horarias de las presiones entregadas (VHPk), los niveles del tanque (VHNTk) y los gastos de entrada (VHQEk) y salida (VHQSk) se utilizaron las ecuaciones 5 a 8.

$$VHP_k = \frac{\sum_{k=1}^{24} PP_k}{PP} \quad (5)$$

$$VHNT_k = \frac{\sum_{k=1}^{24} PNT_k}{PNT} \quad (6)$$

$$VHQE_k = \frac{\sum_{k=1}^{24} PQE_k}{PQE} \quad (7)$$

$$VHQS_k = \frac{\sum_{k=1}^{24} PQS_k}{PQS} \quad (8)$$

Donde PPK, PNTk, PQEk y PQSk representan el promedio de las presiones, entregadas, los niveles del tanque y los gastos de entrada y salida respectivamente, cada hora a diferentes horas del día.

Aprovechamiento del Tanque

El aprovechamiento del volumen del tanque (AVt) se obtuvo como el cociente del volumen de regulación operativo (VRo) entre el volumen de regulación instalado (VRi), tal como lo muestra la Ecuación 9.

$$AV_t = \frac{VR_o}{VR_i} * 100 \quad (9)$$

El VRo se determinó a partir de las curvas horarias de entrada del tanque y los horarios de suministro a los mismos, aplicando el método analítico para el diseño de Tanques de Regulación (CAPA a, 2012), (CONAGUA a, 2007), (López Cualla, 2003) y (César Valdez, 1994). El VRi fue obtenido a partir de las dimensiones de los tanques obtenidas en planos proporcionados por la LACAPA e información de campo.

Análisis del costo de bombeo

Se analizó el consumo eléctrico por la operación de los equipos de bombeo utilizando las tarifas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) durante el 2013. El costo de energía eléctrica por volumen de agua suministrado CEVs, se consideró como el cociente del consumo anual de energía eléctrica de los quipos de bombeo CEEb entre el volumen suministrado en el mismo periodo de tiempo Vs (CONAGUA d, 2012), resultando la ecuación 10.

$$CEVs = \frac{CEEb}{V_s} \quad (10)$$

El CEEb considera los horarios en los que opera el equipo, además del número de arranques de las bombas y el sobreconsumo de energía eléctrica generado cada vez que entra operación un equipo (López Geta, Rubio Campos y González Ramon 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Características físicas del tanque

La estación de bombeo del sector Bachilleres está integrada por dos tanques superficiales de forma rectangular, con capacidad instalada de 1000 m³ cada uno y dos tanques elevados de 20 m de altura y un volumen de 500 m³ cada uno. Solo un tanque superficial tiene instalados los equipos de bombeo y el otro tiene la función de alimentar al primero mediante una tubería subterránea de 10" de diámetro.



Figura 3. Izquierda: Tanques elevados; Derecha: Tanque superficial #1 y #2

Uno de los tanques superficiales tiene instalado cinco equipos de bombeo, tres de 75 HP, uno de 100 HP y otro de 10 HP utilizado para el llenado de pipas. Los 5 equipos son de tipo vertical. En el tanque se tiene instalado un equipo electrónico de medición para registrar los gastos de llegada y salida, presión y niveles de agua en esta infraestructura. Las columnas de succión son 12" de diámetro con una válvula de pie. En el interior del tanque existe una fosa de succión o trinchera de forma rectangular que abarca todo el lado corto del tanque, un ancho de 2 m y una profundidad de 1.06 m como se presenta en la Figura 4.

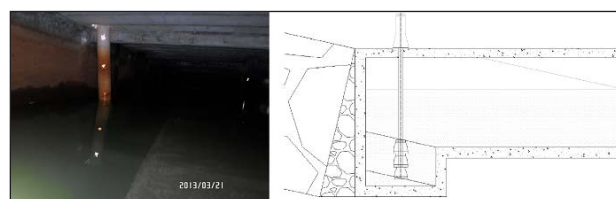


Figura 4. Columna de succión dentro de la trinchera de bombeo

Operación y tiempo de servicio

El Tanque Bachilleres brinda el servicio de agua potable al sector en cuatro períodos diferentes al día y solamente el 78% de los usuarios reciben agua las 24 horas del día; el 0.8% de los usuarios reciben un servicio continuo de 17.5 horas y el resto de la población es atendida mediante tandeos de tal forma que el 20.3% de la población recibe agua en cuatro tandas de 07:00-12:00, 15:00-18:30, 21:00-01:30 y de 05:00-06:00 totalizando 14 horas y el 0.3% de los usuarios durante total de 16 horas en dos períodos de 05:00-13:00 y de 15:00 a 23:00; finalmente, el 0.6%

restantes se encuentra operado por la SEDENA². El tiempo máximo de bombeo continuo, en los casos donde existen tandeos es de 8 h.

La operación se realiza de la siguiente forma: el equipo #1 opera las 24 horas del día y es remplazado en ocasiones por el equipo #3, el cual permanece en stock mientras opera el primero. El equipo #2 opera en promedio un total de 14 horas, el cual se enciende cuando el nivel del tirante de agua en el tanque es igual o mayor al 88% y se detiene cuando el nivel alcanza el 48% para evitar la cavitación. Los operadores manifestaron verificar los niveles de agua en la pantalla del equipo de medición. Los tanques elevados se llenan durante la madrugada (04:00 a.m.) y alcanzan su nivel máximo en aproximadamente 1 hora y 40 minutos; y son descargados diariamente en el horario de las 08:00 h a las 12:00 h.

Curvas de Variación Horaria Operativa

En la Figura 5 se presentan los registros históricos de la curva de variación horaria operativa del gasto de salida del tanque de regulación del sector Bachilleres, en él se puede apreciar un comportamiento similar en los últimos años. Existen tres periodos de valores máximos, el primero a las 9 h, el segundo a las 15 h y un último a las 21 h. Alcanzando picos máximos respecto al promedio de 170% por la mañana, 140% por la tarde y 138% por la noche.

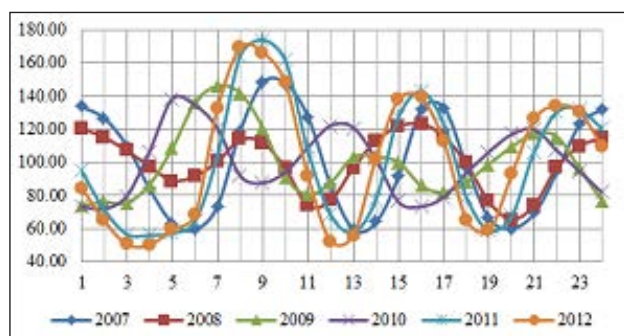


Figura 5. Curvas Históricas de Variación Horaria Operativa

El gasto medio de entrada al tanque es de 176.85 lps, mientras que el suministrado al sector es de 236.32 lps con un nivel medio de 1.71 m de tirante de agua y una presión media de 0.7 Pa. En la Figura 6 se observa que el gasto de entrada no presenta variaciones importantes a lo largo del día por lo que se puede considerar constante. La presión entregada al sector varía de forma paralela al suministro de agua; mientras que a mayor gasto de salida se reduce el nivel del tirante de agua.

Las curvas de variación horaria operativas del suministro al sector fueron comparadas con las curvas sugeridas por la CONAGUA (2007) cuando se carece de registros, y se aprecia una variación

significativa debido a que el sector bachilleres cuenta con tres picos, mientras que los valores sugeridos nada más uno, este fenómeno puede ser originado debido a que el 95% de los usuarios tienen algún tipo de depósito de almacenamiento de agua y las curvas de variación horaria del gasto entregado al sector reflejan el modo en el cual se llenan estos y la manera de operar el tanque. (Cabrera Bejar, y otros 2012) (CONUEE 2011) (Tzatchkov, y otros 2005).

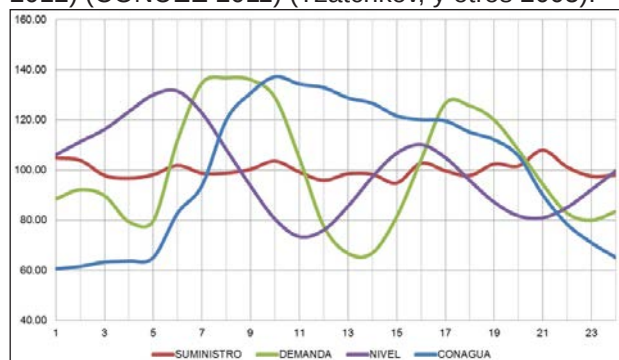


Figura 6. Curva de Variación Horaria de Niveles, Presiones, Gastos de Suministro y Demanda

Aprovechamiento del Tanque

El nivel de aprovechamiento del tanque desde que fueron instalados los equipos de medición ha variado considerablemente. En 2012 se alcanzó un máximo de 78% mientras que en 2008 solamente se aprovechó el 27% y puede ser el resultado de cambios en la política de operación. Se identificó que el tanque de regulación presenta dos tipos de volúmenes de operación (Figura 7), el primero es el volumen regulado y entregado a los usuarios, el segundo es un volumen no utilizado que se presenta de dos maneras

- Volumen no disponible por nivel mínimo que se encuentra definido por el nivel mínimo del tanque y el piso del mismo.
- Volumen no disponible por vacío que se localiza por encima del espejo de agua, y no representa el colchón de aire recomendado en el diseño de tanques (CEPIS /OPS 2005) (CONAGUA a 2007), sino que se encuentra vacía al no poder alcanzar la capacidad máxima instalada en el tanque (1000 m³ para Bachilleres).

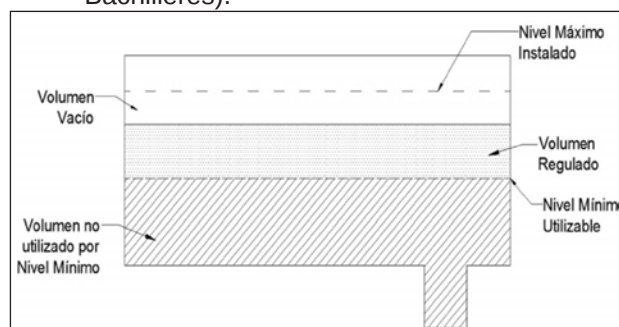


Figura 7. Niveles y Volúmenes de Operación

² Secretaría de Defensa Nacional

El volumen no disponible por nivel mínimo utilizable es de 480 m³ y un volumen vacío de 120 m³. Para determinar las posibles causas que originan esos volúmenes, se revisó la sumergencia de los equipos de bombeo y las características de la trinchera del tanque; y se encontró que incumplen las recomendaciones sugeridas por (CONAGUA c 2007) (OPS/OMS 1966) (Cafaggi Félix, Rodal Canales y Sánchez Huerta 2011) y (César Valdez 1994).

