



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. 2
MAR. 2010

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

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

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

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

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

ISSN 1688-2873

© UNESCO 2010

Foto de portada: © Denise Gorfinkiel, UNESCO.

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

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

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

Subject to availability free copies can be requested to:

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

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

CONSEJO EDITORIAL / EDITORIAL COUNCIL

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

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

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

CONTENIDO / CONTENTS

- La reutilización de aguas regeneradas en España:
Ejemplos de aplicación en el marco del proyecto
CONSOLIDER-TRAGUA.
**Irene de Bustamante, Ma. del Carmen Cabrera,
Lucila Candela, Javier Lillo y María del Pino Palacios**
Treated Urban Wastewater Reuse in Spain:
The CONSOLIDER-TRAGUA Project
Case Study Examples 1
- El rol de los humedales en el contexto
evolutivo de la red hídrica superficial
de la Provincia de Corrientes, República Argentina
**Miguel A. Guiraut, Mario Rojana
y Andrea Isabel Valladares**
The Role of Wetlands within the Context
of the Superficial Drainage Pattern Evolution
in the Province of Corrientes, Argentina 18
- Variación cronoespacial de los caudales
ecológicos en la cuenca del río Valles, México
Germán Santacruz De León
Temporal-Spatial Variation of Ecological
Flows in the Valles river basin, Mexico 26
- Evaluación de la oscilación Madden-Julian en
la predicción de niveles de precipitación
de la costa ecuatoriana
**Michele Trickey, Ma. del Pilar Cornejo-Grunauer
y Jonathan Cedeño**
Assessment of the Madden-Julian Oscillation
in the Prediction of Precipitation Levels
of the Ecuatorian Coast 37
- Assessing and Mitigating the Impacts of
Climate Change and Human Activities on
Groundwater Quantity and Quality of the
Guarani Aquifer in Riberão Preto, Brazil
Henrique Marinho Leite Chaves
Relevamiento y mitigación de los impactos
del cambio climático y actividades humanas
en la cantidad y calidad del agua subterránea
del Acuífero Guaraní en Riberão Preto, Brasil 45
- Uso eficiente del agua de riego mediante
sondas de capacitancia.
Alfonso Luis Orozco Corral
Efficient Watering Management Using Capacitance Probes.... 56
- El consumo hídrico de la agricultura
y la minería aurífera en la cuenca del río
Jáchal, Provincia de San Juan, Argentina
**Omar Miranda, Mario Liotta, Alfredo Olguín
y Alejandro Degiorgis**
Water Use in Agricultural Crops and
Gold Mining in the Jáchal River Basin,
San Juan Province, Argentina 68
- Estimación del volumen promedio recibido por
el humedal de la subcuenca del río Blanco
(Bajo Papaloapan; Veracruz), a través del cálculo
de un balance de aguas
Enrique A. Sánchez Camacho
Assessment of the Average Volume Received by the
Wetlands of the Blanco River Sub-basin
(Lower Papaloapan, Veracruz), by Calculating
a Water Balance 78

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

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

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

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

DAVID ENFIELD

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

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

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

MICHAEL GLANTZ

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

KENRICK LESLIE

Comité Caribeño para el Cambio Global, Belice
Caribbean Committee of Global Change, Belize

ROBERTO PIZARRO

Universidad de Talca, Chile
University of Talca, Chile

CARLOS TUCCI

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

SUSCRIPCIONES

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

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

SUSCRIPTIONS

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

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org.uy

EDITORIAL

Este nuevo número de Aqua-LAC estará en sus manos cuando aún siguen escuchándose los ecos del desastre en nuestro país hermano Haití, desde el fatídico 12 de enero, cuando un muy intenso terremoto dejó más de doscientos mil muertos, un número mucho mayor de heridos e incalculables pérdidas materiales.

Este desastre se suma a los que causan en Haití los huracanes de ocurrencia anual, impactando sobre las precarias condiciones en que vive gran parte de la población con su alto grado de pobreza y sus muy limitadas posibilidades para revertir el estado de subdesarrollo. A menos de dos meses de este terrible suceso nuestra región fue golpeada nuevamente, por un terremoto mucho más intenso pero, afortunadamente, menos devastador, esta vez en nuestro querido Chile, causando varios cientos de muertos y numerosas pérdidas materiales.

Queremos, en primer lugar, transmitir un abrazo fraterno a nuestros colegas Evens Emmanuel, miembro del Consejo Editorial, y Roberto Pizarro, miembro del Consejo Directivo de nuestra revista, expresándoles nuestra más profunda solidaridad, la cual querríamos hacer extensiva a todos los colegas que han debido soportar esas situaciones tan dolorosas y están haciendo esfuerzos denodados para recuperarse de sus gravísimas consecuencias.

El agua, sujeto del interés de nuestra Revista, muestra en circunstancias como las vividas en Haití y Chile su valor esencial a la vida; ha sido la sed el símbolo desgarrador del dolor de quienes quedaron atrapados con vida en las ruinas de las poblaciones devastadas por los sismos. Y fue, como debía ser, el abastecimiento de agua potable uno de los primeros resultados del esfuerzo internacional solidario ante la tragedia y la protección de las fuentes de agua y el saneamiento la preocupación que siguió. El concepto cotidianamente manejado de “el agua es vida”, amplió en la tragedia su sentido de urgente realidad, frente a las consecuencias de los sismos vividos.

Hoy estamos frente a un abismo sobre el cual se deberán tender puentes con la solidaridad internacional. Como primeros pasos para la recuperación de las capacidades perdidas, será necesario empezar con actividades tales como rescatar la información básica disponible en distintas bases de datos institucionales y personales, diseñar nuevas redes de observación, proveer el instrumental de medición, entre otras acciones primordiales. Al mismo tiempo, se podrán poner a disposición las capacidades para la reorganización de los institutos de enseñanza e investigación y de los organismos de planificación y gestión, y para la elaboración de estudios, programas, proyectos y planes de acción. Para que todo ese aporte sea más efectivo, deberemos buscar la forma de interrelacionar nuestras iniciativas y las de las instituciones a las que pertenecemos, movidos por esta causa solidaria.

Se trata de un momento ciertamente excepcional que nos obliga a reflexionar profundamente sobre el verdadero sentido de nuestra tarea cotidiana y su grado de respuesta ante problemas concretos.

Editor en Jefe

EDITORIAL

As this new issue of Aqua-LAC reaches you, the echoes of the disaster that struck our dear sister nation of Haiti are still resounding. The toll of the fateful 12th-January most violent earthquake includes over two thousand dead, a much larger number of injured people, and countless serious material losses.

This catastrophe compounds the disasters regularly caused by the annually-occurring hurricanes, and negatively impacts the precarious living conditions of a large proportion of the Haitian population, which was already suffering the effects of high poverty levels and very limited possibilities to reverse its underdevelopment status. Less than two months after this terrible event our region was again hit by an earthquake, stronger but fortunately less devastating: this time in our dear Chile, causing the death of several hundred people and numerous material losses.

First of all, we would like to send a brotherly salutation to our colleagues Evens Emmanuel, member of the Editorial Board, and to Roberto Pizarro member of the Board of Directors of our journal, expressing our deepest solidarity, which we would like to extend to all of our colleagues, who, have had to endure those painful situations and are striving to recover from its most serious sequels.

It is in circumstances such as those being experienced by Haiti, that water, the subject matter of our Journal, proves vitally important for life: thirst has been the heartbreaking symbol of the pain of those trapped alive under the ruins of the towns devastated by the earthquakes. Water-supply efforts had to be, and were, one of the first outcomes of the international solidarity drives in the face of the tragedy, followed by water sources and sanitation protection as the top concern. The earthquakes consequences highlighted the pressing reality of the “water is life” everyday notion.

Today we face an abyss over which we should build bridges with international solidarity.

The first steps towards the recovery of the lost capacities will have to consist of activities such as rescuing the basic information available in different institutional and personal data bases, designing new observation networks, providing the needed measurement and laboratory toolkits, among other primary activities. Capacities could simultaneously be made available for the reorganization of the teaching and research institutes and planning and management agencies, and for the development of studies, programmes, projects, and action plans. In order for this contribution to be more effective, and inspired by this solidarity cause, we should seek the manner of inter-relating our personal initiatives with those of the institutions we belong to.

This is certainly an exceptional moment, and we must engage in a profound reflection on the genuine purpose of our everyday task and its capacity of response to specific problems.

Editor in Chief

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

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

Contenido

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

Idioma

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

Aceptación de los manuscritos

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

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

Proceso de revisión

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

Derechos de reproducción (Copyrights)

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

Responsabilidad

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

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

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

Contents

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

Languages

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

Acceptance of manuscripts

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

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

Review process

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

Copyrights

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

Disclaimer

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

LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN ESPAÑA: EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO CONSOLIDER-TRAGUA

TREATED URBAN WASTEWATER REUSE IN SPAIN: THE CONSOLIDER-TRAGUA PROJECT CASE STUDY EXAMPLES

De Bustamante, I.¹, Cabrera, M.C.², Candela, L.³, Lillo, J.⁴ y Palacios, MP.⁵

Resumen

La reutilización de aguas depuradas en España se realiza desde hace décadas, siendo uno de los países en los que esta práctica está más extendida. Sin embargo, no se llega a reutilizar más del 5% del total de las aguas residuales recogidas, aunque en algunos casos, como en Canarias, el agua depurada ha llegado a suponer un 20% del agua consumida. En este artículo se presentan tres ejemplos de reutilización de aguas depuradas con una importante incidencia en los aspectos ambientales y asociados a condiciones hídricas diversas. Los estudios se están llevando a cabo dentro del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA cuyo objetivo es abordar de manera integrada los aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Las zonas seleccionadas para los estudios de campo se sitúan en Andalucía donde el agua regenerada se aplica a filtros verdes y riego de cultivos para la obtención de biodiesel; Canarias para riego de campos de Golf y Cataluña donde el agua es inyectada para generar una barrera hidráulica contra la intrusión marina del acuífero. En los tres casos estudiados se incide en los aspectos suelo-agua-plantas y sus impactos en el medio.

Palabras clave: Reutilización, Aguas regeneradas, Zona no saturada, España

Abstract

The treatment of urban waste water is imperative to prevent environmental pollution. Reuse of treated waste waters for irrigation or aquifer recharge allows the partial recovery of the treatment costs. Moreover, the reuse emerges as an alternative water resource in arid and semi-arid areas. However, the effects of those applications in the soil-plant system, water systems and aquifers remains very little known. Those effects depend on the receptor system features, and for this reason they must be identified and well defined prior the reuse of the treated waste water in order to know the environmental response. The aim of this paper is to show the work regarding the reuse of waste waters from urban treatment plants that is nowadays carried out in three different scenarios (Canarias, Catalonia and Sevilla). The comparison and discussion of results involving the establishment of a common methodology is foreseen.

Even if Spain is one of the European countries where more waste water is reused, the amount of reused water is still very little significant, taking into account that the reuse potential is around 10 times over the actual level (Hochstrat et al., 2005). Recent legislation (Real Decreto 1620/2007, BOE 2007) transposes the water framework European directive (Directive 2000/60/EC) and incorporates the concept and definition of reclaimed (regenerada) water.

In the framework of the CONSOLIDER_TRAGUA Research Program, several aspects involved in the urban waste water reuse are considered from an integrated approach (Gómez et al., 2009). Among those aspects, it is included the assessment of the effects of that reuse in the physical environment. Three cases are investigated, considering their differences in geography, hydrology, and reuse technologies: a) the hydraulic barrier against the saline intrusion in the Llobregat Delta (Barcelona, Catalonia), b) the irrigation of the golf course of Bandama (Gran Canaria, Canary Islands), and c) the land application (green filter) in Carrión de los Céspedes (Sevilla).

In the Llobregat Delta, a control of a saline intrusion is exerted by the installation of a positive hydraulic barrier by injection of treated wastewater derived from the treatment plant of Depurbaix that started in 2007 (Cazurra, 2008). The injected waste water is from the tertiary stage and it has undergone an additional treatment consisting of ultrafiltration, inverse osmosis, and ultraviolet disinfection. As a complement to the conventional water analyses (physicochemical parameters, major ions), 170 emerging compounds are being monitored, including pharmaceuticals (antibiotics, drugs), personal care products, pesticides/herbicides, steroids and hormones, gasoline additives, antiseptics, etc. The monitoring of those compounds is essential because not all of them are eliminated during the treatment. Bimonthly sampling surveys are being carried out in the influent and effluent of the treatment plant, and in the wells from the local (at 1 km distance) and regional network (more than 2.5 km distant from the injection wells). The first results show that not all compounds detected in the

¹ Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá de Henares. Tf: +34918854921, irene.bustamante@uah.es

² Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España. Tf: +3428454478, mcabrera@dfis.ulpgc.es

³ Dpto. de Ingeniería del Terreno. Universidad. Politécnica de Cataluña. España. Tf: +34934076868, lucila.candela@upc.edu

⁴ Dpto. de Biología y Geología, Universidad Rey Juan Carlos. Tf +34914887016, javier.lillo@urjc.es

⁵ Dpto. de Producción animal. Universidad. de Las Palmas de Gran Canaria. España. Tf: +3428454353, mpalacios@dpat.ulpgc.es

Artículo enviado el 04 de noviembre de 2009

Artículo aceptado el 22 de enero de 2010

influent were eliminated in the tertiary treatment. However, under the additional treatment most of them are removed, and only 11 remain with a concentration above 0.1 µg/L (Teijón et al., 2008). The data from the sampling surveys carried out in the wells of the local network during 2007 and 2008 point out the presence of up to 26 out of the 170 analyzed compounds in the groundwater prior to the injection. Caffeine, Gemfibrozil, Hydrochlorotiazine and Iopromide occur in with a concentration above 0.5µg/L. Iopromide is related to the natural recharge of the aquifer, as this compound is not detected in the treated waste water.

The research in the golf course of Bandama is focused in the processes affecting to the water applied to the soil and the vadose zone, from the start of the water infiltration up to its arrival to the aquifer. The golf course has an extension of 14.5 ha, being irrigated with treated waste water by a spraying system since 1976. A desalination method is being applied to reduce the water salinity since 2002. Irrigation frequencies are variable, depending of the year's season, reaching up to a maximum of 7 mm/day. The irrigated specie is Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), a C4 grass well adapted to warm and saline environments. The rocks in the area constitute the volcanic cone and caldera of Bandama, and they consist of basaltic lavas and pyroclastics deposits of 2000 years in age. These rocks are overlaying older basaltic and fonolitic rocks (up to 13 Ma) with intercalated alluvial conglomerates, that are outcropping in the caldera. The Gran Canaria island is considered as a unique aquifer with a piezometric domo-like surface (Custodio y Cabrera, 2008), that in the area of the golf course is located at 250 m of depth. The uppermost part of the vadose zone is constituted by a soil 0.5-1 m thick, but the water preferentially flows through fractures in the rest of the vadose zone, and in lesser extension through porosity. The study of the soil has been based on unaltered samples. Two different types of soils have been identified, with different behavior regarding water infiltration and ion mobility and biological activity (Palacios et al., 2009). To collect samples of the water in soil, a lysimeter has been installed in situ at 60 cm depth. In addition, sampling surveys are carried out in a gallery (El Culatón) located 50 m beneath the golf course, to get representative samples of the water that flowing through the vadose zone is reaching the aquifer. Nowadays, a periodic sampling of the irrigation, lysimeter, gallery and selected wells waters is being carried out. Analyses of water included physicochemical parameters, major ions, heavy metals and selected emerging compounds determinations, including nicotine, methamizol, paraxanthine, ibuprofen, cafeine, fluoxetine, and permethrine. The water samples from the lysimeter show that there is a noticeable increment in Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, NH₄⁺, NO₃⁻ y B, derived from a high soil lixiviation. The composition of the water samples from the gallery points out that it may be draining a perched aquifer affected by the irrigation (Cabrera et al., 2009). Regarding the emerging pollutants, nicotine and caffeine are detected in the most of the analyzed samples, being the rest of compounds in variable amounts (ng/L).