Para aprovechar el volumen de agua sin utilizar se requiere adecuar la estación de bombeo. Si se utilizara el mismo equipo u otro de características similares, no se podría modificar la trinchera; por lo que se analizó la construcción de un cárcamo externo unido al tanque existente que cumpla con las recomendaciones para ese tipo de instalaciones y se podría aprovechar hasta en un 96 % el volumen instalado del tanque; además de una continuidad del servicio; aunado a ello, si el Organismo Operador instalara micromedidores en corto plazo podría reducir las pérdidas en un 15.75%, lo cual se vería reflejado en el incremento del tiempo de servicio alcanzando una continuidad de al menos 16 horas en las dos zonas donde existe mayor intermitencia. Considerando la tasa de crecimiento de la población y la dotación actual, un horizonte de proyecto de 20 años; los valores propios del sector para los coeficientes de variación diaria y de regulación de 1.35 y 5.78 respectivamente, se obtiene una capacidad de regulación demandada de 1270 m³ en veinte años, lo cual indica que la capacidad instalada es suficiente para ese período. Sin embargo, el volumen de regulación demandado deberá establecerse en función de las políticas de operación que se establezcan para el tanque.

Análisis de los costos de bombeo

La operación actual genera costos por energía eléctrica de \$ 839,542 M.N. al año; los resultados al incrementar la continuidad en el servicio, manteniendo los equipos actuales y estableciendo una nueva forma de operar, aprovechando los horarios en que las tarifas de CFE son bajas, indican que se obtiene una reducción en el costo por energía eléctrica del 8% anual, y si el Organismo Operador reemplaza los equipos, además de aplicar acciones de recuperación de agua por pérdidas físicas, los resultados pueden ser más satisfactorios (BIT 2011).

CONCLUSIONES

Una causa del servicio intermitente de agua potable en el sector analizado es la subutilización de los tanques de regularización generada por la forma de operar los equipos. Establecer las curvas de variación horaria de la zona de influencia de esa estación de bombeo permitió determinar el volumen regulado en la operación. El nivel de aprovechamiento de ese tanque, que tiene una trinchera y opera con equipos verticales, está estrechamente vinculado al

cumplimiento de las recomendaciones para el diseño de cárcamos y su incumplimiento propicia que parte del volumen disponible del tanque no se aproveche. Si se construye un cárcamo externo unido al tanque existente que cumpla con las recomendaciones para ese tipo de instalaciones es posible pasar de cuatro periodos de servicio al día con un total de 14 horas discontinuas y de 2 lapsos de tiempo de 8 horas cada uno a un sólo periodo continuo de 16 horas en el sector, aprovechando el volumen subutilizado, realizando las adecuaciones necesarias en las instalaciones y estableciendo nuevas políticas de operación de los equipos instalados en función del máximo volumen aprovechable; además, al reducir los paros y arranques de los equipos y aprovechando las horas con la tarifa más baja por consumo de energía eléctrica se reducen los costos de bombeo al menos en 8%. Si aunado a ello se sustituyen los equipos actuales y se implementan acciones de recuperación de agua se incrementan más los beneficios. Es recomendable realizar un análisis hidráulico de las redes y líneas de alimentación del sector para mejorar más las condiciones de servicio y la implementación de las acciones por realizar deben ser producto de un análisis costo beneficio; determinar el tiempo de servicio de agua que reciben los usuarios antes y después de realizar modificaciones en la operación actual y/o por adecuaciones en las instalaciones. Antes de realizar inversiones, para el aprovechamiento de nuevas fuentes y/o nuevas infraestructura de regulación para incrementar la continuidad del servicio de agua o la disponibilidad de agua, hay que evaluar el nivel de aprovechamiento de los tanques existentes para postergar las inversiones, generando un ahorro de recursos económicos, hídricos y energéticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Licenciada Enriqueta Odette Ruíz Martínez en la revisión técnica de la traducción.

REFERENCIAS

- Alegría, P. López. 2006. Abastecimiento de Agua Potable y disposición y eliminación de excretas, 138-149.
- Análisis y Proyectos de Ingeniería, S.A. de C.V. 1994. Proyecto ejecutivo de tanques de regularización de 15 a 20 m de altura y de 500 a 1500 m³ de capacidad en Chetumal, Quintana Roo.
- ANEAS. 2008. El Agua Potable En México. Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México, D.F. 332.
- BIT. 2011. Evaluación para sistemas de bombeo de Agua: Manual de eficiencia energética, Banco Interamericano de Desarrollo. Washington D.C. 29-56.

- Cabrera Bejar, J.A. Palma Carro, B. Cerón Romero, y B. D. Tolentino Martín. 2012. Suministro intermitente de agua potable: caso Chilpancingo. XXII CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA. Acapulco, Guerrero.3-4.
- Cafaggi, F., Rodal C., Sánchez H. 2011. Sistemas de Bombeo. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F.203-232.
- CAPA. 2011. Programa institucional de infraestructura hidráulica y sanitaria. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado. Chetumal, Quintana Roo.
- CAPA a. 2012. Consumo de Usuarios de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo., Comisión de Agua Potable y Alcantarillado. Chetumal, Quintana Roo.
- Centro Virtual de Información del Agua. 2010. Guía para organismos operadores, Agua potable, alcantarillado y saneamiento, 18-27.
- CEPIS /OPS . 2005. Guías Para el Diseño de Estaciones de Bombeo de Agua Potable, Lima, Perú.4-11, 21-33.
- César Valdez.1994. Abastecimiento de Agua Potable. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. 179-201.
- Comisión Nacional del Agua . 2007. Sectorización en redes de agua potable. Tlalpan, México, D.F.: Grupo Editor de México.
- CONAGUA a. 2007. Cárcamos de Bombeo para alcantarillado, Funcional e Hidraulico. México D.F, 19-24.
- CONAGUA b. 2007. En Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México D.F. 10-15, 22-29.
- CONAGUA c. 2007. Manual de Diseño, Construcción y Operación de Tanques de Regulación Para Abastecimiento de Agua Potable. México D.F.12-13.
- CONAGUA d. 2012 Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable. México D.F.
- CONUEE. 2011. Estudio Integral de Sistemas de Bombeo de Agua Potable Municipal.Secretaría de Energía, México D.F.
- Guaycochea Guglielmi, 1999. Máquinas Hidráulicas: Turbobombas, Universidad Autónoma Metropolitana México D.F. 113,127,135-138.
- K.Elango, K.Vairavamoorthy. 2002.Guidelines for the design and control of intermittent water distribution systems. Waterlines 21, nº 1 19-21.
- López Cualla, 2003. Diseño de Acueductos y alcantarillados, Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá Colombia.211-232.
- López Geta, J. A., J. C. Rubio Campos, y A. González Ramon. 1998. Guía Para La Evaluación De Extracciones De Aguas Subterráneas Mediante Contadores Eléctricos, Rendimientos Y Coste Del Agua, 10-17.
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Dirección General de Inversiones Públicas. 2010.Metodología de Preinversión para Proyectos de Agua y Saneamiento, 14,16,18.
- OPS/OMS. 1966. Bombas Para Agua Potable. Washington, D.C. 1-24, 151-157.
- Tavera, M. 2013. Metodología para la gestión y planificación de un sistema de agua potable con suministro intermitente. Aplicación a la Ciudad de Tegucigalpa.Honduras, 50-52.
- Tzatchkov, V., V. H. Alcocer, F. I. Arreguín, y D. Feliciano. 2005. Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable. Ingeniería Hidráulica en México XX. 67-76.

MODELACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN UNA CUENCA DE MONTAÑA TROPICAL EN FUNCIÓN DE SU COBERTURA DEL SUELO

WATER AVAILABILITY MODELLING FOR A TROPICAL MOUNTAIN CATCHMENT AS A FUNCTION OF ITS SOIL COVER

Duque Yaguache, Luis Felipe¹; Vázquez Zambrano, Raúl Fernando²

Resumen

Se presentan los resultados principales de la modelación hidrológica mensual de una cuenca de montaña tropical ubicada al nororiente del Ecuador, la misma que es muy importante para el desarrollo del país, particularmente en vista de que se encuentra en la cabecera de la cuenca que aporta al proyecto hidroeléctrico más grande del país, Coca Codo Sinclair. El protocolo de modelación incluyó el empleo de un código semidistribuido, Water Evaluation And Planning System (WEAP), y el análisis de (a) la calidad de simulación de los caudales observados; y (b) la congruencia de la simulación hidrológica de cada una de las coberturas del suelo existentes en la zona de estudio. Con el fin de mantener el número de parámetros a calibrar dentro de límites razonables, se realizó un análisis de sensibilidad en base a simulaciones Monte Carlo, el mismo que demostró el fenómeno de equifinalidad ya que no se pudo identificar un único juego óptimo de parámetros para el modelo numérico de la zona de estudio. El modelo resultante presenta problemas al simular los caudales totales, aunque es capaz de simular de mejor manera los caudales base. Con estas limitaciones en mente, se concluyó que el aporte de caudal base fue de 11,50 m³ s⁻¹, 6,20 m³ s⁻¹ y 1,40 m³ s⁻¹ provenientes respectivamente de los usos bosque, páramo y pasto. Se cree que las limitaciones del modelo se producen por una descripción inadecuada de la precipitación, concretamente por la falta de información para la cuantificación adecuada de la precipitación horizontal. Sin embargo, este aspecto debe investigarse más en el futuro para descartar otros motivos.

Palabras clave: Modelación hidrológica, ecosistema, páramo, simulaciones Monte Carlo, WEAP

Abstract

The main results of the monthly hydrological modelling of a tropical mountain catchment located at the northeastern part of Ecuador are presented herein. The study catchment is rather important for the development of the country, particularly owing to the fact that it is at the header of the contributing basin to the largest hydropower project of the country, Coca Codo Sinclair. The modelling protocol included the use of a semi-distributed code, the Water Evaluation and Planning System (WEAP), and the analysis of (a) the simulation quality of the observed discharge; and (b) the congruency of the hydrological simulation of every one of the existing land cover in the study area. In order to keep the number of calibration parameters within reasonable limits, a sensitivity analysis was performed based on Monte Carlo simulations, which revealed equifinality since it was not possible to identify a single set of optimal parameter values for the numerical model of the study area. The resulting model has problems by simulating adequately the total discharge, although it is able to better simulate the baseflow. With these limitations in mind, it was concluded that the contribution of baseflow is 11,50 m³ s⁻¹, 6,20 m³ s⁻¹ and 1,40 m³ s⁻¹ respectively from the forest, moor and pasture land uses. It is believed that these limitations of the model are caused by an inadequate description of the precipitation, concretely by a poor quantification of horizontal precipitation. However, this aspect should be further investigated in the future to rule out other potential reasons.

Key words: Hydrologic modelling, ecosystem, páramo, Monte Carlo simulations, WEAP

INTRODUCCIÓN

Entre los múltiples servicios que las cuencas brindan al ser humano se destacan los ambientales, incluyendo los hidrológicos, cuya característica de cantidad y calidad dependen del clima y del estado de conservación en el que se encuentran las cuencas. En este contexto, los ecosistemas altoandinos tienen un rol protagónico para sostener la forma de vida de miles de personas (Buytaert et al., 2012; Vázquez, 2010), garantizando la regulación hídrica,

en páramos y bosques, a través del almacenamiento de agua en los suelos, con alto contenido de materia orgánica y cobertura vegetal (Acosta, 2014), que luego alimentan a riachuelos y ríos.

Sin embargo, a pesar de su importancia, la hidrología y su relación con los ecosistemas acuáticos de las cuencas altoandinas se conocen pobremente, por lo que se dificulta la gestión sostenible de sus recursos hídricos (Hofstede y Mena, 2014; Hampel

¹ COCASINCLAIR EP, Subgerencia Ambiental y Responsabilidad Social, Quito, Ecuador, felipeduque_48@hotmail.com

² Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales / Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

et al., 2010). Esto a pesar de que en los últimos años se hayan efectuado esfuerzos significativos para investigar sobre la hidrología de los distintos ecosistemas altoandinos. En lo que respecta a ecosistemas de montaña tropical en Colombia y Ecuador, principalmente páramo y bosque, se pueden destacar los trabajos hechos por varios autores (Buytaert, 2004; Fleischbein, 2006; Tobón y Arroyave, 2007; Motzer, et al 2011; Céleri y Feyen, 2009; Tobón, 2009a; Céleri et al., 2010), cuyos aportes principales son la conceptualización de los procesos hidrológicos, monitoreo y cuantificación de sus principales variables climáticas y el análisis de las propiedades hidrofísicas de los suelos, pero a escalas por lo general muy pequeñas. Sin embargo, aspectos tales como la evaluación de los efectos del cambio del uso de suelo y del cambio climático sobre estos ecosistemas han sido poco estudiados (Arroyave, 2007).

En la investigación hidrológica ya sea de cuenca o de ecosistema, un tópico importante es la modelación numérica, ya que ésta permite representar de una manera relativamente barata, y potencialmente adecuada, el sistema estudiado y evaluar los efectos de escenarios de alteración sobre su comportamiento hidrológico. En este ámbito, atendiendo a la representatividad espacial de los parámetros y variables de entrada, un modelo se puede clasificar en concentrado o agregado (representa el área de estudio mediante una única unidad espacial) o en distribuido. También existen los modelos semi-distribuidos, que consisten en la aplicación de modelos agregados en varias subáreas de análisis que componen la cuenca en estudio.

En Ecuador se puede destacar la aplicación de modelos semi-distribuidos (Crespo et al., 2008) y agregados (Buytaert et al., 2003; Vázquez, 2010; Quichimbo et al., 2013) pero efectuando tan sólo un análisis muy limitado de modelación, empleando series temporales bastante cortas, o cuencas con un uso de suelo uniforme (a excepción de Vázquez, 2010) o con dificultades serias de representación de los procesos hidrológicos (Crespo et al., 2008).

Independientemente del tipo y la complejidad del modelo numérico empleado, la incertidumbre está presente en las distintas facetas de la modelación de recursos hídricos (Binley et al., 1991; Vázquez, 2003; Mantovan y Todini, 2006). Los pocos estudios de modelación numérica efectuados en el Ecuador sobre hidrología (Pombosa, 1997; Matamoros et. al., 2005; Buytaert et al., 2012; Crespo et al., 2008) se han practicado por lo general sin un protocolo riguroso de evaluación, de análisis de sensibilidad ni de estimación de la incertidumbre asociada a la información recogida en campo y a la estructura de los modelos numéricos. Se exceptúan trabajos muy recientes tales como (Vázquez, 2010).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal la aplicación de un código semi-distribuido, con el fin de representar la hidrología de

dos ecosistemas característicos de la región andina (cuasi prístinos): bosque y páramo, además de una unidad intervenida cubierta de pasto, de una cuenca muy relevante para el desarrollo del Ecuador en donde se emplaza su mayor proyecto hidroeléctrico. Además, esta cuenca es una alternativa a futuro para contribuir al abastecimiento de agua potable para la ciudad de Quito, capital del país. Por lo tanto, es importante conocer, interpretar y representar los procesos de oferta y de regulación hídrica de esta cuenca en particular, y así contar con el insumo técnico/científico necesario sobre el cual basar cualquier escenario futuro de uso de suelo y analizar sus posibles repercusiones en estos importantes proyectos de explotación hídrica.

En este ámbito, la preparación de un modelo para la cuenca de estudio tiene el potencial de desarrollar una importante herramienta de gestión de los recursos hídricos de la cuenca. Un objetivo adicional del estudio tiene que ver con la aplicación de un protocolo de modelación determinista / estocástico, considerando simulaciones Monte Carlo, para llevar a cabo un análisis de sensibilidad detallado, en línea con tendencias recientes de aplicación de modelos numéricos, y de esta manera comunicar a la comunidad científica, en particular Ecuatoriana, los resultados y los detalles de aplicación de un protocolo de modelación que combina aspectos deterministas con estocásticos, lo cual, tal como ya se ha mencionado, no es una tendencia habitual en nuestro medio.

Un objetivo final del presente estudio es dotar a la comunidad científica de criterios hidrológicos correspondientes a tres usos principales del suelo que se observan en ecosistemas altoandinos, páramo, bosque y pasto (uso antrópico), derivados por medio de una evaluación del estado del arte. Los mismos pueden emplearse al momento de juzgar la congruencia de las simulaciones hidrológicas en zonas con estas coberturas, cuando no se disponga de información monitoreada en campo, como ha acontecido en el presente caso.

Es importante reseñar que la réplica de la metodología aquí expuesta en otros sitios de estudio cae fuera del ámbito del presente artículo. Esto es tarea de la comunidad científica interesada, para lo cual este manuscrito pretende exponer los detalles necesarios.

MATERIALES

La cuenca de estudio

El área de estudio se encuentra al nororiente del Ecuador en la provincia de Napo y corresponde a la cuenca del río Cosanga (Fig. 1) delimitada por la estación hidrológica Cosanga Aj Quijos (H-731). Sus aguas se originan en las faldas orientales del volcán Antisana (actividad mínima; por su importancia estratégica, es el más estudiado de las cumbres

andinas del norte del Ecuador) y su red hídrica pertenece a la cuenca del río Quijos que al unirse con el río Salado forma el río Coca, que a su vez forma parte de la red hídrica del río Napo y la vertiente del Amazonas. Esta cuenca es muy relevante para el Ecuador ya que se encuentra en la cuenca alta del río Coca en donde se ubica el proyecto hidroeléctrico más grande del país, Coca Codo Sinclair (CCS), con una capacidad nominal de 1500 MW. Esta zona es además considerada como alternativa para que en un futuro se construya un embalse de regulación multianual para el abastecimiento de agua potable, mediante un trasvase, para la ciudad de Quito (proyecto Ríos Orientales).

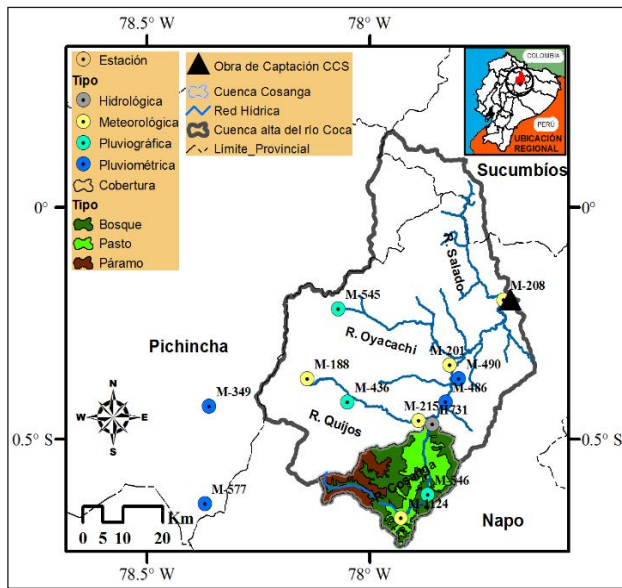


Figura 1: Ubicación de la cuenca de estudio y distribución de estaciones hidrometeorológicas disponibles

La cuenca de análisis se encuentra entre los 1.700 y los 4.320 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m), cuenta con un área de drenaje de 501,80 km² y una longitud de cauce de 57,10 km. Su precipitación media anual es de 2.863 mm con una temperatura promedio de 11,60 °C. Por su parte, la oferta hídrica media anual se estima en 42,70 m³ s⁻¹.

Algoritmo de humedad de suelo del código WEAP

El presente estudio se llevó adelante mediante el empleo del código Water Evaluation And Planning System (WEAP; SEI, 2011), concretamente del módulo de hidrología a través del método de humedad del suelo, que representa el proceso precipitación-escorrentía en una unidad de respuesta hidrológica (URH) por medio de dos estanques, con los cuales se busca reproducir los flujos superficiales y subterráneos (SEI, 2011). Este método unidimensional (Fig. 2) se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración,

escorrentía superficial, escurrimiento subsuperficial (flujo intermedio), y percolación profunda.

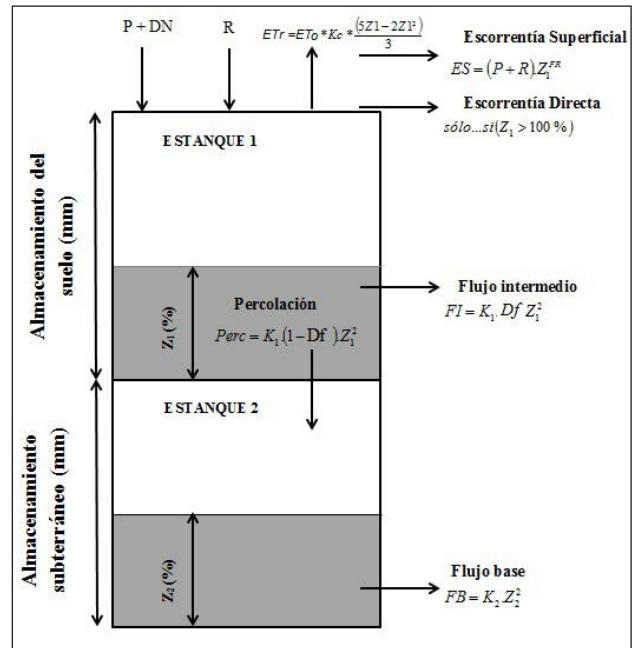


Figura 2: Conceptualización del módulo de humedad del suelo para una unidad de respuesta hidrológica en el módulo de hidrología en WEAP (en base a SEI, 2011)

En la Fig. 2 se puede apreciar la conceptualización del método y las diferentes ecuaciones y criterios que se toman en cuenta al momento de representar la hidrología en una columna unidimensional. En la figura, P es la precipitación (mm); DN es el derretimiento de nieve (mm); R es la recarga de riego (mm); ETr es la evapotranspiración real (mm); ET₀ es la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm); K_c es el coeficiente de cultivo (adimensional); Z₁ es el porcentaje de agua en el estanque superior (%); Z₂ es el porcentaje de agua en el estanque inferior (%); K₁ es la conductividad hidráulica del estanque superior (mm mes⁻¹); K₂ es la conductividad hidráulica del estanque inferior (mm mes⁻¹); Df es la dirección preferencial del flujo (adimensional), que separa el flujo superficial del subterráneo; FR: coeficiente de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo (adimensional).