In Carrión de los Céspedes, a new green filter has been designed for water reuse, biomass production and aquifer recharge. The design basis is the control of the conditions in order to identify the effects of the green filter. Four plots of ground have been prepared for the crops, two as blank parcels to be irrigated with clean water (from a well); and the other two to be irrigated with treated waste water. Two species have been selected to perform the study: *Jatropha curcas* L. y *Paulownia tomentosa*. The quality of the applied water fits those requirements established by the 1.a Annex of the R.D. 1620/2007. The study of the soil and materials underlying was based on geophysical (Electric Resistivity Tomography, Lillo et al., 2009) and geological (drill core sampling and outcrops study) methods. Three lithological units have been identified beneath an organic-rich agricultural soil: a) the uppermost unit is composed of fine to very fine sands (plagioclase, quartz, illite, kaolinite, calcite, and minor halite) with low water content, displaying a variable thickness (0-2 m); b) the main unit is formed by clayey silts (plagioclase, quartz, illite, montmorillonite, kaolinite, calcite, and minor halite), displaying a thickness over 10 m, with frequent carbonate nodules and paleosol structures; c) the lowermost unit, the regionally so-called "blue marls unit", a non-permeable unit that is considered the lower limit of the aquifers.

Nine 3-piezometer nests were installed reaching depths of 2, 6 and 10 m. Textural, mineralogical, physicochemical analyses, water content and density were determined in samples from the drill cores. After the installation of piezometers, and prior to start the irrigation, a sampling survey was carried out to obtain the base line composition of ground water. Analyses of water included physicochemical parameters and major ions, coliforms and helminth eggs and emerging pollutants. The compositional data show high mineralized waters with high concentrations of Cl⁻ and Na⁺. Thus, most of the samples correspond to Cl-Na waters, with some variations to Cl-Na-Mg, and Cl-Na-Ca. No pollution has been detected from the ammonia, organic carbon or nitrate data. Regarding the emerging pollutants, nicotine, paraxanthine, caffeine and cotinine have been detected, probably related to regional flows of ground water.

Key words: Reuse, reclaimed water, vadose zone, Spain.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de depurar los efluentes, en especial los de origen urbano, producidos como consecuencia de la actividad humana para evitar la contaminación ambiental es un hecho incuestionable. Además, la reutilización de las aguas depuradas para usos diversos, como el regadío o la recarga artificial de acuíferos, permite la recuperación parcial de los costes derivados del proceso de depuración y especialmente en las zonas áridas y semiáridas proporciona

un recurso de agua alternativo. Por ello, la reutilización es una práctica cada vez más extendida.

Si bien desde finales del siglo XX el agua procedente de depuradora ha sido utilizada para diversos fines, se ha producido un incremento generalizado en los últimos años (Levine y Asano, 2004, Durham et al, 2005; Hochstrat et al., 2005). Los usos derivados de su aplicación pueden ser diversos y abarcan desde los menos restrictivos (p.e riego de bosques) hasta los más exigentes (riego de productos agrícolas para

su consumo en fresco), siempre y cuando se consigan unos criterios de calidad del agua mínimos para que su utilización sea segura. Posiblemente, el uso más extendido sea en la agricultura, por la existencia de numerosas ventajas derivadas del enriquecimiento en nutrientes, implicaciones socio-económicas, reducción de la dosis de aplicación de abonos y posibilidad de gestionar los efluentes de una forma más efectiva (Candela et al., 2007).

A partir de los años 70, surge el concepto de aguas depuradas (reclaimed, newater, regeneradas, etc.) en numerosos países (Israel, EEUU, España, entre otros), aplicable a las aguas depuradas cuya calidad las hace susceptibles de ser reutilizadas, aunque con un enfoque desde el punto de vista sanitario (FAO) mayoritariamente. Sin embargo se desconocen los efectos desfavorables que pudieran producirse, tanto en el sistema planta-suelo como en las aguas superficiales y los acuíferos subyacentes para minimizar su impacto. Recientemente y como respuesta a la gran reutilización de aguas residuales urbanas tratadas en agricultura, se viene demostrando un creciente interés por la presencia de los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (PPCPs) en las aguas subterráneas y superficiales (Sedlak et al., 2000). Estos efectos, que dependen en gran medida de las características del medio receptor, deben ser caracterizados previamente a la reutilización de este tipo de agua.

El objetivo de este artículo es presentar los trabajos actualmente en desarrollo dirigidos a la reutilización del agua procedente de depuradoras urbanas y que de forma coordinada se lleva a cabo en España en tres escenarios diferentes (Canarias, Cataluña y Sevilla). La comparación de resultados y la discusión de los mismos se realizan a partir del establecimiento de una metodología común.

USOS AMBIENTALES DE LA REUTILIZACIÓN EN ESPAÑA

España es el país europeo con mayor déficit hídrico donde los recursos hídricos no convencionales, como la desalación o el agua procedente de depuradora, constituyen una parte importante de la gestión integrada de los recursos hídricos de forma generalizada. Paralelamente, también es uno de los países que más agua reutiliza aunque en cantidades poco significativas; no se llega a reutilizar más del 5% del volumen de las aguas residuales captadas, aunque según estudios recientes, el potencial de reutilización unas 10 veces superior al nivel actual (Hochstrat et al., 2005). Entre las causas de la escasa reutilización, cabe citar la ausencia de protocolos de tratamiento para las aguas regeneradas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), ausencia de criterios claros tanto en la elección de tecnologías para tratamientos avanzados como en los instrumentos que permitan establecer las ventajas económicas y sociales de la reutilización.

Recientemente, la ausencia de indicadores de calidad de las aguas reutilizables en función de los usos se ha visto subsanada mediante la publicación de legislación específica al respecto, con el Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Este Real Decreto desarrolla la legislación pendiente tras la publicación del Plan Hidrológico Nacional (11/2005) a la vez que da cumplimiento a las exigencias del Reglamento de Dominio Público Hidráulico y transpone la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) e incorpora el concepto y la definición de 'agua regenerada', cuyo uso requerirá una concesión administrativa que se concederá según la posterior utilización del agua. En el Real Decreto, se distinguen los siguientes usos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental y en su anexo I se recogen los criterios de calidad diferenciados según los usos, aportando límites de obligado cumplimiento. Los criterios definidos tienen la consideración de mínimos obligatorios exigibles, incluyendo parámetros físico-químicos y sanitarios. Además, para el resto de los parámetros es necesario que las aguas depuradas cumplan con las condiciones necesarias para el vertido de aguas residuales según se recoge en el Real Decreto 1315/1992 (BOE, 1992).

La Tabla 1 resume los usos y las calidades de agua indicadas en el citado Real Decreto, comparándolas con los datos recogidos por Levine y Asano (2004) basados en las normas de la EPA. La tabla no incluye otros criterios que se especifican en la norma española, que en función de los usos contempla el control de otros contaminantes, como *Legionella sp.* si existe riesgo de aerolización o nitratos si se va a proceder a recarga de acuíferos.

EJEMPLOS DE REUTILIZACIÓN EN EL PROYECTO CONSOLIDER-TRAGUA

En el marco del proyecto de investigación CONSOLIDER-TRAGUA, iniciado en 2006, se aborda de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de EDARs (Gómez et al., 2009). Entre los diversos objetivos planteados se incluye la realización de un inventario de aguas residuales potencialmente aptas para su reutilización, el establecimiento de protocolos de tratamiento en función de sus características cualitativas, los aspectos económicos y estimación del impacto de su reutilización sobre el medio físico.

Un aspecto importante del proyecto está constituido por la investigación de la reutilización de aguas orientados a la recarga de acuíferos y a regadío. Los estudios se desarrollan en tres áreas (Cataluña, Andalucía y Canarias; Fig. 1) caracterizadas por su diversidad geográfica, condiciones hídricas diferenciadas y la reutilización del agua regenerada mediante diversas metodologías. Las aguas regeneradas se aplican al establecimiento de una barrera hidráulica

Tabla 1: Comparación entre los usos y criterios de calidad del agua a reutilizar según el Real Decreto 1620/2007 para España y los usos recogidos por Levine y Asano (2004) según la adaptación de la Environmental Protection Agency de USA

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Uso Urbano				
1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU	Sin restricción de acceso: Riego de jardines, sistemas contra incendios, construcción, fuentes, usos en edificios (lavabos, aire acondicionado)	DBO ≤ 10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU CF = ND Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección
1.2 Servicios: Riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <200 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Riego de zonas con acceso restringido: Campos de Golf, cementerios, usos residenciales, cinturones verdes	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
Riego agrícola				
2.1 Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <100 UFC /100 mL * Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Cultivos comestibles: Cultivos para consumo humano sin cocinar	DBO ≤ 10 mg/L TSS ≤ 2 mg/L CF ≤ ND/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección

Tabla 1: Cont.

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
2.2 Riego de productos para consumo humano con tratamiento industrial posterior Riego de pastos Acuicultura	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L	Cultivos no comestibles o que necesitan procesado: Forrajes, fibras, cultivos de semillas, pastos, viveros comerciales, granjas de césped, acuicultura	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
2.3 Riego de cultivos leñosos que impida el contacto del agua con los frutos, flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo, cultivos industriales no alimentarios, forrajes, cereales y semillas oleaginosas	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L			
Uso Industrial				
3.1 Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria y otros usos industriales.	Nemátodos intestinales - Sin límite <i>Eschericia coli</i> <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L Turbidez ≤ 15 NTU	Sistemas de refrigeración, aguas de proceso, aguas de caldera, actividades de construcción y aguas de limpieza	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L	Secundario y Desinfección
Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <1000 UFC /100 mL* Sólidos en suspensión <35 mg/L			
3.2 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <5 mg/L Turbidez ≤ 1 NTU			

Tabla 1: Cont.

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Usos Recreativos				
4.1 Riego de campos de golf	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 200 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Incluidos en el riego de zonas con acceso restringido	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
4.2 Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales en los que está impedido el acceso al público	<i>Eschericia coli</i> = 10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 35 mg/L	Pesca, remo y otras actividades recreativas sin contacto directo con el cuerpo humano	DBO ≤ 30 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU CF ≤ ND mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
Prohibido en España		Masas de agua sin restricciones en el contacto con el cuerpo humano (natación, etc.)	DBO ≤ 10 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección

Tabla 1: Cont.

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Usos ambientales				
5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	<i>Eschericia coli</i> = 1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 0 mg/L	Recarga de acuíferos: recuperación, control de la intrusión marina y control de la subsidencia	Específicos para cada caso	
5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU			
5.3 Riego de bosques, zonas y de otro tipo no accesible al público Silvicultura	Turbidez ≤ 2 NTU			
5.4 Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares)	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso	Humedales artificiales, mejora de humedales naturales y sostenimiento de cauces	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl2 residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Desinfección

ND = No detectados

UFC = Unidades formadoras de colonias

TSS = Total de sólidos disueltos

CF = Coliformes fecales

* realizando un muestreo a tres clases con valores fijados

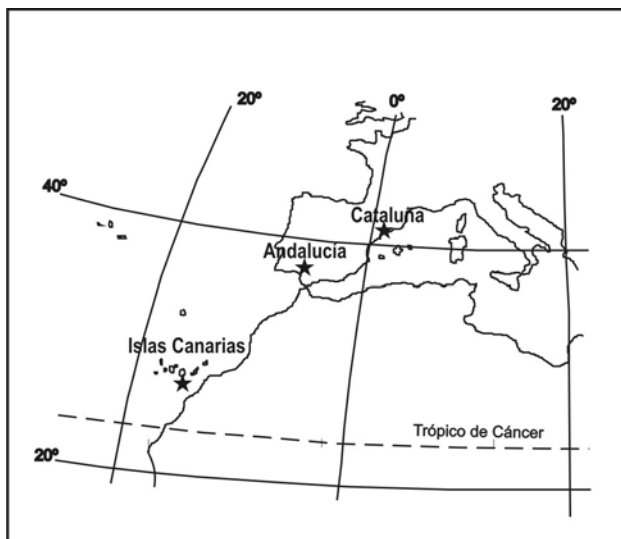


Figura 1. Situación geográfica de las tres áreas de estudio seleccionadas para la reutilización de las aguas regeneradas

contra la intrusión marina, para regadío de campos de golf en el mantenimiento de filtros verdes.

Barrera hidráulica contra la intrusión salina. Delta del Llobregat (Barcelona)

El delta del río Llobregat, formación sedimentaria de 97 km² de extensión situada en las proximidades de Barcelona (Fig. 1) constituye uno de los mejores ejemplos hidrogeológicos estudiados desde los años 60 del que existen innumerables publicaciones al respecto (Custodio, 1981; Candela et al 1988; Iribar et al., 1997; Abarca et al., 2006;). El delta, desarrollado al pie de la Cordillera Litoral Catalana, está formado por materiales cuaternarios de naturaleza detrítica depositados sobre materiales de edad pliocena, a excepción de las zonas de borde donde descansa sobre materiales más antiguos.

A nivel hidrogeológico, la formación deltaica está caracterizada por la presencia de tres acuíferos: el valle Bajo, el acuífero superficial y el acuífero profundo. El primero de estos se extiende por el actual valle aluvial del río hasta el estrechamiento del valle, donde se divide en dos acuíferos separados por una cuña de limos grises de 40 m de potencia. La cuña de limos confina la formación acuífera profunda, salvo en las zona de borde donde desaparece y los dos acuíferos pasan a estar hidráulicamente conectados por unas arenas finas. El acuífero confinado, de 6m de espesor medio, está constituido por materiales cuaternarios detríticos (arenas finas y gravas) y se extiende a lo largo de casi toda la superficie deltaica, prolongándose hacia el mar por debajo de la cuña de limos (Fig. 2). El acuífero superior, inicialmente surgente, no está sometido a explotación dada la elevada contaminación de sus aguas. El acuífero inferior ha constituido una fuente importante de abastecimiento para las industrias implantadas en el zona

y ha estado sometido a una gran explotación, que ha conducido a un descenso piezométrico generalizado desde los años 70 y a las presencia de intrusión marina en diversos sectores. Los valores de contenido de cloruros en algunos de los pozos muestreados llegaron alcanzar valores de hasta 20.000 mg/L.

A lo largo de los años se han realizado diversos estudios encaminados al estudio y posible control de la cuña de intrusión marina en el acuífero profundo, aunque no es objetivo de esta publicación realizar

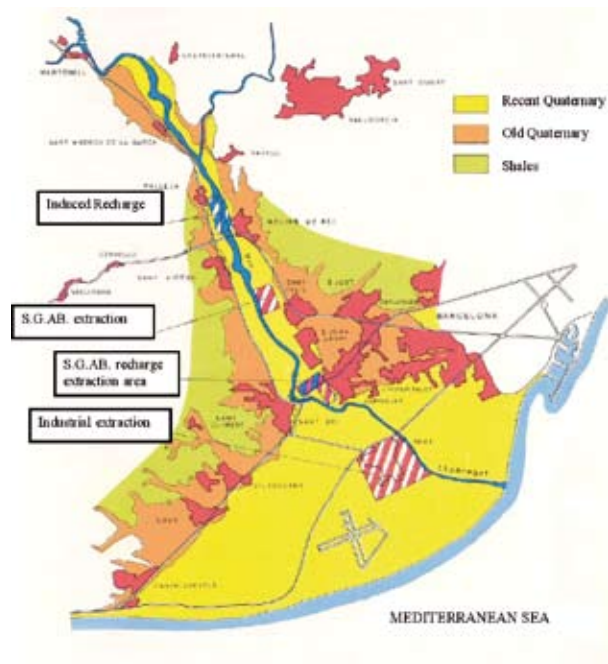


Figura 2. El Delta del Llobregat (Barcelona). A) Situación geográfica y B) perfil longitudinal donde se observa la presencia de los dos acuíferos separados por la cuña de limos (marrón).

una extensa revisión. Entre las propuestas cabe destacar la construcción de una barrera hidráulica positiva de inyección, similar a la que existe actualmente en funcionamiento en el Orange County Water District (California), mediante agua regenerada procedente de la planta de tratamiento Depurbaix (Cazurra, 2008).

La primera fase de la barrera, objeto de este artículo, consta de 4 pozos de inyección aunque el P4 no está operativo actualmente, (Fig. 3) de 70 m de profundidad, separados 300 m entre si y totalmente penetrantes en el acuífero inferior. Se sitúan paralelos a la línea de costa a una distancia de 1500 m. Los pozos se perforaron en 2006, presentan un diámetro de 610 mm y presentan 6 m de rejilla perforada a lo largo del nivel acuífero. Según resultados de los ensayos hidráulicos efectuados después de la perforación, los valores de transmisividad oscilan entre 700 y 2000 m²/día (P1 y P3 respectivamente) y 100-200 m²/ día (P2 y P4) (Ortuño et al. 2008; Teijon et al., 2008).

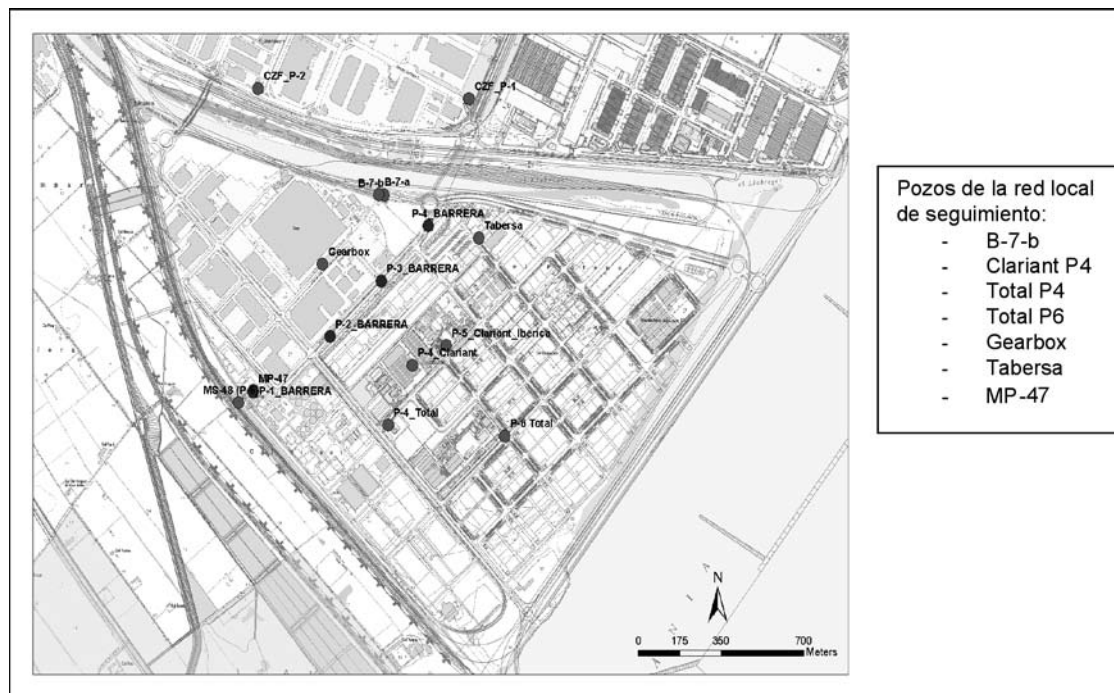


Figura 3. Situación de los pozos de inyección y muestreo correspondientes al estudio de la barrera hidráulica del Delta del Llobregat

En marzo de 2007 se inició la inyección de 2.500 m³/día de agua regenerada y el total de agua inyectada a finales del mismo año se estima en 244.000 m³. El agua inyectada está constituida por agua residual depurada en la EDAR mediante tratamiento terciario, y posteriormente sometida a ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Para una mayor descripción de los trabajos realizados se remite al lector a los artículos de Ortuño et al., (2008) y Cazorra (2008).

Como complemento al proyecto global llevado a cabo por la Agencia Catalana del Agua-ACA, en este estudio se ha controlado la presencia de 170 compuestos emergentes, prioritarios y metales pesados considerados de interés en muestras de agua procedentes de la depuradora, aguas regeneradas para inyección y pozos del acuífero (Tabla 2).

Los contaminantes emergentes (Daughton, 2001) constituyen un grupo de compuestos químicos de origen muy diverso caracterizados por su elevada producción y consumo, lo que comporta su continua presencia en el medio ambiente, por lo que no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos. Entre ellos se incluyen fármacos (antibióticos, analgésicos, etc.), productos para diagnóstico, esteroides y hormonas, antisépticos, productos para el cuidado personal (protectores solares, fragancias, etc.), aditivos de gasolina, etc. Aunque en su mayoría son compuestos orgánicos, se diferencian de los agroquímicos por presentar múltiples grupos funcionales. Este hecho añaden complejidad a su transporte y degradación en el medio ambiente, y a las técnicas analíticas necesarias para su monitoreo. En general estos compuestos no son ni acumulativos ni volátiles, aunque los perfumes son tóxicos, bioacu-

mulativos, persistentes y volátiles. Los efectos que pueden llegar a producir en el hombre y en la biota son desconocidos y al ser introducidos de una forma continua en el medio se convierten en contaminantes persistentes, incluso si su periodo de degradación es corto. Su origen en el medio ambiente es diverso (Daughton, 2001). El mayor porcentaje procede de los fármacos excretados a través de la orina y heces y que se incorporan al agua de las redes de saneamiento. En otras ocasiones, su presencia se origina a partir de lixiviado de vertederos, escorrentía en zonas con animales estabulados, descarga directa de aguas negras debido a tormentas e incluso a partir de la producción de proteínas por plantas modificadas genéticamente (conocido como biofarming).

La necesidad de un control exhaustivo de la calidad del agua a inyectar es prioritaria dado que no todos los contaminantes son eliminados en el tratamiento terciario (Ternes et al., 2002). El gran interés existente sobre los contaminantes emergentes desconocidos o no reconocidos como tales en el medio acuático (Sedlak et al., 2000), reside en el desconocimiento de sus efectos sobre el medio ambiente y la salud humana. Por otro lado, se debe destacar la legislación existente sobre presencia de 'sustancias prioritarias de necesario control', en el apartado 5 del artículo 16 de la Directiva 2000/60/CE (anexo X). A todo ello se debe añadir la aprobación por el Gobierno de España del Real Decreto 1620/2007, comentado anteriormente.

Las campañas de muestreo y medida de niveles se realizan en pozos de la red local (situados en un radio inferior a 1 km de los pozos de inyección) y de la red regional (situados a una distancia de hasta 2,5 km, sin muestrear) en coordinación con el ACA y la

Tabla 2. Relación de los compuestos emergentes analizados en los puntos de la red local, depósito, efluente e influente (tratamiento terciario) en el Delta del Llobregat

Fármacos	N-acetyl-4-amino-antipirine (4-AAA)	Hexachlorobenzene
4-amino-antipirine (4-AA)	Naproxen	Pentachlorobenzene
4-dimethylaminoantipirine (4-DAA)	N-formyl-4-amino-antipirine (4-FAA)	Alfa-hexachlorocyclohexane
4MAA	Nicotine	Beta-hexachlorocyclohexane
Acetaminophen	Ofloxacin	Gamma-hexachlorocyclohexane (lindane)
Antipyrine	Omeprazole	Delta-hexachlorohexane
Atenolol	Paraxanthine	Alachlor
Benzafibrate	Paroxethine	Tetra-brominated diphenyl ether
Biphenylol	Propranolol hydrochloride	Penta-brominated diphenyl ether 2
Caffeine	Ranitidine	Penta-brominated diphenyl ether 3
Carbamazepine	Salbutamol	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Carb,Epoxide	Sotalol	Acenafteno
Cefotaxime	Sulfamethoxazole	Acenaftileno
Chlorophene	Terbutaline	Antraceno
Ciprofloxacin	Triclosan	Benzo (b) fluoranteno
Clofibric acid	Trimethoprim	Benzo (a) antraceno
Codeine	Productos de higiene personal	Benzo (a) fluoranthene
Diatrizoate	3-(4-methylbenzylidene) camphor	Benzo (a) pireno
Diazepan	Benzophenone-3	Benzo (k) fluoranteno
Diclofenac	Celestolide	Chrysene
Erythromycin	Ethylhexyl methoxycinnamate	Fluoranteno
Fenofibrate	Galaxolide	Fluoreno
Fenofibric Acid	Octocrylene	Naftaleno
Fenoprofen	Octyl-triazone	Fenantreno
Fluoxethine	Phantolide	Pireno
Furosemide	Tonalide	Otros contaminantes prioritarios
Gemfibrozil	Traseolide	2,3,7,8-tetrachloro-dibenzo-p-dioxin
Hydrochlorothiazide	Metales	2,7/2,8-dichloro-dibenzo-p-dioxin
Ibuprofen	Ni	Alpha-Endosulfan
Indomethacine	Cd	Atrazine
Ketoprofen	Hg	Beta-endosulfan
Ketorolac	Pb	Chlorfenvinphos
Mefenamic Acid	Contaminantes prioritarios volátiles	Chlorpyriphos-Methyl
Mepivacaine	1,2,3-trichlorobenzene	Diuron
Methylprednisolone 6-alpha sodium succinate (Urbason)	1,2,4-trichlorobenzene	Endosulfan sulphate
Metoprolol	1,3,5-trichlorobenzene	Isoproturon
Metronidazole	Hexachloro 1,3-butadiene	Simazine

* Para facilitar la consulta de los compuestos se ha optado por conservar la terminología anglosajona

Comunitat d'Usuaris del Delta del Llobregat (CUA-DLL). Los muestreos son bimestrales para la red local y las medidas in situ de T, CE, pH y Eh se realizan de forma quincenal. Además se incluye la toma de muestras integradas de influente y efluente en trata-

miento terciario (Depurbaix) y del depósito de agua para inyección.

Los parámetros controlados en los diversos muestreos (Tabla 2) incluyen: elementos mayoritarios, contaminantes emergentes y sustancias prioritarias

(2008/105/EC), análisis microbiológicos y metales pesados. Los compuestos emergentes seleccionados son fármacos, productos para la higiene personal, metales, contaminantes volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros contaminantes prioritarios. Los análisis se realizaron en los laboratorios químicos de las universidades de Jaén y Almería.

Los primeros resultados obtenidos apuntan a que en las muestras del efluente de la depuradora no todos los compuestos detectados en el influente son completamente eliminados por el tratamiento terciario, y algunos de ellos presentan concentración superior de $0,1\mu\text{g/L}$ (Teijón *et al.*, 2008). Sin embargo, una vez sometidas las muestras a ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta la mayoría son eliminados. Solo 11 compuestos se detectan en concentración superior a $0,1\mu\text{g/L}$, aunque siempre en concentración inferior al del efluente. Los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento final al que se somete al agua procedente del terciario produce un agua regenerada de gran calidad apta para su inyección en la barrera hidráulica.

Por lo que respecta a los resultados de las aguas subterráneas, procedentes del muestreo realizado en los pozos de la red local en 2007 y 2008 se observa la presencia de compuestos emergentes en el acuífero en la fase previa a la inyección. Se han detectado un total de 26 compuestos de los 170 analizados. De ellos 21 son fármacos, 4 productos para la higiene personal y un contaminante prioritario. La Cafeína, Gemfibrozil, Hydrochlorotiazine e Iopromide aparecen en concentración superior a $0,5\mu\text{g/L}$. La cafeína es un compuesto alcaloide presente en numerosas bebidas de consumo habitual; el Gemfibrozil, sustancia utilizada para disminuir los niveles de triglicéridos en sangre, el Hydrochlorothiazide es un diurético y el Iopromide es un medio de contraste radiológico. De todos ellos, el Iopromide no se ha de-

tectado en el agua regenerada a inyectar en ningún muestreo, por ello se deduce que su presencia está asociada a la recarga natural del acuífero.

Riego campo de golf en Canarias

Dada la escasez de recursos hídricos existente en Gran Canaria (Islas Canarias), la reutilización de aguas depuradas para riego es una práctica utilizada desde finales de los años 60. En la actualidad, supone el 8% de los recursos hídricos en la isla y se han implementado tratamientos terciarios con desalinización por ósmosis inversa así como una importante infraestructura para la distribución del agua regenerada por la isla (Moreno y Guerra, 2004).

La reutilización de aguas regeneradas se centra en el Campo de Golf de Bandama situado al NE de la isla, (Fig. 4) cuyo objetivo es el estudio integrado a medio-largo plazo de los procesos que sufre el agua aplicada en el suelo y en la zona no saturada desde que se infiltra hasta su llegada al acuífero infrayacente. Está situado en una zona con una pluviometría media de 300 mm y la temperatura media es de 19°C (con 22°C en verano y 16°C en invierno). La precipitación durante el invierno 2008/09 ha sido especialmente lluviosa, alcanzando los 440 mm.