Las ecuaciones de balance en cada estanque son (SEI, 2011):

$$Z_{1\max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[Pe(t) - ET_0(K_c) \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - Pe(t)Z_1^{FR} - DF(K_1)Z_1^2 - K_2(1 - Df)Z_1^2 \quad (1)$$

$$Z_{2\max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2(1 - Df)Z_1^2 - K_2Z_2^2 \quad (2)$$

, donde, $Z_{1\text{máx}}$ es la capacidad del estanque superior (mm); P_e es la precipitación y el derretimiento de nieve (mm); y $Z_{2\text{máx}}$ es la capacidad del estanque inferior (mm). Estas ecuaciones son empíricas y describen la dinámica de flujo que acontece en los estanques, los mismos que conceptualizan los componentes superficial, subsuperficial y de percolación profunda del ciclo hidrológico.

La evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_o) en mm día^{-1} se la obtiene de la fórmula de Penman-Monteith que es la base del método 56 de la FAO (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{(0.408)\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

, donde R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); G es la densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); T es la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$); u_2 es la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie del suelo (m s^{-1}); e_s es la presión de saturación de vapor de agua (kPa); e_a es la presión de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Información Disponible

En la zona de estudio se dispone de información de doce estaciones climáticas y una hidrológica (Fig. 1). En la Tabla 1 se resume las características principales de la información hidroclimática disponible para el presente estudio.

En cuanto a cartografía temática se dispuso de un Modelo Digital de Elevación (MDE) desarrollado en base a curvas de nivel a escala 1:50.000 por parte del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM). Se dispuso además de Información de cobertura del suelo (año 2002) a escala 1:50.000 basada en el informe de consultoría "Plan de Manejo de la Cuenca de los Ríos Quijos y Salado y Primera Etapa Piloto de Reforestación, (CTOTAL, 2012)". En cuanto a las unidades principales de suelos se contó con información a escala 1:250.000 de textura y taxonomía de los suelos proveniente del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador (MAGAP). Es claro que la escala más desfavorable es la de la información de suelos.

METODOLOGÍA

Preparación del modelo hidrológico

Etapas de modelación

Los parámetros del modelo hidrológico se modificaron mediante un proceso de ajuste entre

los valores mensuales simulados y los observados en la estación Cosanga Aj Quijos. Se consideraron los periodos de calibración [Enero 1974-Diciembre 1995] y de validación [Enero 1996-Diciembre 2006]. El período de calibración fue precedido por un período de calentamiento (warming-up), de tres años, mediante el cual se buscó atenuar el efecto de las condiciones iniciales asumidas al inicio de la simulación de calentamiento (Vázquez et al., 2002). Los valores simulados durante el período de calentamiento no se consideran al momento de evaluar las predicciones del modelo numérico.

Unidades de Respuesta Hidrológica (URH)

En experiencias anteriores WEAP se ha utilizado para la construcción de modelos hidrológicos semi-distribuidos, discretizados espacialmente ya sea por subcuencas (Centro de Cambio Global UC., 2009) o por bandas de elevación (Vargas, 2012). Tomando en cuenta que uno de los objetivos del presente estudio es la determinación de la producción de agua de cada uso de suelo y cómo estos influyen en la composición del hidrograma natural de la cuenca, se plantea una discretización espacial a través de las coberturas de suelo existentes, es decir, cada cobertura de suelo se representa como una URH. Con el fin de evitar una fuerte parametrización del modelo hidrológico, se ha realizado una caracterización general considerando a las tres coberturas principales de la cuenca (Fig. 1): páramo ($98,10 \text{ km}^2$), bosque ($240,80 \text{ km}^2$), y pasto ($162,90 \text{ km}^2$). Dicha caracterización conlleva a que el ajuste del modelo se lo realice a través de la ecuación de continuidad (4):

$$Q_c = Q_{pa} + Q_b + Q_p \quad (4)$$

, donde Q_c es el caudal observado en la estación Cosanga Aj. Quijos ($\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$); Q_{pa} es el caudal simulado en la zona de páramo ($\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$); Q_b es el caudal simulado en la zona de bosque ($\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$); y Q_p es el caudal simulado en la zona de pasto ($\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$).

Para la representatividad de las principales variables climáticas como precipitación y temperatura, en cada URH, se utilizó un procedimiento análogo al utilizado por Vargas (2012). Este método implica la discretización de las propiedades meteorológicas por bandas de elevación. En cuanto a la extrapolación de valores, Vargas (2012) utiliza gradientes altitudinales para la escala temporal anual, mientras que a nivel mensual el método es el mismo que se menciona a continuación en el presente artículo, con la excepción de que para la precipitación Vargas (2012) utiliza el mismo valor promedio para todos los años, mientras que en el presente estudio se utiliza un promedio anual para cada uno de los años de estudio.

Tabla 1. Características de las estaciones hidrometeorológicas disponibles

Código	Estación	Variable disponible	Estadística P	Estadística T	Estadística HR	Estadística V
M-188	Papallacta	P,T,HR,V	Ago 63-Dic 08	Ago 63-Nov 12	Ago 63-Nov 12	-
M-201	El Chaco	P,T,HR,V	Jul 77-Dic 94	Ene 78-Ago 93	Jul 77-Ago 93	-
M-208	Río Salado	P,T,HR,V	Sep 77-Jun 93	Jun 77-Ago 93	Jun 77-Ago 93	-
M-215	Baeza	P,T,HR,V	Feb 74-Jul 93	Feb 74-Ago 93	Feb 74-Ago 83	Ene 82-Ago 93
M-1124	Sierra Azul	P,T,HR,V	Ene 96-Sep 13	May 96-Sep 13	Abr 96-Sep 13	Abr 96-Sep 13
M-436	Cuyuja	P	Ene 78-Dic 08	-	-	-
M-486	Borja Misión Josefina	P	Ene 66-Ene 01	-	-	-
M-490	Sardinas-Napo-INAMHI	P	Mar 73-Dic 09	-	-	-
M-545	Oyacachi	P	Feb 74-Nov 92	-	-	-
M-546	Cosanga	P	Ene 74-Feb 93.	-	-	-
M-349	La Cocha	P	Ene 64-Mar 99	-	-	-
M-577	Cajas-Pedregal	P	Abr 63-Ago 75	-	-	-
H-731	Cosanga Aj. Quijos	Q	Ene 71-Jun 06	-	-	-

Leyenda: M = meteorológica; H = hidrológica; P = precipitación; T = temperatura media; HR = humedad relativa; V = viento; Q = caudal.

Caracterización climática

Así, en el caso de la temperatura se obtuvo gradientes lineales mensuales, relacionando los promedios históricos mensuales en las estaciones disponibles con su respectiva altitud. Luego, con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y en base al MDE de la cuenca de estudio se obtuvo valores promedios mensuales de temperatura para cada URH. Finalmente se decidió calcular un factor de conversión mensual (FC), entre los valores promedios de temperatura de una estación de referencia y cada URH. Su fórmula de cálculo se la indica en (5).

$$C_i = \frac{TM_{mes i}^{URH j}}{TM_{mes i}^{Est. Referencia}} \quad (5)$$

, donde, TM representa la temperatura promedio mensual en el mes i de la URH j en el numerador y de la estación de referencia en el denominador. FC_i es el factor de conversión que permite calcular la temperatura T en la URH j, para cada mes i y año k, a partir de los valores de T de la estación de referencia (estación Baeza para el presente estudio) perteneciente al mes y el año. Esto se lo hace mediante (6):

$$T_{mes i,k}^{URH j} = FC_i * T_{mes i,k}^{Est. Referencia} \quad (6)$$

La representatividad de la precipitación se la realizó a través de curvas isoporcentuales e isoyetas. En

una cuenca dicho criterio se cumple si el régimen de precipitaciones y su variación espacial dependen de los efectos topográficos.

En este contexto, la variabilidad espacial de un evento de lluvia generalmente corresponderá a la variabilidad de su precipitación anual normal, por lo tanto, al calcular el cociente entre la precipitación observada en cada estación y la de la precipitación anual normal representativa, los coeficientes tienden a ser constantes (Espíldora et al., 1975), es decir, isoyetas constantes, por lo tanto las isoyetas de la precipitación anual normal serán una versión amplificada de la lluvia en estudio.

Considerando este criterio y a partir de la información de precipitación disponible y la aplicación de un SIG se obtuvo los valores de la precipitación anual normal para la cuenca de estudio y para cada URH, aplicando para ello el método de interpolación geoestadístico Krigin ordinario.

Luego a partir de (7) se calculó el valor de la variación porcentual de la precipitación para cada URH:

$$VPP = \frac{PA_{anual}^{URH j}}{PA_{anual}^{Est. Referencia}} \quad (7)$$

, donde, PA representa la precipitación anual normal en el año de la URH j en el numerador y de la estación de referencia (estación Cosanga para el presente estudio) en el denominador. VPP es la variación porcentual que permite calcular la precipitación P en

la URH j , para cada mes i del año k , a partir de los valores de P de la estación de referencia, aplicando para ello la siguiente ecuación.

$$P_{\text{mes } i, k}^{\text{URH } j} = \text{VPP} * P_{\text{mes } i, k}^{\text{Est. Referencia}} \quad (8)$$

Esta metodología se sustenta en la suposición de que existe una relación entre la variación estacional meteorológica de la estación de referencia y las URH. También supone que la relación entre los valores promedio de una estación de referencia y los registrados en cada uno de los usos del suelo se mantiene a lo largo de los años para un mes dado, lo cual no es necesariamente cierto.

Por otro lado, las variables de humedad relativa y velocidad de viento están caracterizadas por una pobre información histórica lo cual dificulta un buen análisis de caracterización climática. En este sentido, se decidió ingresar al modelo los promedios mensuales de cada variable. Para ello, en el caso de la humedad relativa se utilizó el mismo método de discretización y de interpolación de la precipitación, utilizando en este caso a la estación Baeza como referencia. En cuanto a la velocidad de viento se utilizó para cada URH el promedio de los valores registrados en las estaciones Baeza y Sierra Azul.