El campo de golf tiene una superficie de 14,5 ha. Desde 1976 ha sido regado por aspersión con agua depurada sometida a diversos tratamientos para mejorar su calidad y a partir del año 2002 se aplican métodos de desalación para reducir su salinidad. Las frecuencias de riego, determinadas por el green keeper, varían de invierno a verano, donde las dosis alcanzan máximas de 7 mm/día. La especie regada es el Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*), una gramínea C4 muy bien adaptada a los ambientes cálidos y suelos salinos

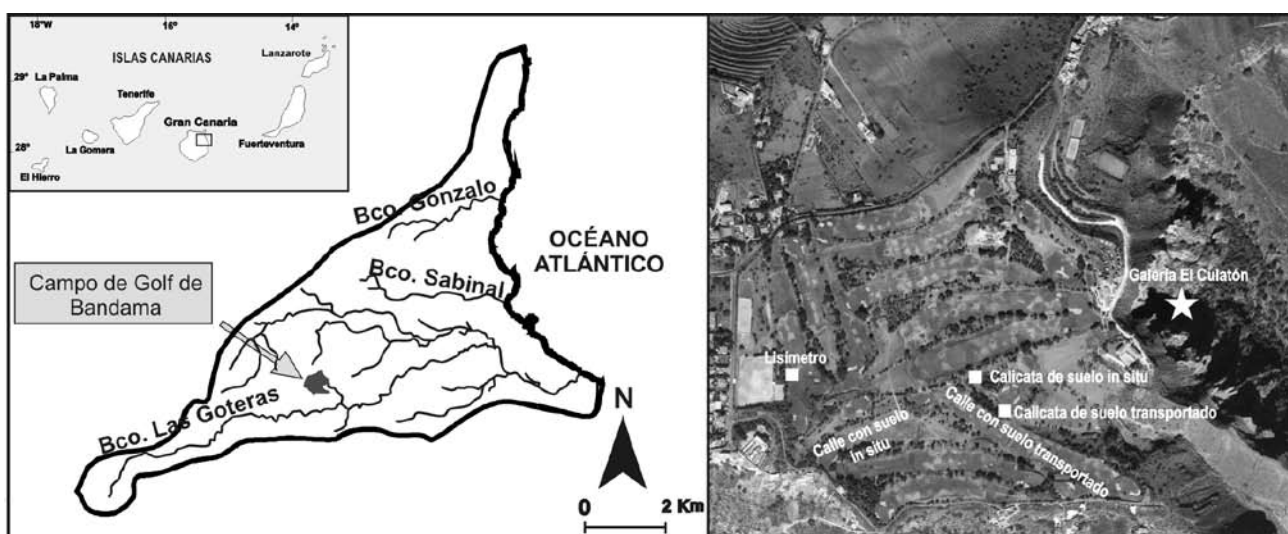


Figura 4. Localización del área de estudio en la isla de Gran Canaria. A) zona N4 de la Planificación Hidrológica de la Isla. B) situación del lisímetro y de la galería de agua muestreados

Los materiales que afloran en la zona (y constituyen la caldera y el cono volcánico de Bandama) son lavas y piroclastos basálticos de 2000 años de antigüedad y, por tanto, muy poco alterados. Estos materiales se sitúan sobre materiales basálticos y fonolíticos más antiguos (hasta 13 Ma) entre los que se intercalan conglomerados aluviales, que afloran en el interior de la Caldera.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la isla se considera un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. El acuífero infrayacente al campo de golf está formado fundamentalmente por materiales volcánicos situados en las medianías de la isla y el flujo del agua subterránea se produce de OSO a ENE, según se puede deducir de la piezometría realizada en 2009 a partir del inventario de puntos de agua de la zona (Fig. 5). En el área del campo de golf, el nivel piezométrico se encuentra a unos 250 m de profundidad. La parte superficial de esta zona está constituida por un suelo de poco espesor (0,5-1 m), mientras que en el resto de la zona no saturada, el agua debe circular preferentemente por fracturas, aunque dependiendo de la naturaleza de los materiales, cierta fracción puede fluir por porosidad.

La caracterización del perfil del suelo se ha realizado mediante la toma de muestras inalteradas. Para el muestreo del lixiviado a través del suelo se ha instalado *in situ* un lisímetro a 60 cm de profundidad. En el escarpe Oeste de la Caldera, a unos 50 m por debajo del campo de golf, se muestreó una galería de agua (galería El Culatón) cuyas muestras se consideraron representativas del agua que circula por la zona no saturada desde el campo de golf hasta el acuífero.

Actualmente se realiza el muestreo periódico del agua de riego, agua del lisímetro, agua de la galería y agua de pozos seleccionados. Las determinaciones analíticas incluyen elementos mayoritarios (pH, Conductividad eléctrica, Residuo Seco, sodio, potasio, Calcio, Magnesio, Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Nitratos, Amonio, Fósforo, Boro, Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc) compuestos emergentes seleccionados, y metales pesados. Los compuestos emergentes analizados incluyen nicotina, atenolol, metamizol, paraxantina, ibuprofeno, cafeína, fluoxetina y permetrina. Esta previsto aumentar la base de datos de compuestos en los próximos muestreos.

La caracterización edafológica del campo de golf ha permitido identificar dos tipos de suelo: un suelo *in situ*, de naturaleza franco-arcillo-arenoso, y un suelo transportado de cotas superiores de la misma vertiente de la isla, de naturaleza arcillo-limosa. Los primeros resultados obtenidos de los análisis de suelo realizados en dos calles representativas de sendos suelos permiten concluir que ambos presentan una alta variabilidad incluso considerando separadamente cada zona homogénea respecto al manejo del agua (calle o rough). La evolución temporal de las muestras de suelo tomadas en dos campañas llevadas a cabo en 2008 y 2009 apunta a que el invierno 2008-09 (lluvioso) ha dado lugar a un lavado del mismo, con el probable efecto superpuesto, para los elementos poco móviles, de una mayor actividad biológica (caso del fósforo) (Palacios *et al.*, 2009). Asimismo, se ha observado un diferente comportamiento para ambos tipos de suelos: mientras el suelo *in situ* presenta un lavado mayor, los contenidos en

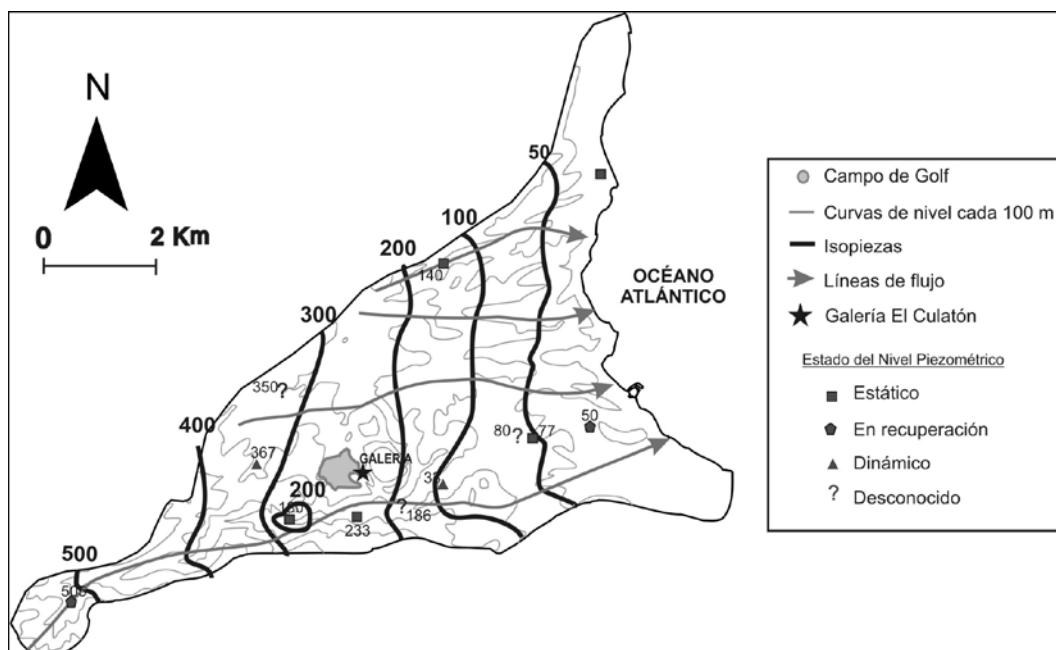


Figura 5. Piezometría de la zona N4 definida en la planificación hidrológica de Gran Canaria para 2009

sales se mantienen más estables para el suelo transportado (más arcilloso).

De los primeros resultados lisimétricos, puede inferirse que se produce un incremento en los iones de las aguas recogidas en el mismo respecto al agua de riego, causado por las elevadas fracciones de lavado que se usan en el campo de golf y originando un lixiviado de sales del suelo. Los iones que presentan incremento son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , NO_3^- y B comparativamente con el aumento en Cl^- (atribuible a la concentración por evapotranspiración).

La comparación de los resultados químicos obtenidos para las aguas subterráneas de la zona, con el agua de la galería permiten concluir que esta galería presenta un agua químicamente diferente a los pozos de los alrededores, variable en el tiempo y que debe drenar un acuífero colgado al que llegan los retornos de riego del campo de golf (Cabrera *et al.*, 2009). Por lo que respecta a la presencia de contaminantes emergentes analizados, nicotina y cafeína están presentes en casi todas las muestras, La presencia del resto de compuestos es variable (siempre en cantidades de ng/L).

Filtros verdes. Carrión de los Céspedes (Sevilla)

En Carrión de los Céspedes (Fig. 1), el gobierno regional de Andalucía, a través de la Consejería de Medio Ambiente, dispone de una planta experimental de 35.000 m² donde se investigan técnicas convencionales y no convencionales de depuración de agua. Desde 2005, en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) está en funcionamiento un Filtro Verde con una superficie de 2.000 m², subdividido en dos parcelas (Fig.6). En la primera se cultiva una plantación de chopos (clon I-214 del *Populus euroamericana*) y de eucaliptos (*Eucaliptos camaldulensis*) en la otra. En estos sistemas, se obtienen rendimientos medios entre el 85-95% para los sólidos en suspensión, del 85-95% para la DBO₅, el 80-90% para la DQO, entre el 50-90% para el nitrógeno, el 40-90% para el fósforo y del 99,9% para los coliformes fecales (Martín-García *et al.*, 2006).

En el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, se ha diseñado un nuevo Filtro Verde con el objetivo de regenerar y reutilizar aguas depuradas, obtención de biomasa y recarga de acuíferos mediante infiltración a través del terreno. Para ello, se han acondicionado 4 nuevas parcelas de cultivo (2 regadas con aguas depuradas y 2 con agua de pozo, como parcelas de referencia), en las que se cultivarán *Jatropha curcas L.* y *Paulownia tomentosa*. La primera es una planta oleaginosa muy utilizada para la producción de biodiesel. La segunda es una especie arbórea de crecimiento rápido, con potencial utilización en plantas energéticas y muy resistente a la polución. La calidad del agua utilizada en la reutilización es la fijada en los puntos 5.1 (a) y 5.3 (a) del anexo 1.a del Real Decreto 1620/2007 (Tabla 1).



Figura 6. Esquema general de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes-PECC (Sevilla) y localización de los piezómetros instalados y de las secciones geofísicas realizadas.

Para evaluar la variabilidad espacial de los materiales geológicos en la PECC, se aplicaron técnicas geofísicas basadas en tomografía eléctrica (Lillo *et al.*, 2009). Se realizaron varios perfiles transversales (Fig. 6).

En la parcela experimental, se han instalado 9 nidos de piezómetros con profundidades de 2, 6 y 10 m (Fig. 7). La perforación se realizó a rotación con un diámetro de 145 mm, entubándose con tubería ciega y ranurada de acero inoxidable de 65 mm. A partir de las muestras procedentes de los testigos continuos de la perforación se realizaron análisis texturales, fisicoquímicos y mineralógico y del contenido de humedad y densidad natural.

Tras la instalación y limpieza de los piezómetros, y antes de iniciar el riego y la recarga con aguas tratadas, se tomaron muestras de agua con el fin de obtener valores composicionales de base o referencia. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, TSS, TOC, TC, IC, DBO₅, DQO, turbidez, dureza, alcalinidad, F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , coliformes totales, huevos de helminto y compuestos emergentes. Los análisis convencionales se realizaron en los laboratorios de la Fundación iMdea agua y los análisis de compuestos prioritarios y emergentes en los laboratorios del grupo de la Universidad de Almería.

De los datos aportados por la testificación de los sondeos, la tomografía eléctrica y las observaciones locales, se identifican tres unidades litológicas diferentes (Fig. 8). La unidad superficial está compuesta de arenas finas a muy finas, de color marrón rojizo, con bajo contenido en agua (mayor resistividad) y contenidos en arcilla en torno al 30%. Tiene un espesor

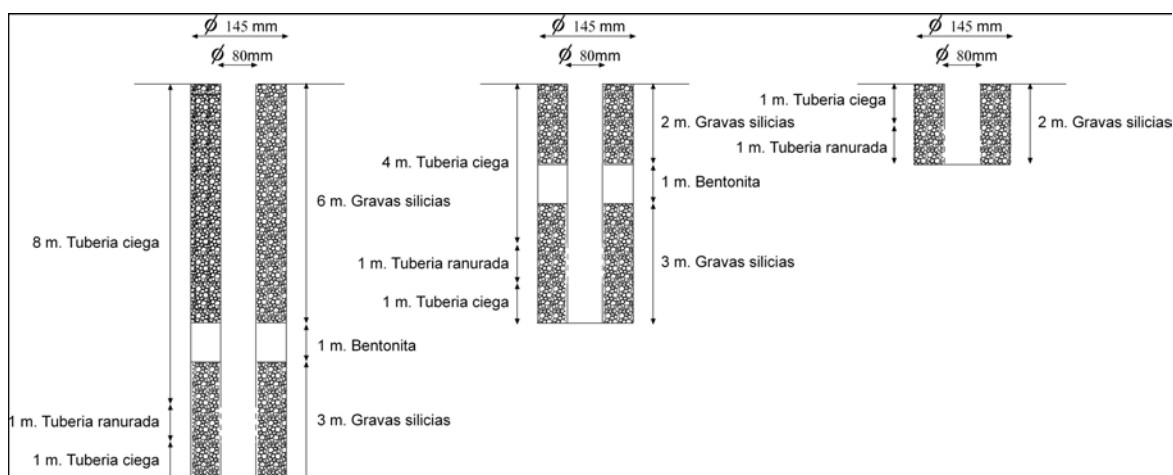


Figura 7. Esquema de nido de piezómetro en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes

variable de 0-2 m, y sobre ella se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica. Mineralógicamente, esta unidad está formada por calcita, cuarzo, halita, albita, anortita, illita y caolinita. La unidad principal está formada por limos arcillosos de color ocre a verde con abundantes nódulos y algunos niveles precipitación de carbonatos, con aspecto radicular, lo que sugiere origen paleoedáfico. Sobre esta unidad se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica y algunos pequeños nódulos carbonatados. Su espesor es superior a 10 m, ya que su base no se ha cortado en ningún sondeo y presenta una mineralogía formada por calcita, cuarzo, anortita, albita, illita, montmorillonita y caolinita, apareciendo también halita en los tramos verdosos del perfil de los sondeos. Por último una unidad subyacente, descrita regionalmente como unidad de las margas azules, formada por arcillas calcáreas de color gris azulado, prácticamente impermeables y que actúan como límite inferior de los acuíferos.

En la figura 9 se han representado en el diagrama de Piper los resultados de las muestras de agua de los piezómetros analizada. Las aguas están muy mineralizadas, con altos contenidos en cloruros y sodio, presentando los valores más bajos los piezómetros PE-16 y PE-21, con profundidades de 10 m y 2 m respectivamente. Así todas las aguas pueden clasificarse como cloruradas sódicas, excepto la PE-16 que es clorurada sódico-magnésica, la PE-20 clorurada sódico-cálcica y la PE-21 clorurada cálcico-sódica. Esta composición tiene su origen en los materiales que componen la zona, que presentan contenidos de halita en varios tramos. En cuanto a los parámetros indicadores de algún tipo de contaminación, como carbono orgánico, nitratos y amonio, están dentro de los rangos normales, sin presentar signos de contaminación.

Respecto a compuestos prioritarios y emergentes, en el PE-1, PE-10 y PE-19, se ha detectado nicotina (entre 0,059 y 0,206 $\mu\text{g/L}$), paraxantina (metabolito de la cafeína, entre 0,112 y 0,125 $\mu\text{g/L}$), cafeína (entre 0,068 y 0,403 $\mu\text{g/L}$) y cotinina (metabolito de la

nicotina, entre 0,014 y 0,052 $\mu\text{g/L}$). Aunque la presencia de estos compuestos de difícil degradación es típica de aguas residuales, dado que la parcela no ha estado sometida a riego con este tipo de aguas, su presencia debe estar asociada a flujos regionales.

CONCLUSIONES

En España la reutilización de aguas depuradas constituye una práctica cada vez más extendida. Su aplicación ha sido objeto de regulación jurídica mediante la publicación del R.D. 1620/2007, en cumplimiento de las directrices recogidas en la Directiva Marco del Agua (entre otras). En esta normativa se establece la necesidad de que el agua a reutilizar cumpla unas normas de calidad mínimas dependiente de su uso. Sin embargo, la sostenibilidad de esta práctica va a depender también de la afección que se produzca al medio (planta, suelo, acuífero).

Si bien de forma general se puede apuntar que la afección al medio hídrico depende en gran medida de los tratamientos aplicados para su depuración, la afección a los acuíferos varía notablemente dependiendo de factores climáticos, tipos de suelo, materiales y funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos. Se debe destacar que las condiciones del medio, el tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada y las características del flujo en el acuífero tienen una gran importancia sobre los procesos de atenuación y transporte de los compuestos químicos. Por ello, es necesario que previo a cualquier proyecto de reutilización se incluya la realización de estudios específicos de investigación o demostración en la zona de aplicación, que permitan valorar posibles futuros efectos no deseados (dilatados en el tiempo) de difícil solución.

En el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, la selección de las zonas de estudio y su detallada caracterización constituyen un ejemplo de buenas prácticas. En todos los casos se está prestando un especial interés a la posible contaminación a los

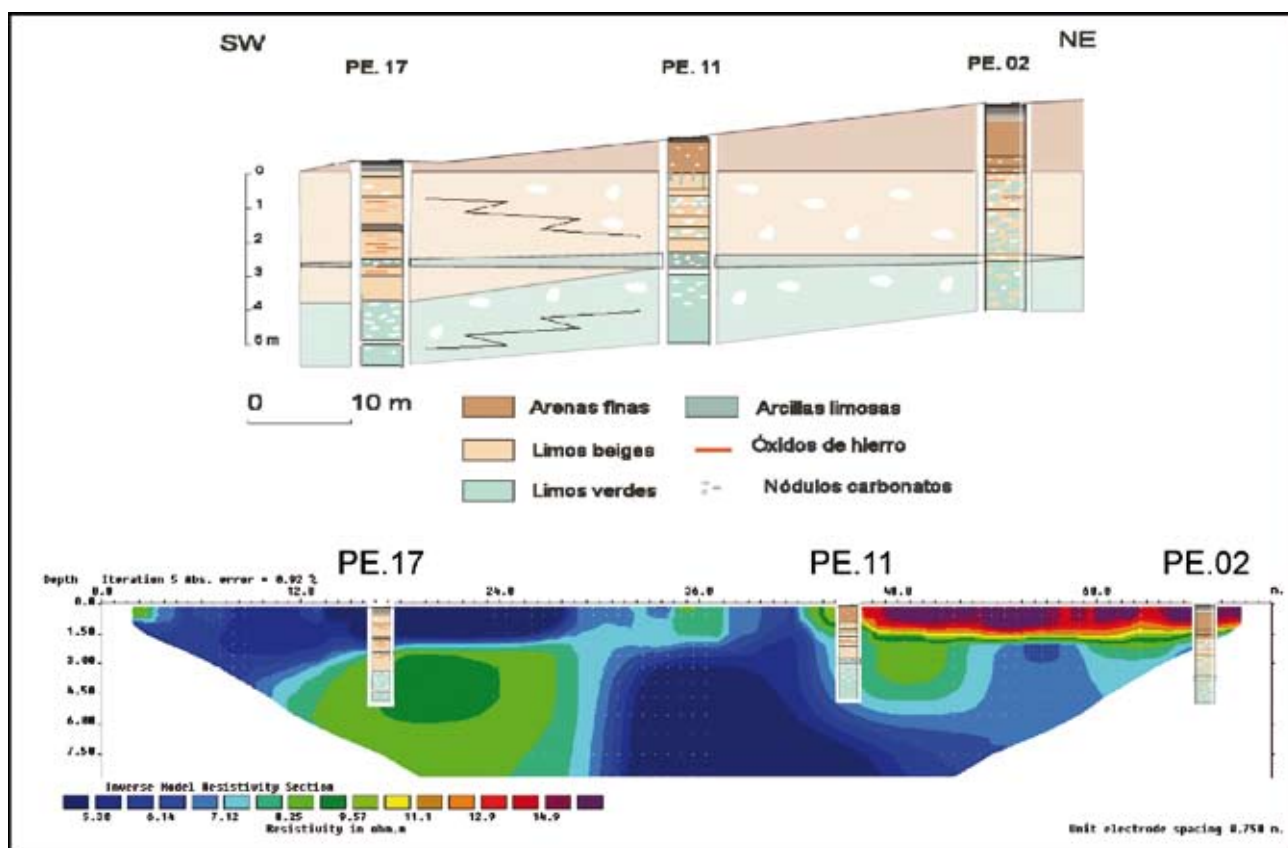


Figura 8. Unidades litológicas y perfil de resistividad obtenidos en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes

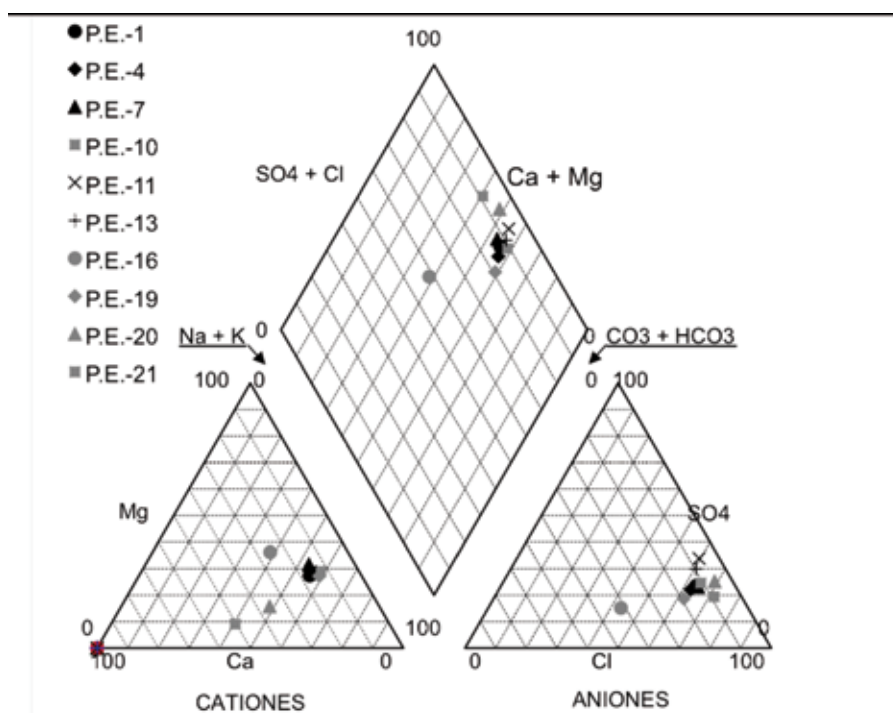


Figura 9. Diagrama de Piper de las muestras de agua analizadas en la parcela experimental

acuíferos por compuestos emergentes (fármacos, productos de perfumería, etc.). Se debe destacar que en los tres casos estudiados se detectó en el acuífero la presencia de compuestos emergentes cuya procedencia no parece estar asociada a las prácticas de reutilización aplicadas actualmente. El origen debe buscarse en la incorporación a la recarga natural de los acuíferos de aguas no tratadas, vertidas a cauces de ríos directamente conectados con las aguas subterráneas o lixiviados producidos en la red sanitaria que afecten directamente a los acuíferos subyacentes.

A lo largo del desarrollo de proyecto, la integración de los datos obtenidos permitirá identificar los aspectos hidrológicos de interés en las diversas aplicaciones, y en especial evaluar los procesos que tienen lugar en el suelo, la zona no saturada y el propio acuífero e identificando los posibles contaminantes que lleguen al mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se llevan a cabo en el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Asimismo se agradece al Real Club de Golf de Las Palmas su colaboración en la realización de los trabajos llevados a cabo en el Campo de Golf de Bandama, a la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) su colaboración en los trabajos realizados en la Planta de Carrión, a la Fundación Mapfre la financiación de algunos de los trabajos desarrollados en Carrión, a la Agencia Catalana del Agua por la información proporcionada y colaboración en el proyecto.

REFERENCIAS

Abarca, E., E. Vázquez-Suñé, J. Carrera, B. Capino, D. Gámez, & F. Battle. 2006. Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resources Research*, W09415, doi: 10.1029/2005 WR004524.

B.O.E. 288/1992: Real Decreto 1315/1992, de 30 de octubre por el que se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril. Pp. 40563-40565.

B.O.E. 294/2007: Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Pp. 50639-50661.

Candela, L., R. Olea & E. Custodio. 1988. Lognormal kriging for the assessment of reliability in groundwater quality control observation networks. *Journal of Hydrology*, 103: 67-84.

Candela, L., Fabregat, S., Josa, A., Suriol, J., Mas, J., & N. Vignes. 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain). *Science of Total Environment* 374: 26-35

Cabrera, M.C., M.P. Palacios, E. Estévez, T. Cruz, T., J.M. Hernández-Moreno y J.R. Fernández-Vera. 2009. La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias). *Boletín Geológico y Minero*, en prensa.

Cazurra, T. 2008. Water reuse of south Barcelona's wastewater reclamation plant. *Desalination*, 218: 43-51.

Custodio, E. 1981. Sea water encroachment in the Llobregat and Besos areas near Barcelona (Catalonia, Spain). Intruded and relict groundwater of marine origin. *Proceedings of 7th SWIM, Uppsala. Sweriges Geologiska Undersokning, Rappoter och Meddelanden, Uppsala*. 27:120-152.

Custodio, E. y M.C. Cabrera. 2008. Synthesis of the Canary Islands hydrogeology. *Hydrogeology of volcanic rocks, SIHD-2008, Djibouti*, 51-56.

Daughton, C.G. 2001. Pharmaceutical in the Environment: Overarching Issues and Overview. En: *Pharmaceuticals and personal Care Products in the Environment: Scientific and Regulatory Issues*, Daughton y Jones-Lepp (Eds). *Symposium Series 791; American Chemical Society, Washington D.C.* pp. 2-38. (www.epa.gov/esd/chemistry/pharma/book-summary.htm).

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas

Durham, B., A.N. Angelakis, T. Wintgens, C. Thoe-ye & L. Sala. 2005. Water recycling and reuse. *En eureau* countries. Trends And challenges. Technical Workshop: The integration of reclaimed water in water resource Management*. Lloret de Mar, Girona. España.

Gómez, M.J., A. Agüera, M.J. Bueno, M.M. Gómez, S. Herrera, I. Muñoz, & A.R. Fernández-Alba. 2009. Caracterización química de las aguas residuales. Metodología analítica y resultados. 4ª Reunión del Programa Consolider Tragua, Alicante, 17-19 de junio de 2009. URL.: http://www.consolider-tragua.com/posters_alicante.htm

Hochstrat R., T. Wintgens, T. Melin, P. Jeffrey. 2005. Wastewater reclamation and reuse in Europe - a model-based potential estimation. *Water Supply*, 5-1: 67-75.

Iríbar, V., J. Carrera, E. Custodio & A. Medina. 1997. Inverse modeling of seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer. *Journal of Hydrology*, 198: 226-244.

- Levine, A.D. & T. Asano. 2004. Recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science And Technology*, 38(11):201A-208A.
- Lillo, F.J., D. Gómez, T. Martín, F. Carreño, I. De Bustamante & P.L. López. 2009. Using Electrical Resistivity Tomography to evaluate the infiltration in Land Application Systems. A case study in the Carrión de Los Céspedes. *Desalination and Water Treatment*, 4: 111–115.
- Martín García, I.; J.R. Betancort Rodríguez, J.J. Salas Rodríguez, B. Peñate Suárez, J.R. Pidre Bocado & N. Sardón Martín. 2006. Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Mejora de la calidad de los efluentes. Edit. Junta de Andalucía. 126pp. Sevilla
- Moreno, E. & J.L. Guerra. 2004. La gestión del agua en Gran Canaria, una política hidráulica en condiciones extremas. II Simposium sobre sostenibilidad: recursos hídricos. Zaragoza.
- Palacios, M.P., E. Estévez, M.C. Cabrera, J.M. Hernández-Moreno, V. González-Narango, T. Cruz & J.R. Fernández. 2009. Resultados preliminares de los efectos de la utilización de agua depurada para riego en el campo de golf de Bandama (Gran Canaria). En O.Silva et al. (eds.. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, Vol. IX, en prensa).
- Pettygrove, G. S. & T. Asano. 1984. Irrigation with reclaimed municipal wastewater. A guidance manual, California State Water Res.Control Board. Davis. California. 540 pp.
- Sedlak D.L., J.L. Gray & K.E. Pinkston. 2000. Understanding microcontaminants in recycled water. *Environmental Science and Technology*, 34(23): 509A-5515A
- Ortuño Gobern, F; J.M. Niñerola Pla, G. Teijón Ávila & L. Candela Lledó. 2008. Desarrollo de la primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero principal del delta del Llobregat. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*; Vol. XXVIII, 503-509
- Teijón Ávila, G., K. Tamoh, F. Ortuño Gobern, J.M. Niñerola Pla & L. Candela Lledó. 2008. Resultados preliminares de los muestreos realizados en la barrera hidráulica del Llobregat. Primera fase *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*; Vol. XXVIII, 503-509. 510-515.
- Ternes T., M. Meisenheimer, D. Mcdowell, F. Sacher, H. Brauch, B. Haist-Gulde, G. Preuss, U. Wilme & N. Zulei-Seibert. 2002. Removal of pharmaceuticals during drinking water treatment. *Environmental Science and Technology* ,36:3855-3863.