Criterio de ajuste

El criterio de ajuste se refiere al rendimiento del modelo a través de la comparación de los caudales simulados y observados. En este estudio se ha utilizado el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970) o Coeficiente de Eficiencia EF_2 (Vázquez et al., 2002). Su rango varía desde $-\infty$ a 1 y determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos. Si la simulación es perfecta, $NS=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $NS=0$; un valor negativo representa un modelo demasiado pobre, inferior a considerar la media de las observaciones como el valor simulado:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{pobs}})^2} \quad (9)$$

, donde, m es el número total de observaciones disponibles en el periodo considerado; Q_{obs} es el caudal observado en el mes i ($L^3 T^{-1}$); Q_{sim} es el caudal simulado en el mes i ($L^3 T^{-1}$); Q_{pobs} es el caudal promedio de la serie observada ($L^3 T^{-1}$).

En este estudio también se ha calculado el coeficiente de determinación (R^2) el mismo que es el cuadrado del coeficiente de correlación lineal de

Pearson (r) que se considera normalmente en el contexto de la regresión lineal entre dos variables. Se ha procedido de esta manera para comparación con otros estudios anteriores que han empleado este segundo estadístico de evaluación de la bondad de simulación de los modelos numéricos.

Parametrización inicial del modelo y análisis de sensibilidad

El proceso de calibración se realizó en un contexto determinista-estocástico, mediante un análisis de sensibilidad basado en simulaciones Monte Carlo (Beven, 1993). Los parámetros que se variaron en el presente trabajo son los 6 (Tabla 2) que normalmente se modifican en la etapa de calibración y han sido escogidos en base a experiencias de trabajos anteriores (Centro de Cambio Global UC., 2009; Young et al., 2009; Ingol-Blanco y McKinney, 2009). Como el modelo hidrológico contempla tres URH (páramo, bosque, y pasto) el análisis de sensibilidad se lo realizó con 18 parámetros.

Las simulaciones Monte Carlo se llevaron a cabo en el contexto de la metodología "Generalised Likelihood Uncertainty estimator (GLUE)" (Beven, 2012; Vázquez, 2010), la misma que implica muestrear una gran cantidad de conjuntos de parámetros (30.000 en el presente caso) generados aleatoriamente considerando una distribución de parámetros escogida a priori (en el presente caso se asumió una distribución uniforme, que refleja ignorancia en relación a la distribución exacta), utilizando los rangos de variación listados en la Tabla 2. El modelo se parametriza y se corre con cada uno de los juegos de valores de los parámetros muestreados y cada una de las respectivas simulaciones se evalúan en función de las observaciones mediante el coeficiente NS (o EF_2). Luego se generan diagramas de dispersión ("dot plots" según Beven, 1993) para cada uno de los parámetros considerados en el análisis (18 en total en el presente estudio) graficando en la abscisa el rango de variación del parámetro analizado y en la ordenada los valores de (NS) que reflejan la eficiencia o bondad de ajuste ("likelihood"). Si bien este método exige mucho tiempo de simulación para considerar todos los juegos de parámetros, tiene la ventaja de que se puede explorar de mejor manera todo el espacio complejo de los parámetros del modelo (Buytaert et al., 2003; Vázquez, 2003).

En cuanto a los valores iniciales de la lámina de agua en el estanque superior (Z_1) e inferior (Z_2) se estableció un valor del 50%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de sensibilidad

El análisis determinístico-estocástico en base a simulaciones Monte Carlo se realizó en el periodo de calibración. La forma de los diagramas de dispersión, caracterizada por un límite superior plano de la

distribución de NS, sugiere la insensibilidad de todos los parámetros estudiados, evidenciando de esta manera el fenómeno de equifinalidad, es decir, no se

pudo encontrar un único juego óptimo de valores de los parámetros del modelo (fenómeno caracterizado por un pico en la distribución de NS).

Tabla 2. Rango de variación de los valores de los parámetros incluidos en el presente análisis

Parámetro	Acrónimo	Unidad	Límites del rango de variación	
			Inferior	Superior
Factor de resistencia al escurrimiento	FR	-	0,10	10
Almacenamiento del suelo en el estanque superior	Z_{1max}	mm	100	4.500
Almacenamiento profundo en el estanque inferior	Z_{2max}	mm	100	7.500
Conductividad en la zona radicular o estanque 1	K1	mm mes-1	700	6.100
Conductividad en la zona profunda o estanque 2	K2	mm mes-1	50	800
Dirección preferencial del flujo	Df	-	0	1

Es importante mencionar que en relación al parámetro FR, para las URH bosque (Fig. 3) y pasto, se evidenció cierta tendencia a un valor mínimo óptimo, pero se cree que esta sensibilidad no es demasiado fuerte ya que no se observa un pico demasiado marcado en la distribución del coeficiente NS. A manera de ilustración se presenta en la Fig. 3 los diagramas de dispersión para el parámetro FR correspondiente a los usos bosque y páramo. Es importante recalcar que cada uno de los puntos en los diagramas de dispersión corresponde a un juego de valores de los parámetros del modelo, es decir, cada punto representa una simulación. La amplitud de cada diagrama de dispersión se corresponde con el rango de variación del respectivo parámetro del modelo (Tabla 2). La figura ilustra que se obtuvieron valores aceptables del coeficiente NS, en el orden de 0,79.

El fenómeno de equifinalidad comprobado en el presente estudio se puede atribuir entre otros aspectos a errores en las definiciones de contorno, en la estructura del modelo numérico y en los datos empleados en la modelación (Vázquez, 2003; Vázquez, 2010). En este sentido, es lógico pensar que varios conjuntos de valores de los parámetros del modelo que producen buenas simulaciones no necesariamente corresponden a la realidad física de la cuenca.

Se puede afirmar entonces que no es posible establecer con certeza que una combinación de parámetros es correcta (Wagener et al., 2004) y que no necesariamente los valores del conjunto de parámetros que maximicen el ajuste corresponden a los valores del conjunto de parámetros que mejor representan el sistema analizado (que tengan mejor congruencia física).

Definición de parámetros

Demostrado el fenómeno de equifinalidad en el modelo hidrológico se definió un único conjunto de parámetros a partir de un juego de conjuntos de parámetros (3.259 en total) catalogados como

“aceptables”, cuyos valores del coeficiente NS resultaron ser mayores a 0,60. Se estableció que el único conjunto de parámetros debía cumplir con la característica de que además de producir un buen ajuste de los valores observados se pueda representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de cada URH.

Para ello se utilizó información secundaria de la zona y características hidrológicas de cada cobertura de suelo desarrolladas en investigaciones realizadas en Colombia y Ecuador.

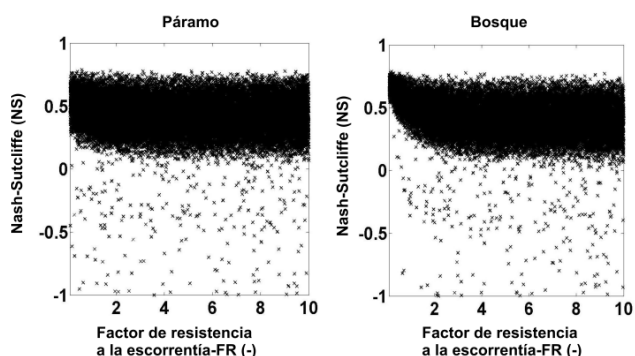


Figura 3. Diagramas de dispersión para el parámetro FR para las URHs páramo y bosque. Obsérvese que para diagrama el límite superior de la distribución del coeficiente NS es plano, sugiriendo de esta forma equifinalidad (insensibilidad)

Páramo: Por estar en la vertiente amazónica a este ecosistema se lo caracteriza como páramo húmedo (Mena y Hofstede, 2006) y por su inaccesibilidad como no intervenido (prístino), su altura promedio en la cuenca de estudio es de 3.770 m s.n.m. En este ecosistema el escurrimiento superficial es un evento muy raro ya que las lluvias se caracterizan por una baja intensidad y muy pocas veces superan la alta capacidad de infiltración del suelo (De Bièvre et al., 2006). Por lo tanto, este tipo de flujo se puede dar únicamente por saturación de los suelos que normalmente ocurren en humedales cercanos a los ríos (Llambí et al., 2012). En estos casos la

alta densificación de su cobertura, su gran capa superficial de materia orgánica y las pendientes fuertes que caracteriza a la URH (39,50 % del área mayor al 50% de pendiente), hace que el valor del parámetro FR escogido sea igual a 8, representando una resistencia alta al escurrimiento superficial, ya que se cree que la capacidad de infiltración del suelo es más determinante que la pendiente del terreno.

Por otro lado, en este tipo de ecosistemas se han estimado aportaciones adicionales de agua producto de la interceptación de la niebla y lluvia transportada por el viento (precipitación horizontal). En este contexto investigaciones en Colombia han calculado valores entre 54 y 273,50 mm año⁻¹ para zonas de páramo (Tobón, 2009b).

En cuanto a los suelos de páramos la literatura los considera bastante homogéneos y en zonas con influencia volcánica se los clasifica como Andisoles (Buytaert et al., 2012), los cuales lamentablemente por efectos de escala de la información de suelos no se los puede visualizar en la zona de estudio. A estos suelos si bien se los caracteriza como poco profundos (Llambí et al., 2012), se ha comprobado que en zonas próximas a la cuenca de estudio pueden alcanzar varios metros (Chimner y Karberg, 2008), lo cual se puede atribuir a la gran influencia volcánica que diferencia a los páramos del sur con los del norte del Ecuador. Estos suelos están constituidos por un estrato orgánico y uno mineral. Su característica principal es la gran capacidad de almacenamiento de agua debido a su alto contenido de materia orgánica en su primer estrato (Buytaert et al., 2012). Su alta porosidad contribuye a grandes conductividades saturadas (entre 10 mm h⁻¹ a 20 mm h⁻¹ (Buytaert et al., 2005), sin embargo, el gran volumen de mesoporos y microporos impiden el flujo sub-superficial rápido aumentando de esta manera la retención de agua. Estas propiedades del suelo hacen que el flujo subsuperficial sea lento; de estas características, además de la geología del entorno, se concluye que el flujo base en suelos de páramos se produce por escorrentía subsuperficial. Otra de las causas que se puede atribuir a este fenómeno son las condiciones en las que el suelo no está saturado, en este caso la conductividad hidráulica (no saturada) cae abruptamente, esto significa que bajo estas condiciones el agua se mueve de manera muy lenta a través del suelo, permitiendo que aunque exista mucha agua almacenada, esta no sea liberada con facilidad (Llambí et al., 2012). Se ha comprobado que en épocas secas el flujo de agua se conduce a través del estrato mineral y épocas húmedas a través del estrato orgánico (Albuja y Tenelanda, 2014).

Ante lo planteado se han calibrado los siguientes valores de parámetros: (a) para simular correctamente el caudal base de los suelos de páramos y la capacidad de retención de agua, se ha estimado un valor de D_f igual a 0,10, un valor de $K_2 = 300 \text{ mm mes}^{-1}$, y un $Z_{2\text{max}} = 2.200 \text{ mm}$; y (b) con el

fin de simular correctamente en el estanque superior la capacidad de retención de agua y las pérdidas evapotranspirativas estimadas en la literatura entre 1 mm día⁻¹ y 1,50 mm día⁻¹ (Hofstede, 1995; Buytaert, 2004) se ha estimado un valor de $K_1 = 700 \text{ mm mes}^{-1}$ y uno de $Z_{1\text{max}} = 500 \text{ mm}$.

Bosque: La altura promedio en la zona de estudio es de 2.743 m s.n.m, por la gran presencia de niebla y por estar bajo el límite del páramo, al ecosistema de estudio se lo conoce como bosque altoandino (Fontúrbel, 2002). Como es normal en todo tipo de ecosistema terrestre la principal entrada de agua es la lluvia, sin embargo, los bosques de alta montaña tienen entradas de precipitación horizontal considerables (Tobón y Arroyave, 2007). De esta manera en los bosques de alta montaña es esencial conocer la fracción de precipitación tanto horizontal y vertical que verdaderamente llega a la superficie del suelo, denominada precipitación neta, la cual está compuesta por las gotas de agua que caen a través de los troncos de los árboles o las ramas. En este contexto se puede analizar la primera limitación en el presente estudio, ya que no se está considerando la precipitación horizontal, aporte de agua importante en este tipo de ecosistema. En bosques montanos puede ocurrir que la precipitación que atraviesa el dosel excede la precipitación vertical debido a los grandes aportes de precipitación horizontal (Tobón y Arroyave, 2008). Experiencias al sur del Ecuador han demostrado aportes de precipitación horizontal desde 50 mm año⁻¹ a 1.700 mm año⁻¹ (Rollenbeck, 2010; Motzer, et al 2011).

La alta densidad de este tipo de bosques hace que parte de la lluvia vertical no llegue a la superficie del suelo, cuya agua interceptada regresa directamente desde el dosel a la atmósfera, dado el proceso de evaporación posterior al evento de lluvia (Tobón, 2009a). Al sur del Ecuador se han estimado valores de interceptación entre 9% y 38% de la lluvia vertical (Motzer, et al 2011; Fleischbein, 2006). Estos altos valores de pérdidas evaporativas por interceptación son atenuados en el balance hídrico por las bajas pérdidas evaporativas del suelo debido a la baja radiación incidente producto de las nubes, lo cual, sumado a la transpiración de los árboles conlleva a un valor relativamente bajo de evapotranspiración, entre 433 mm año⁻¹ y 605 mm año⁻¹ (Tobón y Arroyave, 2007; Motzer, et al 2011; Fleischbein, 2006; Cobeñas, 2007).

La geomorfología del suelo puede estar caracterizada por fuertes pendientes que pueden conllevar a suelos poco profundos y sitios con afloramiento rocosos. La presencia de materia orgánica, hojarasca y los briofitos (principalmente musgos) en el suelo hace que tengan alta capacidad de almacenamiento de agua, la cual es liberada en épocas secas, además de tener una buena capacidad de infiltración (Tobón et al., 2009). Sumándole a esto las lluvias constantes

y la presencia de nubes se concluye que los suelos en este tipo de ecosistemas permanecen húmedos casi todo el año. En este sentido se puede decir que la hidrología de bosques de montaña está caracterizada por un flujo superficial y subsuperficial condicionado principalmente por la superficialidad rocosa, las fuertes pendientes, la capa superior de materia orgánica y la alta permeabilidad del suelo. Un caudal base representado por la regulación de los briofitos, la hojarasca y la materia orgánica, además por el producto de la percolación profunda que existe por la excesiva agua en el suelo y que se da a través de las grietas de la roca (Tobón, 2009a), un importante aporte de la precipitación horizontal, y una evapotranspiración baja debido principalmente a la frecuencia de nubes bajas o niebla. Como se puede analizar la hidrología de bosques alto-andinos se adapta a la conceptualización de método de humedad de suelo de WEAP (Fig. 2), a excepción, claro está, de la falta de consideración de la precipitación horizontal. Los detalles de la calibración se indican a continuación.

Si consideramos el parámetro FR evaluando la pendiente del terreno (igual al páramo, el 39,50 % del área que compone la URH cuenta con pendientes fuertes > 50%) se puede pensar un valor bajo de resistencia del suelo al escurrimiento, sin embargo se cree, semejante al páramo, que la materia orgánica y la hojarasca aumenta esta resistencia pero en menor medida, por lo tanto el factor FR estimado fue de 2.

La información de suelos indica la presencia de inceptisoles en el área que delimita la URH, con textura media (Franco arcillosos limosos a Franco) y moderadamente gruesa (Franco limoso a Franco Arenoso), en un porcentaje del 32,50 y 67,50% respectivamente. Estas propiedades se traducen a valores altos de permeabilidad que al adicionar la presencia de materia orgánica indicaría un horizonte de suelo favorable para la disminución de la escorrentía y la retención de agua. Sin embargo, esta propiedad es minimizada por las pendientes fuertes que caracteriza a esta URH, favoreciendo de esta manera al escurrimiento subsuperficial. Bajo estas consideraciones se han definido los siguientes parámetros: (a) con el fin de representar correctamente en el estanque superior el flujo subsuperficial y las pérdidas evapotranspirativas se ha estimado un valor $K_1 = 2.000 \text{ mm mes}^{-1}$ con un $Z_{1\text{max}} = 200 \text{ mm}$; y (b) el caudal base se lo representó a partir de los valores de $K_2 = 600 \text{ mm mes}^{-1}$, $Z_{2\text{max}} = 200 \text{ mm}$ y un valor de $Df = 0,30$.

Pasto: Este tipo de cobertura se caracteriza por tener suelos degradados debido a la ganadería y a la intervención antrópica. La compactación que sufren estos suelos aumenta la densidad aparente y disminuye la capacidad de infiltración. Su bajo contenido de materia orgánica en el estrato superior hace que tengan poca capacidad de retención de

agua. Por estar a menor altitud sus temperaturas y pérdidas evapotranspirativas son mayores en relación al páramo y el bosque (su altura promedio en la cuenca de estudio es de 2.265 m s.n.m). En este sentido se puede decir que su hidrología está caracterizada por un flujo superficial alto por causa de la saturación del suelo y de su baja capacidad de infiltración, un flujo subsuperficial alto producto de la baja capacidad de retención lo cual conlleva a valores bajos de percolación y flujo base, y pérdidas evapotranspirativas altas por estar en zonas bajas y por lo tanto expuesto a temperaturas mayores. Este tipo de cobertura es la que mejor se adapta a la conceptualización del módulo de humedad de suelo de WEAP (Fig. 2).

La información de suelos indica la presencia de inceptisoles con textura moderadamente gruesa con propiedades buenas de capacidad de infiltración, sin embargo hay que considerar que al ser coberturas intervenidas los suelos tienen modificadas sus propiedades hidrofísicas, caracterizadas por una disminución de la porosidad y, por lo tanto, en su capacidad de almacenamiento de agua, además de disminuir su capacidad de infiltración por la compactación a la que se exponen. Si bien sus pendientes son menores en relación a la del bosque (20,50 % del área que compone la URH posee una pendiente mayor al 50%), su cobertura tiene poca capacidad de resistencia al escurrimiento ya que no posee una capa superficial de materia orgánica u hojarasca que retenga la alta energía cinética que poseen los flujos superficiales. Esta baja capacidad de retención de agua desfavorece la percolación al estrato profundo y aumenta el flujo intermedio. En este contexto se ha definido los siguientes parámetros: (a) para representar la poca capacidad de almacenamiento del suelo superficial y las pérdidas evapotranspirativas se definió valores de $K_1 = 1.000 \text{ mm mes}^{-1}$ y uno de $Z_{1\text{max}} = 100 \text{ mm}$; (b) su resistencia al escurrimiento fue definida con un valor $FR = 1$; y (c) su bajo aporte de caudal base se lo represento mediante los valores de $Z_{2\text{max}} = 100 \text{ mm}$, $K_2 = 500 \text{ mm mes}^{-1}$ y $Df = 0,80$. En la Tabla 3 se indica el resumen de los valores de los parámetros definidos para cada URH. Adicionalmente, en las Tablas 4, 5 y 6 se presenta un resumen de lo expuesto en esta sección del manuscrito con características comunes entre parámetros para facilidad de consulta.

Ajuste del modelo y balance hídrico

Los valores establecidos en los parámetros definieron un modelo con un coeficiente de ajuste $NS = 0,71$ y $0,68$ para el periodo de calibración y validación respectivamente, mientras que para todo el periodo de simulación fue de $0,71$ (Fig. 4a) con un coeficiente de determinación (de regresión lineal) $R^2 = 0,84$ (Fig. 4b). Mediante la Fig. 4c se puede observar como el modelo simula adecuadamente los flujos de la temporada de “verano”, representados

por los caudales del periodo Octubre-Febrero, y no así los caudales de la temporada de “invierno” representados por los caudales del periodo Marzo-Septiembre, que se evidencia particularmente en los meses de Marzo a Julio.

Tabla 3: Parámetros calibrados por el método de humedad del suelo del modelo WEAP en función de cada URH

URH	FR	Z _{1max} (mm)	Z _{2max} (mm)	K ₁ (mm mes ⁻¹)	K ₂ (mm mes ⁻¹)	Df
Páramo	8	500	2.200	700	300	0,10
Bosque	2	200	200	2000	600	0,30
Pasto	1	100	100	1000	500	0,80

Lo anterior conduce a la conclusión de que el modelo está simulando correctamente los flujos base (caudales con probabilidad de excedencia del 90%, según Ingol-Blanco y McKinney, 2009), esto es aún más notorio en el análisis de la curva de duración de caudales totales (Fig. 4d). Se cree que la no representatividad de los valores altos de caudal se lo atribuye a un problema de balance de agua.

En el periodo de calibración se pudo comprobar que el modelo es “sensible” al valor de FR, al ubicar valores mínimos (FR = 0,10) en cada URH, el rendimiento del modelo mejora sustancialmente (Fig. 4e), pasando de un valor de NS = 0,71 ($R^2 = 0,84$) a 0,85 ($R^2 = 0,85$). Sin embargo, este buen rendimiento del modelo exige obtener pérdidas evapotranspirativas muy bajas en relación a las que recomienda la literatura, principalmente en el bosque y páramo, pasando de un valor de 451 mm año⁻¹ a 197 mm año⁻¹ y de 355 mm año⁻¹ a 145 mm año⁻¹ respectivamente. Por su parte la cobertura pasto disminuye su valor de 586 mm año⁻¹ a 271 mm año⁻¹. En la Fig. 4f se puede analizar los valores de evapotranspiración real por cobertura para el modelo original. Lo anterior ratifica la problemática de balance de agua en el modelo ya que al no tener suficiente agua para la representatividad de los caudales altos, el modelo fuerza a un valor FR mínimo con el fin de que se aumente el escurrimiento superficial y subsuperficial y se logre alcanzar los valores altos de caudal, perdiendo de esta manera la representatividad del balance hídrico en la cuenca de estudio, justificando el comportamiento de este parámetro en el análisis de sensibilidad.