**EL ROL DE LOS HUMEDALES EN EL CONTEXTO EVOLUTIVO
DE LA RED HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA PROVINCIA
DE CORRIENTES, REPÚBLICA ARGENTINA**

**THE ROLE OF WETLANDS WITHIN THE CONTEXT
OF THE SUPERFICIAL DRAINAGE PATTERN EVOLUTION
IN THE PROVINCE OF CORRIENTES, ARGENTINA**

Giraut, Miguel Ángel¹; Rujana, Mario² y Valladares, Andrea Isabel¹

Resumen

A partir de la integración e interrelación de variables del medio físico natural, se realiza la identificación de unidades de paisaje relacionadas primariamente con los diseños hídricos superficiales reconocidos en la provincia de Corrientes, ubicada en el noreste del territorio argentino. El trabajo refiere a la delimitación y descripción de áreas de comportamiento hídrico superficial homogéneo a escala provincial, implementadas a partir del procesamiento digital de imágenes de satélite y del análisis de información de base referida a topografía, geología, suelos y vegetación, integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG). La utilización de la variable topográfica para la delimitación de unidades hídricas superficiales resultó insuficiente debido a la variedad de formas de escurrimiento y/o almacenamiento hídrico, sumada a la existencia y diversidad de humedales, desarrollados sobre extensas áreas carentes o con escasa expresión de relieve. Las unidades hídricas superficiales reconocidas se agrupan y asignan de manera jerárquica a las entidades hídricas utilizadas: Sistema, Región o Cuenca y unidades menores para su descripción y relación con la existencia y tipo de humedal en el contexto geográfico. De la sistematización jerárquica realizada se identifican dos sectores identificados como occidental y oriental con una relación de ocupación territorial del 53 % y 47 %, respectivamente. Cada sector presenta patrones de drenaje hídrico superficial distintivos y tipos de humedales asociados, criterios que han sido utilizados para la subdivisión. Al primero le corresponde un escurrimiento de tipo difuso, en manto, no encauzado, desarrollado sobre áreas de exiguo relieve que, ante situaciones extremas, puede comportarse como una única unidad. En el mismo se reconocen humedales del tipo depresión, franja lacustre, planicie y en menor grado fluvial. Sobre el segundo, existe un predominio de escurrimiento lineal con un patrón dendrítico y diferenciación de cuencas, poniendo de manifiesto la existencia de un mayor relieve asociado a afloramientos o cercanía a la superficie de un basamento basáltico, especialmente en el centro sur provincial. En este sector se destaca la presencia de humedales del tipo fluvial. El presente análisis se ha desarrollado en el marco del proyecto referido a la Actualización de la Cartografía Hídrica Superficial Digital de la República Argentina a escala 1:250.000, llevado a cabo en forma conjunta por la Subsecretaría de Recursos Hídricos y el Instituto Nacional del Agua, y del convenio celebrado ad hoc con el Instituto Correntino del Agua y del Ambiente.

Palabras clave: Cartografía, Escurrimiento hídrico superficial, Humedales

Abstract

Physical environmental variables were integrated and interrelated to identify landscape units associated to surface water patterns, developed in the province of Corrientes, located in the northeast of the Argentine territory. This paper refers to the identification and description of areas with homogeneous drainage patterns, derived from digital processing of satellite images and analysis of information related to topography, geology, soils and vegetation, integrated in a Geographic Information System (GIS). Due to the variety of drainage patterns and storage forms, plus to the existence and diversity of wetlands developed on large flat areas, the topographic variable was insufficient to identify surface watersheds. The recognized surficial basins were grouped hierarchically and assigned to the categories System, Region, Basin or smaller units for their description, and were related to the type of wetland within the geographical context. The drainage patterns and distinctive types of associated wetlands were used to distinguish two sectors identified as Western and Eastern, with a territorial coverage of 53% and 47%, respectively. On the first, we recognized a diffuse, not linear and not channeled drainage, developed over flat areas that can, occasionally, behave as a single unit. Different wetland forms, such as depression, wet flat, lacustrine, and a modest development of riverine are located on this region. On the second there is a predominance of linear dendritic flow pattern with the differentiation of river basins, showing some correspondence between the drainage patterns with basaltic outcrops or its proximity to the surface, especially in the central south part of the province. This analysis has been developed within the framework of the project Update of the Surface Water Cartography

¹ Sistema Nacional de Información Hídrica. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Argentina. mgiraut@minplan.gov.ar; avallad@mecon.gov.ar

² Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA). Corrientes, Argentina. icaa.corrientes@gmail.com.

of Argentina at 1:250,000 scale, carried out jointly by the Subsecretaría de Recursos Hídricos, the Instituto Nacional del Agua and an ad hoc agreement signed with the Instituto Correntino del Agua y del Ambiente.

Keywords: Mapping, Drainage pattern, Wetlands

INTRODUCCIÓN

Con una superficie de 88.924,31 Km² la provincia de Corrientes se ubica en el noreste de la República Argentina, comprendida entre los paralelos 27° 15' S y 30° 43' S y los meridianos 55°37'O y 59°41'O (Benedetti, 2000). Boreada prácticamente en su totalidad por agua, sus límites administrativos están representados por la traza del río Paraná al norte y oeste, del río Uruguay al este, de los arroyos Itaembé y Chirimbay, al noreste; y de los ríos Guayquiraró, Mocoretá,

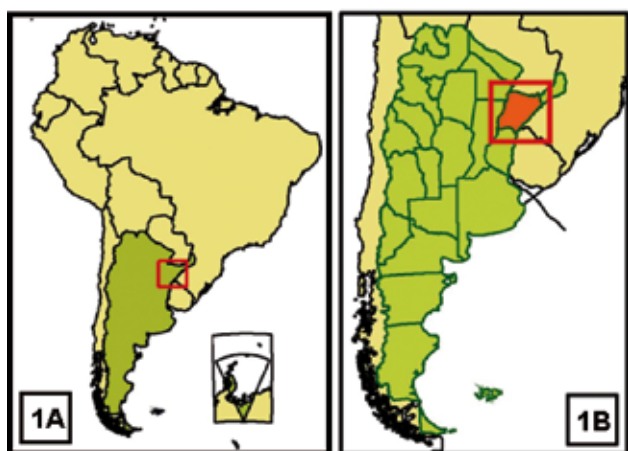


Figura 1. A: República Argentina y B: Provincia de Corrientes

y sus afluentes, los arroyos Basualdo y Las Tunas, al sur (Figura 1).

De acuerdo a la clasificación de Thornthwaite, al territorio correntino le corresponde un índice hídrico del tipo húmedo a subhúmedo-húmedo. Los rangos de precipitación decrecen de noreste a sudoeste registrándose medias anuales de 1600 a 1000 mm. La temperatura media anual oscila entre los 21,5° C y los 20° C (Daniele et al., 1994).

El escaso relieve, representado fundamentalmente por formas planas, desciende de este a oeste en forma escalonada. La terminación de la meseta misionera en el ángulo noreste (200 m) y un área localizada en el centro sur de la provincia, que funciona como divisoria hidrográfica de los aportes a los ríos Paraná y Uruguay (130 m), se corresponden con las mayores expresiones topográficas. En contraposición, se ubica en el sector central con límites en parte poco nítidos, un área sub-negativa con gran desarrollo de humedales, correspondiente a la región

del Iberá que abarca aproximadamente el 12 % del territorio provincial.

La disponibilidad de agua, sumado a las características primarias existentes en la geografía correntina (profundidad diferencial del basalto Serra Geral), ha posibilitado el desarrollo de una gran variedad de patrones de escurrimiento hídrico superficial, que han sido sistematizados para su descripción regional a partir de la cartografía elaborada.

El análisis se ha llevado a cabo, en el marco del proyecto referido a la *Actualización de la Cartografía Hídrica Superficial Digital de la República Argentina a escala 1:250.000* desarrollado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos, y el Instituto Nacional del Agua sumándose para el presente estudio el Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA).

METODOLOGÍA

La presente contribución trata de dos actividades primarias relacionadas con:

- Generación de la cartografía hídrica superficial de la provincia de Corrientes.
- Identificación, descripción y asignación jerárquica de las entidades hídricas en las categorías de: Sistema, Cuenca o Región y Unidades menores.

La generación de la cartografía hídrica superficial de la provincia de Corrientes se realizó a partir del procesamiento digital de 8 (ocho) escenas Landsat ETM+, del año 2002 provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Para su tratamiento se implementaron técnicas de procesamiento digital cuyo detalle se describe en Giraut et al., (2007). Las fechas de toma de imagen fueron seleccionadas a fin de lograr una continuidad radiométrica.

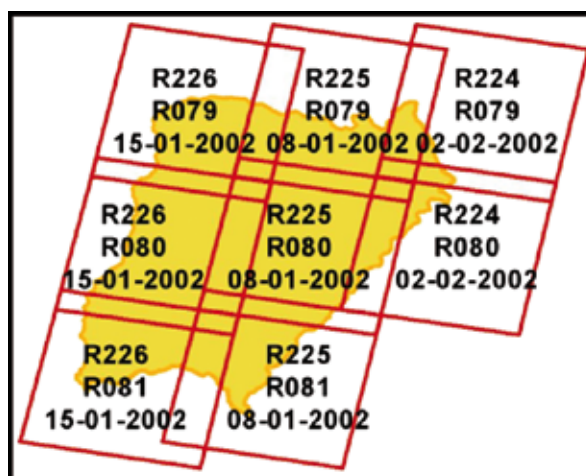


Figura 2. Localización y fecha de toma de las escenas satelitales



Figura 3: Mosaico Satelital de la provincia de Corrientes, con un buffer de 10 Km

trica (Figura 2). El trabajo fue realizado en gabinete con el asesoramiento local del Instituto Correntino del Agua y del Ambiente. Para el tratamiento de la información digital se utilizó el software ERDAS Imagine 8.5 y productos ESRI generándose el mosaico satelital de la Provincia de Corrientes (Figura 3).

Una serie importante de información documental y cartográfica, en formato digital y analógico, ha sido consultada para proceder al reconocimiento y delimitación de las unidades hídricas.

La información topográfica fue obtenida de la *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* y la geológica de la hoja Corrientes (SEGEMAR, 1995). Las descripciones de suelos y vegetación derivan de informes del INTA (1995) y la UNNE (1997), respectivamente.

RESULTADOS

La interpretación de la cartografía elaborada a partir del material satelital sumado al análisis de los aspectos de topografía, geología, suelo y vegetación permitió la identificación de unidades hídricas con patrones de escurrimiento hídrico superficial característico.

Si bien las áreas de aporte directo a los ríos Paraná (5.707,06 km²) y Uruguay (1.518,56 Km²) fueron identificadas, el análisis se centra principalmente en el interior de la provincia en el cual se reconocieron a escala regional 4 (cuatro) Sistemas, los que han sido denominados según su ubicación geográfica relativa como Noroccidental, Central, Oriental y Meridional (Figuras 4a y 4b y Cuadro 1).

No se ha considerado en la categorización propuesta a los ríos que bañan el litoral correntino y actúan como emisarios finales de los escurrimientos hídricos superficiales y subterráneos del interior del territorio provincial. El río Paraná, que fluye por el borde norte y oeste de la provincia, conforma el límite con la República de Paraguay, en tanto el río Uruguay lo hace con las repúblicas Federativa del Brasil y Oriental del Uruguay. Sobre el primero se emplaza

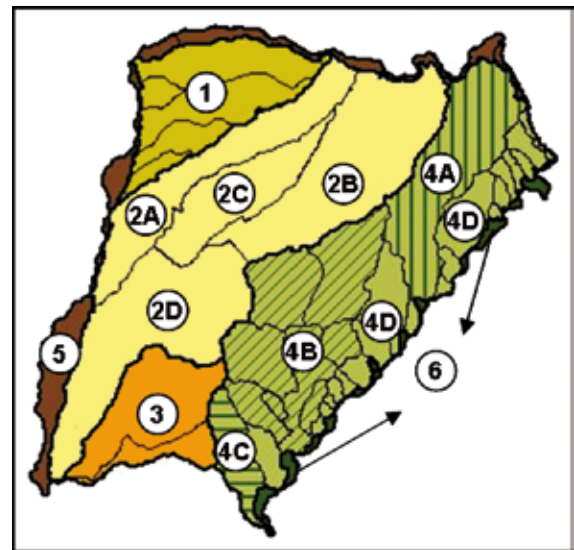
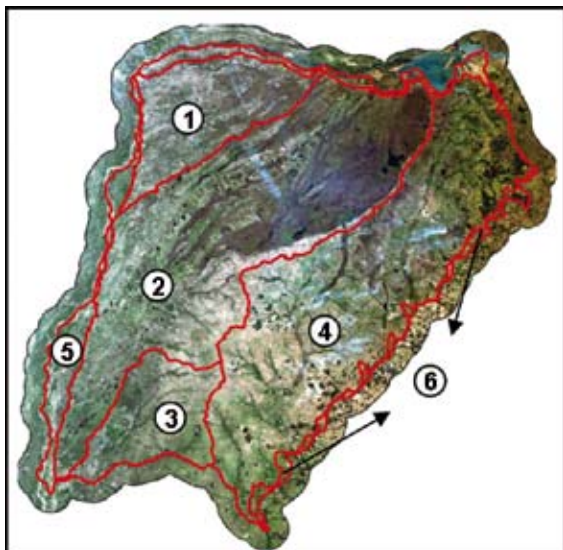


Figura 4a: Sistemas Hídricos superpuestos al mosaico satelital. Figura 4b: Sistemas Hídricos, Cuencas o Regiones Hídricas y entidades menores en la provincia de Corrientes: 1) Noroccidental, 2) Central, 2A Río Santa Lucía – 2B Esteros del Iberá – 2C Esteros Batel / Batelito – 2D Río Corriente, 3) Meridional, 4) Oriental, 4A Río Aguapey - 4B Río Miriñay - 4C Río Mocoretá - 4D Cuencas Varias, 5) aporte directo al río Paraná, 6) aporte directo al río Uruguay

la represa Yacyretá y sobre el segundo el Complejo Hidroeléctrico Salto Grande, cuya cola de embalse se sitúa al sudeste de la provincia.