Tabla 4: Resumen de los criterios considerados durante el proceso de parametrización del componente Páramo del modelo hidrológico

Escurrimiento superficial	Aportaciones precipitación horizontal	Suelos	Evapotranspiración real
• Evento raro, la intensidad de lluvia pocas veces supera la capacidad de infiltración del suelo (De Bièvre et al., 2006). • 39,50 % del área mayor al 50% de pendiente. Representación física en WEAP mediante un valor de FR = 8.	• Valores entre 54 y 273,50 mm año⁻¹ (Tobón, 2009b). No se considera en el modelo.	• Andisoles. • Gran capacidad de almacenamiento. Profundidades considerables (Chimner y Karberg, 2008) con gran presencia de materia orgánica. Representación física en WEAP mediante un valor de Z1máx = 500 mm y Z2máx 2200 mm. • Conductividades entre 10 mm h⁻¹ a 20 mm h⁻¹ (Buytaert et al., 2005). • Gran cantidad de mesoporos y microporos que impide flujo superficial rápido. Representación física en WEAP mediante un valor de K1 = 700 mm día⁻¹. • Gran capacidad de regulación. Representación física en WEAP mediante un valor de K2 = 300 mm día⁻¹ y Df = 0,10.	• Valores entre 1 mm día⁻¹ y 1,50 mm día⁻¹ (Hofstede, 1995; Buytaert, 2004). Valores obtenidos en el modelo: 0,97 mm día⁻¹

Tabla 5: Resumen de los criterios considerados durante el proceso de parametrización del componente

Escurrimiento superficial	Aportaciones precipitación horizontal	Suelos	Evapotranspiración
• Condicionado por las fuertes pendientes. • 39,50 % del área mayor al 50% de pendiente. • Materia orgánica y hojarasca aumenta la resistencia al escurrimiento. Representación física en WEAP mediante un valor de $FR = 2$.	• Valores entre 50 mm año⁻¹ y 1.700 mm año⁻¹ (Rollenbeck, 2010; Motzer, et al 2011). No se considera en el modelo.	• Inceptisoles. • Presencia de materia orgánica, hojarasca y briofitos que ayudan al almacenamiento de agua. Representación física en WEAP mediante un valor de $Z1_{m\acute{a}x} = 200$ mm y $Z2_{m\acute{a}x} = 200$ mm. • Textura superficial media. Representación física en WEAP mediante un valor de $K1 = 2000$ mm día⁻¹. • Gran capacidad de regulación. Percolación condicionada por las pendientes fuertes. Representación física en WEAP mediante un valor de $K2 = 600$ mm día⁻¹ y $Df = 0,30$.	• Valores entre 1,19 mm día⁻¹ y 1,66 mm día⁻¹ (Tobón y Arroyave, 2007; Motzer, et al 2011; Fleischbein, 2006; Cobeñas, 2007). Valores obtenidos en el modelo: 1,24 mm día⁻¹

Tabla 6: Resumen de los criterios considerados durante el proceso de parametrización del componente Pasto del modelo hidrológico

Escurrimiento superficial	Aportaciones precipitación horizontal	Suelos	Evapotranspiración
• Cobertura con baja resistencia al escurrimiento. • 20,50 % del área que compone la URH posee una pendiente mayor al 50%. • Compactación de suelos favorece al escurrimiento superficial. Representación física en WEAP mediante un valor de $FR = 1$.	Despreciable o nula.	• Inceptisoles. • Suelos compactados debido a la intervención antrópica. Baja capacidad de almacenamiento. Representación física en WEAP mediante un valor de $Z1_{m\acute{a}x} = 100$ mm y $Z2_{m\acute{a}x} = 100$ mm. • Textura superficial moderadamente gruesa. • Propiedades hidrofísicas alteradas por intervención antrópica. Representación física en WEAP mediante un valor de $K1 = 1000$ mm día⁻¹. • Pobre capacidad de regulación y percolación debido a la poca capacidad de retención de agua de los suelos. Representación física en WEAP mediante un valor de $K2 = 500$ mm día⁻¹ y $Df = 0,80$.	• Por estar a altitudes menores, sus valores son mayores a los producidos en el ecosistema bosque y páramo. Valores obtenidos en el modelo: 1,61 mm día⁻¹

El problema de balance de agua entre otras cosas se atribuye a la incertidumbre asociada a los valores registrados y a la no consideración de la precipitación horizontal, principalmente en el bosque, ya que en la temporada de invierno la neblina y vientos fuertes son más frecuentes y el bosque puede estar interceptando aportes considerables de agua.

En la Fig. 4f se puede apreciar la producción de agua por cobertura de suelo a nivel promedio anual.

Como se observa los aportes de precipitación en cada URH, de mayor a menor, se da en el orden pasto (2.936 mm), bosque (2.894) y páramo (2.618 mm), lo cual justifica el comportamiento de cuencas amazónicas del Ecuador donde la precipitación es inversamente proporcional a la altitud.

Por su parte el flujo base se da en mayor medida en el páramo (2.008 mm año⁻¹), seguido del bosque (1.505 mm año⁻¹), y el Pasto (265 mm año⁻¹). Con el fin de relacionar ésta producción de agua con el área de cada URH se transformó las unidades a caudal, en este caso el orden de aporte se reorganiza en bosque (11,50 m³ s⁻¹), páramo (6,20 m³ s⁻¹), y pasto (1,40 m³ s⁻¹).

En escurrimiento directo (flujo superficial y subsuperficial) los aportes del páramo son mínimos (258 mm año⁻¹), destacándose en este tipo de flujo la cobertura pasto por sus aportes de 2.085 mm año⁻¹, mientras que el bosque posee una producción de 939 mm año⁻¹.

Finalmente en la Fig. 4g se aprecia el hidrograma promedio mensual simulado discretizado por cobertura de suelo. Como se observa existe un aporte mayoritario por parte del bosque representado por un caudal promedio mensual de $18,60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, seguido por el pasto ($12,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), y el páramo ($6,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Si se considera únicamente los valores de verano estos valores se modifican en $14,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $7,80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $6,70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el bosque, pasto y páramo respectivamente. Como se puede analizar en esta época el pasto tiene mayor aportación que el páramo, sin embargo, se debe tomar en cuenta que la producción de agua del pasto es en su mayoría escurrimiento directo producto de las precipitaciones ocurridas en esa época, mientras que el aporte del páramo es un valor relativamente constante todo el año.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el análisis de sensibilidad se demostró el fenómeno de equifinalidad para la presente aplicación de WEAP. En este proceso se evidenció que el parámetro de resistencia al escurrimiento FR tuvo cierta tendencia a un valor óptimo caracterizado por un valor mínimo, sin embargo se demostró que este proceso se dio por un problema de balance de agua atribuido entre otras cosas a la incertidumbre asociada al registro de los valores y a la falta de consideración de la precipitación horizontal, principalmente en el bosque, aporte importante de agua en este ecosistema.

El modelo desarrollado presentó un ajuste caracterizado por el valor $NS = 0,71$ y su rendimiento se lo puede catalogar como relativamente aceptable, ajustándose de buena manera en los caudales bajos no así en los altos. En este sentido, considerando las limitaciones del modelo, se concluyó que la cobertura con mayor producción de flujo base fue el bosque con un valor de $11,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, seguido del páramo, $6,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y el pasto, $1,40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El modelo desarrollado representó las pérdidas evapotranspirativas dentro del rango que sugiere la literatura, principalmente en la cobertura páramo y bosque. En este sentido se estimó un valor de 355 mm año^{-1} para el páramo, 451 mm año^{-1} para el bosque, y 586 mm año^{-1} para el pasto.

En el presente artículo se ha descrito la importancia de entender el funcionamiento hidrológico de los distintos ecosistemas en una cuenca y como estos contribuyen a la regulación hídrica.

En lo que respecta a la cuenca del río Cosanga se evidenció la falta de información para la representación total de su balance hídrico. En este sentido se recomienda que se hagan esfuerzos de cooperación entre instituciones públicas, privadas y no gubernamentales con el fin de investigar y monitorear todos los procesos hidrológicos de la zona ya que ésta en futuro brindará sus servicios hidrológicos al proyecto hidroeléctrico más

importante del país, Coca Codo Sinclair; además de que es considerada como alternativa de intervención para el proyecto futuro de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito.

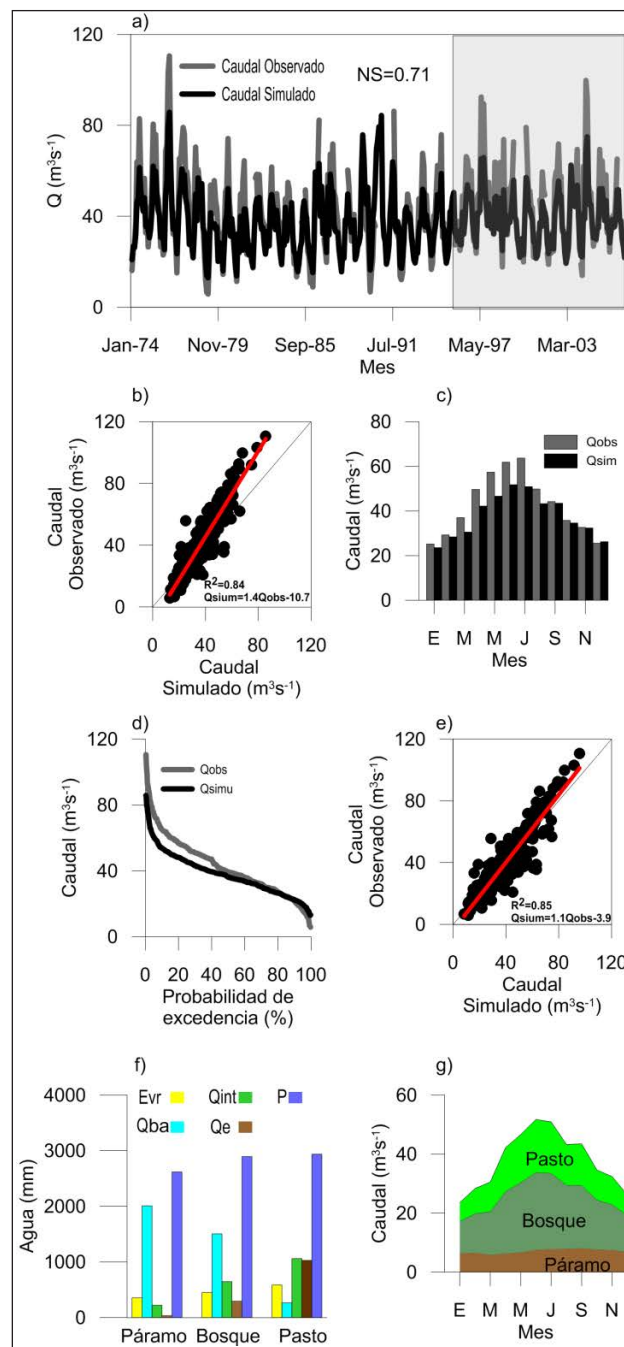


Figura 4: a) hidrograma de caudal simulado y observado en los períodos de calibración validación (resaltado en gris); b) correlación entre el caudal simulado y el observado; c) caudales promedios mensuales; d) curva de duración de caudales totales; e) correlación entre caudal simulado y observado considerando un valor de $FR = 0,10$ para todas las URH; f) análisis de aportaciones, pérdidas y flujos de agua por URH a nivel promedio anual; y g) hidrograma simulado discretizado por URH. Evr es la evapotranspiración real; Qba es el flujo base; Qint es el flujo intermedio; Qe es el flujo por escorrentía y P es la precipitación

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa hidroeléctrica COCASINCLAIR EP por la información cartográfica e hidrometeorológica facilitada para el presente estudio. La preparación del presente artículo se basó en los conocimientos generados en el proyecto “Establecimiento de modelos numéricos para casos selectos de la gestión de recursos hídricos” (DIUC_XI_012), financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), dirigido por el segundo autor y en el que el primer autor participó durante una temporada.

REFERENCIAS

- Acosta, L. 2014. Ecosistemas altoandinos, cuencas y regulación hídrica. 2014/11/12. <http://apusdelagua.blogspot.com/2014/09/ecosistemas-altoandinos-cuencas-y.html>.
- Albuja, E., & D. Tenelanda. 2014. Desarrollo de un modelo conceptual lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhurucay. Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 58 p.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, & M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Roma, 56 p.
- Arroyave, F. 2007. Contribución de la precipitación horizontal al ciclo hidrológico de los páramos, con referencia inicial al páramo de Guerrero. Tesis de Master of Science, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 112 p.
- Beven, K. 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources* 16: 41–51 p.
- Beven, K. 2012. *Rainfall-Runoff Modelling*. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 449 p.
- Binley, A.M., K.J. Beven, A. Calver & L.G. Watts. 1991. Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions. *Water Resources Research* 27(6): 1253-1261 p.
- Buytaert, W. 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian paramo and the impact of land use changes on their hydrology. Tesis de Doctorado. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Bièvre, J. Deckers & G. Wyseure. 2003. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el sur del Ecuador con TOP MODEL. *Revista Universidad del Azuay*, 31-32: 149–157 p.
- Buytaert, W., G. Wyseure, B. De Bièvre, & J. Deckers. 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Hisitic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* 19: 3985-3997 p.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Bièvre & F. Cisneros. 2012. Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Revista Colombia tiene Páramos*, 2: 8-27 p.
- Céleri, R. & J. Feyen. 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development* 29(4): 350–355 p.
- Céleri, R., W. Buytaert, C. Tobón, P. Crespo, J. Molina & J. Feyen. 2010. Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins. *IAHS* 336: 209–212 p.
- Centro de Cambio Global UC. 2009. Modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del río Paute. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 87 p.
- Chimner, R. & J. Karberg. 2008. Long-term carbon accumulation in two tropical mountain peatlands, Andes Mountains. *Mires and Peat* 3(4):1-10 p.
- Cobeñas, J. 2007. Estudio Hidrológico de la cuenca del río Jequetepeque. 2014/11/12. <http://www.monografias.com/trabajos60/estudio-cuenca-río-jequetepeque/estudio-cuenca-río-jequetepeque3.shtml>.
- Crespo, P., C. Coello & V. Iñiguez. 2008. Evaluación de SWAT2000 como herramienta para el análisis de escenarios de cambio de uso del suelo en microcuencas de montaña del sur del Ecuador. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Quito, Ecuador. 13 p.
- CTOTAL 2012. Plan de manejo de la cuenca de los ríos Quijos y Salado y primera etapa piloto de reforestación. Ecuador.
- De Bièvre, B., V. Iñiguez & W. Buytaert. 2006. Hidrología del páramo, importancia, propiedades y vulnerabilidad. In: Proyecto páramo (ed.). Investigaciones biofísicas en el páramo. GTP/Abya Yala.
- Espíldora, B., E. Brown, G. Cabrera & P. Isensee. 1975. Elementos de hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, Santiago, Chile, p. irr.
- Fleischbein, K. 2006. Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modelling approach. *Hydrological Processes* 20: 2491–2507 p.
- Fontúrbel, F. 2002. Los bosques andinos: reseña biogeográfica y elementos representativos. *Biología L Revista* 10: 12–19 p.
- Hampel, H., J. Cocha & D. Vimos. 2010. Incorporation of aquatic ecology to the hydrological investigation of ecosystems in the high Andes. *Maskana* 1: 91-100 p.

- Hofstede, R. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. Tesis de Doctorado, Hugo the Vries Laboratory. University of Amsterdam.
- Hofstede, R. & P. Mena. 2014. LOS BENEFICIOS ESCONDIDOS DEL PÁRAMO: Servicios ecológicos e impacto humano. 2014/12/13. <http://www.condesan.org/e-foros/paramos2/losbeneficiosescondidosdelpa.htm>.
- Ingol-Blanco, E. & D. McKinney. 2009. Hydrologic Model for the Rio Conchos Basin: Calibration and Validation. CRWR Online Report 08-09, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, 2009.
- Llambí, L., A. Soto, R. Céleri, B. De Bièvre, B. Ochoa & P. Borja. 2012. Ecología, hidrología y suelos de páramos. Programa de Capacitación Técnica. Proyecto Páramo Andino-CONDESAN, Quito. 272 p.
- Mantovan, P. & E. Todini. 2006. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology* 330: 368-381 p.
- Matamoros, D., E. Guzman, J. Bonini, & P.A. Vanrolleghem. 2005. AGNUS and SWAT Model Calibration for Hydrologic Modelling of an Ecuadorian River Basin under Data Scarcity. *En* Ostfeld A. y J.M. Tyson, (eds.), *River basin restoration and management*. Londres, Inglaterra. p. 71-78.
- Mena, P. & R. Hofstede. 2006. Los páramos ecuatorianos. In: M. Moraes, B. Øllgaard, L. Kvist, F. Borchsenius & H. Balslev (eds.), *Botánica económica de los Andes Centrales*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 557 p.
- Motzer, T., Munz, N., Anhuf, D. & Küppers, M., 2011. Transpiration and microclimate of tropical montane rain forest in southern Ecuador, Tropical Montane Cloud Forests. Ed. L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena, and L. S. Hamilton. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 447- 455 p.
- Nash, J. & J. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282–290 p.
- Pombosa, E. 1997. Síntesis de los trabajos previos a la modelización hidrológica en la cuenca del río Guayas. *Memorias del VII Congreso Nacional de Hidráulica*, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador. 99-110 p.
- Quichimbo, A., R.F. Vázquez & E. Samaniego. 2013. Aplicabilidad de los modelos NAM y DBM para estimar caudales en subcuencas alto andinas de Ecuador. *MASKANA* 4(2): 85-103 p.
- Rollenbeck, R. 2010. Spatial and temporal dynamics of atmospheric water inputs in tropical mountain forests of Southern Ecuador. *Hydrological Processes*. Special Issue Hydrometeorology of tropical montane cloud forests. 25(3): 344–352 p.
- SEI. 2011. WEAP Water Evaluation And Planning System User Guide. Stockholm Environment Institute, 335 p.
- Tobón, C. 2009a. Los Bosques andinos y el Agua. Programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos ECOBONA. Quito, Ecuador, 121 p.
- Tobón, C. 2009b. Eco-hidrología de páramos Andinos. 2014/10/08. <https://www.youtube.com/watch?v=L77gkLQx96M>.
- Tobón, C. & F. Arroyave. 2007. Inputs by fog and horizontal precipitation to the páramo ecosystems and their contribution to the water balance. *Fog, Fog Collection and Dew*. FogQuest, La Serena, Chile, 22–27 July, 233–236 p.
- Tobón, C., & F. Arroyave. 2008. Hidrología de los bosques alto-andinos. En *Ecología de Bosques Andinos*, Universidad Nacional de Colombia. J. D. León (ed.), Medellín, Colombia. 213 p.
- Tobón, C., L. Bruijnzeel & A. Frumau. 2009. Physical and hydraulic properties of Tropical Montane Cloud Forest soils and their changes after conversion to pasture. *Proceedings of the Second International Symposium: Science for Conserving and Managing Tropical Montane Cloud Forests*, Waimea, Hawaii, July 27 – August 1, 2004.
- Vargas, X. 2012. Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. CEPAL (ed.), Chile, 227 p.
- Vázquez, R.F. 2003. Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems. Tesis de Doctorado, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica. 335 p.
- Vázquez, R. 2010. Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *MASKANA* 1: 79–90 p.
- Vázquez, R.F., L. Feyen, J. Feyen & J.C. Refsgaard. 2002. Effect of grid-size on effective parameters and model performance of the MIKE SHE code applied to a medium sized catchment. *Hydrological Processes* 16(2): 355-372 p.
- Wagener, T., M. Weather, & M. Less. 2004. Rainfall-Runoff modelling and Monte-Carlo analysis toolboxes for Matlab: Monte-Carlo Analysis Toolbox User Manual. 2014/09/10 www.imperial.ac.uk/ewre/research/software/toolkit.
- Young, C., M. Escobar, M. Fernandez, B. Joyce, M. Kiparsky, J. Mount, V. Metha, D. Purkey, J. Viers & D. Yates. 2009. Modeling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 45: 1409–1423 p.

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

Alcocer, Victor

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Balocchi, Francisco

University of Arizona, USA

Caffagi, Adriana

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Emmanuel, Evens

Universidad de Quisqueya, Haití

Fossati, Monica

Universidad de la República, Uruguay

Gil, Joram

Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Gutierrez, Alfonso

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Logan, Will

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA

Martinez, Polioptro

Universidad de las Américas Puebla, México

Mendoza, Javier Carlos

Universidad mayor de San Andrés, Bolivia

Pizarro, Roberto

Universidad de Talca, Chile

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Cuba

Pochat, Victor

Gestión Integrada de Recursos Hídricos, UNESCO, Argentina

Serra, Juan Jose

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina

Vargas, Jose

Universidad de Concepción, Chile

UNESCO

Programa Hidrológico Internacional
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe

International Hydrological Programme
Regional Office for Science
for Latin America and the Caribbean

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94
aqualac@unesco.org.uy
www.unesco.org.uy/phi/aqualac