La clasificación jerárquica utilizada considera las siguientes categorías:

- **Sistema Hídrico:** Un sistema hídrico reúne o agrupa un conjunto de cuencas y regiones hídricas interrelacionadas que drenan el área comprendida por el conjunto (Ferreiro, 1983). Para su denominación se ha adoptado la ubicación geográfica relativa en el ámbito provincial.
- **Cuenca Hídrica Superficial:** Territorio geográfico en el que las aguas que escurren superficialmente afluyen a un colector común y son drenadas por este. Topográficamente las líneas divisorias o de partición de las aguas superficiales constituyen el límite de las cuencas hídricas superficiales.
- **Región Hídrica Superficial:** Territorio geográfico caracterizado por un tipo de escurrimiento hídrico superficial homogéneo a través del cual es impracticable la delimitación de cuencas o subcuencas hídricas a la escala de trabajo encarado (Ferreiro, *op. cit.*).
- **Subcuenca:** unidades identificadas al interior de una cuenca hídrica superficial, en la que se cumple que las aguas que escurren superficialmente afluyen a un colector común y son drenadas por este.

Como unidad de síntesis para la descripción de la dinámica hídrica regional se utilizó la categoría sector (Figura 5). Esta responde al tipo de escurrimiento hídrico superficial predominante y sus límites no resultan del agrupamiento de categorías menores. En líneas generales, se concuerda con la descripción fisiográfica de Santa Cruz (1981), quien identifica dos unidades mayores, occidental y oriental separadas por una región de esteros y lagunas del Iberá.

Sistema Noroccidental

De aporte al río Paraná y de forma ligeramente triangular, limita al norte y al oeste con el área drenada por el río Paraná, en tanto que en dirección noreste-sudeste, es colindante con el Sistema Central. Su chato relieve es interrumpido por suaves y elongadas lomadas arenosas que no superan la decena de metros de altura y que en su tope poseen cuerpos lagunares de variada forma y dimensiones. La red hídrica posee escaso desarrollo y se desdibuja hacia las cabeceras dificultando el trazado de la divisoria topográfica. Es común la presencia de bañados, lagunas y esteros, que hacia sus desembocaduras se canalizan y forman arroyos con los que se relacionan difusamente. Con amplia ocupación territorial se destacan las cuencas de los arroyos Empedrado y Riachuelo, observándose en el último la presencia de los esteros homónimos, donde los ambientes



Figura 5: Identificación de dos sectores con un comportamiento hídrico regional homogéneo: 1) sector occidental, 2) sector oriental.

acuáticos ocupan el 30 % de su superficie, pudiendo extenderse hasta un 45 % durante las inundaciones (Bonetto *et al.*, 1998).

Predominan los suelos del orden de los alfisoles con presencia de entisoles en las lomadas arenosas y al tipo molisoles se los asocia a los valles fluviales. La vegetación dominante es de parques y sabanas. La especie arbórea característica es el quebracho, que ha sido muy explotado (Daniele, *op. cit.*). Asociada a cursos, lagunas, bañados y esteros se encuentra vegetación palustre y acuática, en tanto que en los interfluvios se desarrollan espartillares.

Sistema Central

En el sistema de mayor ocupación territorial se han reconocido 4 regiones hídricas identificadas como Santa Lucía, Iberá, Batel-Batelito y Corriente, que con escurrimiento regional noreste-sudoeste desaguan en el río Paraná. La diferenciación en varias unidades hídricas obedece al patrón de drenaje mayoritariamente observado, bajo el entendimiento que ante situaciones hidrológicas de aguas altas las divisiones pierden validez, pudiendo comportarse como una única unidad hidrológica. Se señala una interconexión entre las regiones hídricas Santa Lucía y Corriente, siendo este último la vía de descarga de los esteros del Iberá, y Batel-Batelito, (Bonetto, *op. cit.*).

La región del río Santa Lucía, atraviesa diagonalmente el territorio provincial, con sus extremos en contacto con el área drenada por río Paraná en el norte y el oeste. En sus nacientes se desarrollan esteros y lagunas unidos por canales y, a partir de su sector medio, las aguas se encauzan y conforman

Tabla 1. Clasificación Jerárquica de Unidades Hídricas

Escurrimiento: Refiere al sentido de escurrimiento regional.

Área: Superficie del territorio provincial calculada a partir del SIG implementado.

Área (%): Valor calculado en relación a la superficie del territorio provincial.

SISTEMA HÍDRICO	Cuenca / Región Hídrica superficial	Escurrimiento	Sector	Área Km ²	Área %
Noroccidental	Cuencas varias	E – O E - SO	Occidental	9.099,83	10,23
Central	Santa Lucía	NE - SO	Occidental	6.931,21	7,79
	Iberá		Occidental	11.026,45	12,40
	Batel-Batelito		Occidental	4.891,86	5,50
	Corriente		Occ. – Ori.	11.114,17	12,50
	Total			33.963,69	38,19
Oriental	Aguapey	NO - SE	Oriental	7.850,03	8,83
	Miriñay		Oriental	12.710,60	14,29
	Mocoretá		Oriental	2.180,45	2,45
	Cuencas Varias		Oriental	8.849,78	9,95
	Total			31.590,86	35,53
Meridional	Guayquiraró	NE - SO	Ori.-Occ.	7.044,31	7,92
Paraná	---	---	---	5.707,06	6,42
Uruguay	---	---	---	1.518,56	1,71

el río Santa Lucía hasta su desembocadura en el río Paraná. Sobre suaves lomadas arenosas ubicadas hacia el noroeste, se observan cuerpos lagunares circulares, de 300 a 500 m de diámetro, y elípticas con orientación perpendicular al escurrimiento regional, cuyo eje mayor es de 4 a 10 veces mayor que las anteriores.

La denominación de *esteros del Iberá* - el término YVERA significa agua que brilla en idioma Guaraní (Neiff, 2004) -, se corresponde con una extensa área carente de relieve y exigua pendiente regional hacia el sudoeste, con predominio de ambientes palustres (esteros y bañados) que interconectan extensos cuerpos de agua poco profundos unidos por cursos de agua hasta desaguar y conformar el río Corriente. La textura fotográfica permite el reconocimiento de una forma ligeramente cóncava hacia el poniente pseudo-paralela a la estructura regional. Reconocida al sur del embalse Yacyretá, se proyecta en dirección sudoeste, considerándose a las cabeceras del río Corriente como límite del sistema. Si bien sus límites son graduales, el oriental es más nítido, en tanto que el occidental, posee un carácter más aleatorio en función de las condiciones hidrológicas reinantes. La cubeta de los esteros del Iberá es asimétrica en sentido transversal. El límite oriental constituye la divisoria de aguas de la provincia de corrientes hacia los ríos Paraná y Uruguay (Neiff *op. cit.*). Hacia el sudeste, existe un mayor desarrollo de cuerpos lagunares destacándose las lagunas Luna, Iberá, Fernández, Medina y Trin. La laguna Iberá se conecta

con el río Corriente a través de esteros, canales y lagunas, existiendo disparidad de criterio en relación a su vinculación con el río Miriñay, a través del estero homónimo, aspecto que la calificaría como tributaria del río Uruguay. Según Boneto (*op. cit.*) y Santa Cruz (*op. cit.*) la laguna Iberá tendría conexión hidrológica con el Miriñay sólo bajo condiciones hídricas de aguas altas; en tanto otros consideran que no existe dicha conexión.

La región hídrica de los esteros Batel - Batelito se ubica a modo de cuña entre los esteros del Iberá, al este, y la región de Santa Lucía, al oeste. El escurrimiento regional se concentra y conforma el arroyo Batel, afluente del río Corriente. La textura fotográfica permite diferenciar al área de esteros respecto a las lomadas arenosas cribadas por cuerpos lagunares de forma similar a la descrita en el sistema de Santa Lucía. Neiff (*op.cit.*) sugiere un origen eólico para estos cuencos y describe "son frecuentes las hoyas de deflación entre las dunas y en lo alto de las lomadas arenosas que poseen formas circulares y elípticas".

La región del río Corriente actúa de colector final de los escurrimientos de las regiones Batel-Batelito y de los Esteros del Iberá. Desemboca sobre margen izquierda del río Paraná y presenta una asimetría manifiesta en el desarrollo de su red de drenaje. Hacia el este aflora la Formación Serra Geral, donde nacen varias subcuencas que con un sentido de escurrimiento hacia el oeste aportan al río Corriente por margen izquierda. Ellas presentan un patrón de dise-

ño dendrítico marcado, visible en la imagen de satélite, realizado por un bosque en galería a lo largo de los cursos. Previo a su desembocadura, estos tributarios cruzan un "área de escarpa" de dirección norte-sur, a una cota aproximada de 50 m. Al oeste de la misma sobre un área llana fluye el río Corriente con hábito meandriforme. Esta unidad alcanza 20 Km de ancho aguas abajo de la confluencia con el arroyo Villanueva, observándose en algunos sectores, un patrón geométrico rectangular característico del uso antrópico, particularmente sobre la margen izquierda. Por margen derecha recibe únicamente al arroyo Batel, emisario de los escurrimientos de la región Batel-Batelito. Hacia el poniente se observa un área de lomada, con el desarrollo de lagunas de forma elíptica perpendiculares al escurrimiento regional y cuerpos de agua que presentan formas generalmente redondeadas, de características análogas a las mencionadas en el desarrollo de la región hídrica del río Santa Lucía. A estas últimas se las identifica en ambas márgenes del curso inferior del río Corriente.

Con respecto a los suelos predominan los entisoles hacia el occidente y los histosoles en los Esteros Batel-Batelito y en el sector oriental del Iberá. Hay molisoles en la margen izquierda del río Corriente y alfisoles sobre el borde oriental de la región del río Santa Lucía. En las áreas altas domina el paisaje de sabana, y en niveles suavemente convexos, bosques de algarrobo y caranday. En los cordones arenosos se encuentran paisajes de sabana y de parque con palmares; en las numerosas lagunas que los acompañan se desarrolla vegetación palustre y acuática.

Sistema Oriental

El Sistema Oriental, comprende el área de aporte al río Uruguay, ubicado al este del territorio provincial. De superficie levemente menor al sistema central y en contraposición a él, esta comarca tiene un desarrollo importante de la red hídrica encauzada. Está conformada por una veintena de cuencas hídricas entre las que se destacan las de los ríos Aguapey, Miriñay y Mocoretá. Al noreste de la provincia, sobre un área de afloramientos basálticos, tiene su origen el río *Aguapey*. Si bien inicia su recorrido en dirección noroeste, el desarrollo de su cuenca y el escurrimiento del curso tienen mayoritariamente sentido norte-sur. Este curso de casi 400 Km de longitud y hábito generalmente tortuoso, presenta su red de drenaje embutida en una unidad cubierta por bañados que excede el cauce por donde escurren las aguas en una relación de 4 Km a 100 m, aproximadamente. Los tributarios se encuentran emplazados en áreas de bañados cubiertos por pajonales y bosques hidrófilos.

Las nacientes del río *Miriñay* se ubican en el borde sudoriental del Iberá, vinculadas de manera difusa a la laguna del Iberá a través de los esteros homónimos. De forma elongada hacia el sur, vira su rumbo

en dirección sudoeste previo a conformar el escurrimiento lineal. La cuenca del *Miriñay* abarca el 40 % de la región oriental y los cursos escurren por amplios valles en las que se encuentran esteros o bañados. La red de avenamiento es de desarrollo asimétrico, presentando la margen derecha un diseño dendrítico, en contraposición al poco desarrollo de los de la margen opuesta.

La cuenca del río *Mocoretá* se ubica en el extremo sudoriental provincial y desagua directamente en la cola del embalse Salto Grande. La red de tributarios es de menor desarrollo con relación a la longitud del curso principal (130 Km), el cual para la fecha observada se insume en el sector medio de la cuenca para aparecer 10 Km aguas abajo. Aportes hídricos provenientes de la provincia de Entre Ríos le otorgan el carácter de cuenca interprovincial.

Según Daniele (*op.cit.*) domina un bosque de especies xerófilas de un solo estrato entre las que se desarrolla vegetación herbácea densa. La especie arbórea dominante es el ñandubay y se encuentran palmares de yatay y caranday. A lo largo de la red fluvial se halla vegetación palustre y acuática, pirizales, pajonales y bosques ribereños. En los esteros hay embalsados, vegetación flotante y sumergida. En las terrazas del río Uruguay se observa un paisaje de sabana con prados de flechillares y espartillares. En el extremo nororiental se encuentran suelos del orden de los ultisoles y, próximo al río Aguapey, inceptisoles. En el interfluvio entre los cursos del Aguapey y del *Miriñay* predominan alfisoles y se hallan entisoles y molisoles próximos a sus cauces. Hacia el sur, en la zona del Pay Ubre se encuentran mayoritariamente molisoles y, en la zona más austral, vertisoles.

Sistema Meridional

La región Meridional abarca el 8 % de la superficie provincial y es drenada por el río Guayquiraró, que conforma el límite político con la provincia de Entre Ríos, brindándole a la cuenca carácter de interprovincial. El principal afluente es el arroyo Barrancas, con un desarrollo mayor que el propio Guayquiraró, ocupando casi el 78 % de la superficie del sistema en el territorio correntino, en el cual se desarrolla la mayor parte de la cuenca, presentando un diseño de drenaje de tipo dendrítico. Ambos cursos fluyen con hábito meandriforme en sentido noreste-sudoeste con sus nacientes en el área de mayor expresión topográfica (Pay Ubre) y presentan mayor número de tributarios por margen izquierda. Hacia el oeste, tras surcar el área de escarpa, los cursos se desdibujan y fluyen por un área de escasa pendiente entre bañados y esteros.

Predomina el paisaje de sabana. En el sector de cabeceras de los arroyos se identifican praderas y bosques ribereños, y hacia las desembocaduras predominan pajonales, malezales y pastizales. En forma

restringida se presentan bosques xerófilos y, en las áreas deprimidas, hay desarrollo de praderas húmedas. Los suelos predominantes son los molisoles, asociados a los valles fluviales, y los vertisoles, en los interfluvios.

CONCLUSIONES

Al igual que lo que acontece en otros estados provinciales de la República Argentina, en determinadas áreas geográficas se concentran mayoritariamente los estudios y análisis, en tanto otras, quedan relegadas y pocas veces reciben la atención de las autoridades o de los institutos de investigación. La provincia de Corrientes no es la excepción y en consecuencia el conocimiento del territorio es heterogéneo, concentrado fundamentalmente en la región del Iberá. El análisis realizado abarca el territorio correntino en su totalidad con la intención de homogeneizar el conocimiento, desde el punto de vista de la dinámica del escurrimiento hídrico superficial y de su regionalización.

Bajo el entendimiento que la delimitación de entidades hídricas elaborada no es la definitiva, y que la descripción presentada constituye una apretada síntesis de la cuantiosa información relevada, se resaltan los aspectos sustantivos del trabajo apoyados en el conjunto valioso de antecedentes y en los adelantos informáticos implementados.

1. En el Documento Cartográfico elaborado, en el marco del proyecto referido a la *Actualización de la Cartografía Hídrica Superficial Digital de la República Argentina a escala 1:250.000*, se ha identificado un mayor número de unidades hídricas respecto a la información histórica y posibilitará al Instituto Correntino del Agua y del Ambiente contar con la cartografía hídrica superficial, en formato digital y analógico del territorio provincial.

2. Si bien la configuración de la red hidrográfica es heterogénea a lo largo de la provincia, se han identificado unidades de comportamiento homogéneo respecto del patrón de drenaje y al tipo de humedales presentes.

3. De la sistematización jerárquica realizada se identifican en el territorio provincial dos sectores de orientación noreste-sudoeste, identificados como *occidental* y *oriental* con una relación de ocupación territorial del 53 % y 47 %, respectivamente. El primero es tributario del río Paraná, en tanto que el otro, mayoritariamente lo es del río Uruguay, a excepción de las cabeceras de los arroyos afluentes del río Corriente y del Guayquiraró que escurren aguas arriba del área de escarpa descripta. Cada sector presenta patrones de drenaje hídrico superficial distintivos y tipos de humedales asociados, criterios que han sido utilizados para la subdivisión.

4. Al sector occidental le corresponde un escurrimiento de tipo difuso, en manto, no encauzado, desarrollado sobre áreas de exiguuo relieve, con abundancia

de esteros, bañados y lagunas que, ante situaciones extremas, puede comportarse como una única unidad.

5. Sobre el sector oriental existe un predominio de escurrimiento lineal con un patrón dendrítico y diferenciación de cuencas, poniendo de manifiesto la existencia de un mayor relieve asociado a afloramientos o cercanía a la superficie de un basamento basáltico, especialmente en el centro sur provincial.

6. La variedad y cantidad de tipo de humedales y los patrones de drenaje son de distribución heterogénea para el sector occidental y oriental, como así también la distribución de pequeñas presas utilizadas para embalsar agua para el riego del cultivo de arroz.

7. De acuerdo a la clasificación de Brinson (2002) en el sector occidental se reconocen humedales del tipo *depresión*, para los esteros del Iberá, y una *franja lacustre* asociada a las lagunas Luna e Iberá, entre otras. Se identifican humedales del tipo planicie y en menor grado *fluvial* asociados a los ríos Corriente y Santa Lucía y al sistema Noroccidental.

8. En el sector oriental se destaca la presencia de humedales del tipo *fluvial*. El río Aguapey y el tramo superior y medio del Miriñay presentan amplias llanuras de inundación, unidades que van disminuyendo su superficie a media que el diseño dendrítico se hace notorio, indicando la proximidad del basamento basáltico. El río Mocoetá, los afluentes del río Miriñay en su tramo inferior, el río Guayquiraró, y las cabeceras de los afluentes por margen izquierda del río Corriente, recaen en ésta última categoría. Sobre las nacientes de estos últimos se concentran las obras de retención previamente mencionadas.

9. Lo expuesto destaca la riqueza y diversidad de formas de escurrimiento / almacenamiento hídrico presentes en la provincia de Corrientes, pero al mismo tiempo conlleva la gran responsabilidad para las autoridades y población en general en pos de su cuidado.

10. Bajo el entendimiento que la *Cuenca Hidrográfica* constituye la unidad territorial más apta para la planificación y gestión hidro-ambiental de cuencas, se considera que la documentación elaborada y la descripción de la dinámica hídrica superficial, brindará una herramienta de suma importancia para el desarrollo y uso sustentable del recurso natural.

REFERENCIAS

- Benedetti, J., 2000. Los Sistemas de Información Geográfica en el Instituto Geográfico Militar". X Congreso Nacional de Cartografía, Contribuciones Científicas, IGM, Buenos Aires, Argentina, p. 314-322.
- Bonetto, A. y Hurtado, S., 1998. Cuenca del Plata. En Canevari, Blanco, Bucher, Castro y Davidson (Eds.). Los Humedales de la Argentina. Clasificación, situación actual, conservación y legislación. Wetlands Internacional, Publicación N° 46. Buenos Aires, Argentina.

- Brinson, M., 2002. Conceptos y desafíos de la clasificación de humedales. *En* Malvárez y Bó (Eds.). Documentos del Curso-Taller Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina. Buenos Aires, Argentina.
- Daniele, C. y Natenzon, C., 1994. Las Regiones Naturales de la Argentina: Caracterización y Diagnóstico. *En* Daniele, C., Bukart, R., Del Valle Ruiz, L., Natenzon, C. y Ardura, F. (Eds.). El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. Diagnóstico de su Patrimonio y su Desarrollo Institucional. Buenos Aires, Argentina.
- Ferreiro, V., 1983. El mapa hidrogeomorfológico. Su utilización en el estudio de los recursos hídricos superficiales en regiones con insuficiente información de base. La cuenca hídrica superficial del río Bermejo. Actas del Coloquio de Olavarría de Hidrología de las grandes llanuras, Vol. I, Buenos Aires, Argentina, p. 157-189.
- Giraut, M., Valladares, A., Ruiz, A., Rey, C., Dente, V. y Ludueña, S., 2007. Cartografía Hídrica Superficial de la Provincia de Tucumán. Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina. *En* CD trabajo N° 228.
- I.N.C.Y.T.H., 1994. Mapas de cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina, escala 1:1.000.000. Hoja Río Paraguay, N° 5. Presidencia de la Nación, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano.
- I.N.C.Y.T.H., 1994. Mapas de cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina, escala 1:1.000.000. Hoja Río Paraná, N° 8. Presidencia de la Nación, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano.
- I.N.T.A., 1995. Atlas de Suelos de la República Argentina. CD-Rom. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.
- Neiff, J., 2004. El Iberá. ¿En Peligro? Fundación Vida Silvestre (Ed.). Buenos Aires, Argentina.
- Santa Cruz, J., 1981. Bases Hidrogeológicas Generales de la Provincia de Corrientes. VIII Congreso Geológico Argentino. Actas IV, San Luis, Argentina, p. 231 - 242.
- S.E.G.E.M.A.R., 1995. Mapa Geológico de la Provincia de Corrientes. Servicio Geológico y Minero Argentino.
- U.N.N.E., 1997. Atlas Geográfico de la Provincia de Corrientes. Tomo I: El Medio Natural. Revista del Instituto de Geografía N° 8. Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia, Argentina.
- S.R.T.M., 2000. Shuttle Radar Topography Mission: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>

VARIACIÓN CRONOSPACIAL DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO VALLES, MÉXICO

TEMPORAL-SPATIAL VARIATION OF ECOLOGICAL FLOWS IN THE VALLES RIVER BASIN, MEXICO

Germán Santacruz De León¹

Resumen

Los caudales ecológicos se definen como el régimen fluvial en un cuerpo de agua que permite mantener el funcionamiento del ecosistema acuático en condiciones naturales. La legislación ambiental en México – Ley de Aguas Nacionales (LAN), Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA) –, en concordancia con la legislación de países europeos, establece la necesidad de definir caudales en las corrientes superficiales perennes que permitan, ante los diversos usos que se le da al agua que circula por ellas, la existencia o permanencia de la fauna acuática. En el río Valles, localizado en el estado de San Luis Potosí, México, se ha presentado en diferentes años mortandad de peces en la época de estiaje, ello como consecuencia del incremento en las extracciones de agua para uso doméstico y agroindustrial, así como por las descargas de aguas residuales al río. Debido a lo anterior los usuarios, representados en el Comité de Cuenca del río Valles, han establecido, en dos zonas, un nivel de referencia que ha disminuido la mortandad de peces; sin embargo, aún se tienen efectos nocivos en la fauna acuática. En tal sentido, los objetivos de esta investigación fueron estimar los caudales ecológicos en el río Valles con el método Tennant y analizar la variación espacio-temporal de los mismos. Se fijaron dos puntos (Micos y Santa Rosa) y dos períodos (1960-1975 y 1976-2000) de análisis; los resultados muestran que los caudales medios anuales están disminuyendo, generando un decremento en los caudales ecológicos del 10 %. De acuerdo a los resultados se pueden inferir condiciones ecológicas adversas de marzo a mayo en el tramo Micos-Santa Rosa-El Pujal.

Palabras clave: Caudales ecológicos, método Tennant, Río Valles.

Abstract

The ecological flows are defined as the fluvial regime in a water body that it allows to maintain fluvial ecosystem function under natural conditions. Consequently the Mexican environmental law and the Europeans law, working together to fix the adequate environmental conditions for the rivers to permit the development of the aquatic life. The Valles river, located in San Luis Potosí, México has been presented since several year damages and lost of the aquatic life, because of their extensive use by domestic and agroindustrial activities; besides, the increase in the wastewater supplies. So that, the citizen had been established empirically a measure of the water level in the river that supporting the aquatic life in two points. Nevertheless, it was observed damages in the aquatic life. The aim of this work was to measure the temporal-spatial variation of the ecological flow in to the Valles river with the Tennat method. Two points (Micos and Santa Rosa) and two periods (1960-1975 and 1976-2000) were established for analysis, the results showed that the annual media flows have been producing a decrement in the ecological flows in 10%; From the results it can inferred ecological adverse conditions from march to may in the tract Micos-Santa Rosa-Pujal.

Key words: Ecological flow, method Tennant, Valles river.

INTRODUCCIÓN

Numerosas investigaciones han demostrado que los cuerpos de agua superficiales en el planeta y de México, en particular, se encuentran con graves niveles de contaminación, originando una reducción importante de la fauna acuática; la situación anterior podría revertirse si se regulan los aprovechamientos hidráulicos, las descargas de aguas residuales y se fijan caudales ecológicos considerando las condiciones existentes en cada río.

El caudal ecológico se define como el régimen fluvial que se da en un río, humedal o zona costera para mantener ecosistemas y sus beneficios donde se dan usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales se regulan; o como el caudal que es capaz de mantener el funcionamiento del ecosistema fluvial en condiciones naturales (King *et al.* 2003 citado por Stewardson, 2005; Martínez, 2001; Dyson *et al.* 2006). Otra definición que los asocia con los aprovechamientos hidráulicos, indica que es el caudal que debe ser reservado para mantener los ecosistemas

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

fluviales en condiciones admisibles, aguas abajo de las obras o aprovechamientos que alteran los regímenes originales o naturales de flujo de una corriente (García y Paz-Soldán, 1997; García *et al.* 1999).

Los métodos para la estimación de los caudales ecológicos se agrupan en los que hacen uso de los caudales medidos en estaciones hidrométricas y los que hacen uso de los modelos de simulación del hábitat, en los que se determinan parámetros hidráulicos que tienen incidencia en la distribución de los organismos acuáticos y con los que se obtiene respuesta de éstos a esos parámetros (García, *et al.* 2000).

Actualmente se tienen identificados 200 métodos para la estimación de los caudales ecológicos los cuales se usan en más de 50 países (Arthington *et al.* 2005; Stewardson, 2005); éstos se agrupan en cuatro tipos: i) métodos hidrológicos; ii) métodos de evaluación hidráulica; iii) métodos de evaluación del hábitat y iv) métodos holísticos (Arthington *et al.* 2005; Stewardson, 2005; Maunder y Hindley, 2005).

Los que pertenecen a los dos últimos grupos son los más complejos. En éstos se encuentran el llamado Building Block Methodology que es usado en Sudáfrica (Hughes *et al.* 2003; Hughes, 1999) y el Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), que es de los más usados en los países desarrollados (Martínez, 2001; McKenny y Read, 1999); éstos requieren de tiempo, recursos económicos y de experiencia técnica, además de información biológica (Acreman y Dunbar, 2004; García y Paz-Soldán, 1997; Pyrce, 2004).

Los métodos hidrológicos, son los más empleados en los países en vías de desarrollo, como México (García *et al.* 1999) y Nepal (Smakhtin, 2001); su principal desventaja es que la significancia ecológica de las estadísticas hidrológicas no es clara; el mejor conocido de ellos es el método Tennant, que fue desarrollado en Estados Unidos de Norteamérica (Smakhtin, 2001; Stewardson, 2005), es ampliamente usado en la planeación a nivel de cuencas hidrográficas (Acreman y Dunbar, 2004), actualmente se emplea, en su forma original o modificado, en 25 países (Moore, 2004; Pyrce, 2004). Dentro de los métodos hidrológicos también se incluye al método matemático Suizo y al Criterio establecido en la Ley de Aguas de Francia (García y Paz-Soldán, 1997).

Por otro lado, en México la legislación ambiental –Ley de Aguas Nacionales (LAN), Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA)–, en concordancia con la legislación de países europeos, establece la necesidad de definir caudales en las corrientes superficiales perennes que permitan, ante los diversos usos que se les da al agua que circula por ellas, la existencia o permanencia de la fauna acuática. Sin embargo, en muy pocos cuerpos de agua del país se han fijado estos caudales; por ejemplo, se han estimado caudales ecológicos para los ríos Tonto, Santiago y Tepic (García, *et al.* 1999).

En el río Valles, localizado en el estado de San Luis Potosí, se ha presentado en diferentes años mortandad de la fauna acuática en la época de estiaje, como consecuencia del incremento en las extracciones de agua para uso doméstico y agroindustrial, así como por las respectivas descargas de aguas residuales al río. Debido a lo anterior los usuarios del agua del río, representados en el Comité de Cuenca del Río Valles, han establecido por observación, en dos zonas, un nivel de referencia que ha disminuido, en buena medida, la mortandad de peces; sin embargo, aún continúa presentándose efectos en la fauna acuática.

OBJETIVO

Estimar los caudales ecológicos en el río Valles y analizar la variación espacio-temporal de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio la constituye el río Valles, que en conjunto con sus tributarios forman una cuenca hidrográfica de 3.199 km²; esta cuenca presenta climas subhúmedos con lluvias en verano de humedad media y alta y climas semicálidos subhúmedos con lluvias en verano, la precipitación pluvial media anual es de 1300 mm. La corriente principal, localizada en el estado de San Luis Potosí, tiene un recorrido de 150 km desde su origen, a 800 msnm, hasta su desembocadura, a 100 msnm, con el Río Tampoán afluente del Río Pánuco.

Con un Sistema de Información Geográfica (SIG) de la cuenca del río Valles se georeferenciaron dos estaciones hidrométricas (Figura 1), las cuales cuentan con más de veinte años de registro de caudales; en la parte media de la cuenca se ubica la estación Micos (22.11° L.N. y 99.16° L.W) y en su parte baja la estación Santa Rosa (22.01° L.N. y 99.06° L.W.). La información hidrométrica de estas estaciones se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (IMTA, 2002). El período de registro para cada estación se dividió en dos (1960-1975 y 1976-2000), para cada uno de ellos se calcularon los caudales medios anuales, medios mensuales y se determinó el período de estiaje y avenidas; con esta información se calcularon los caudales ecológicos empleando el método Tennant modificado para México (García *et al.* 1999).

El método Tennant establece los siguientes criterios: 1) el 10 % del caudal medio anual es el mínimo recomendable para mantener un hábitat que permite en un corto plazo la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática; 2) El 30 % del caudal medio anual es recomendable para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuática; 3) el 60 % del caudal medio anual es recomendable para generar un hábitat de características excelentes a excepcionales para la

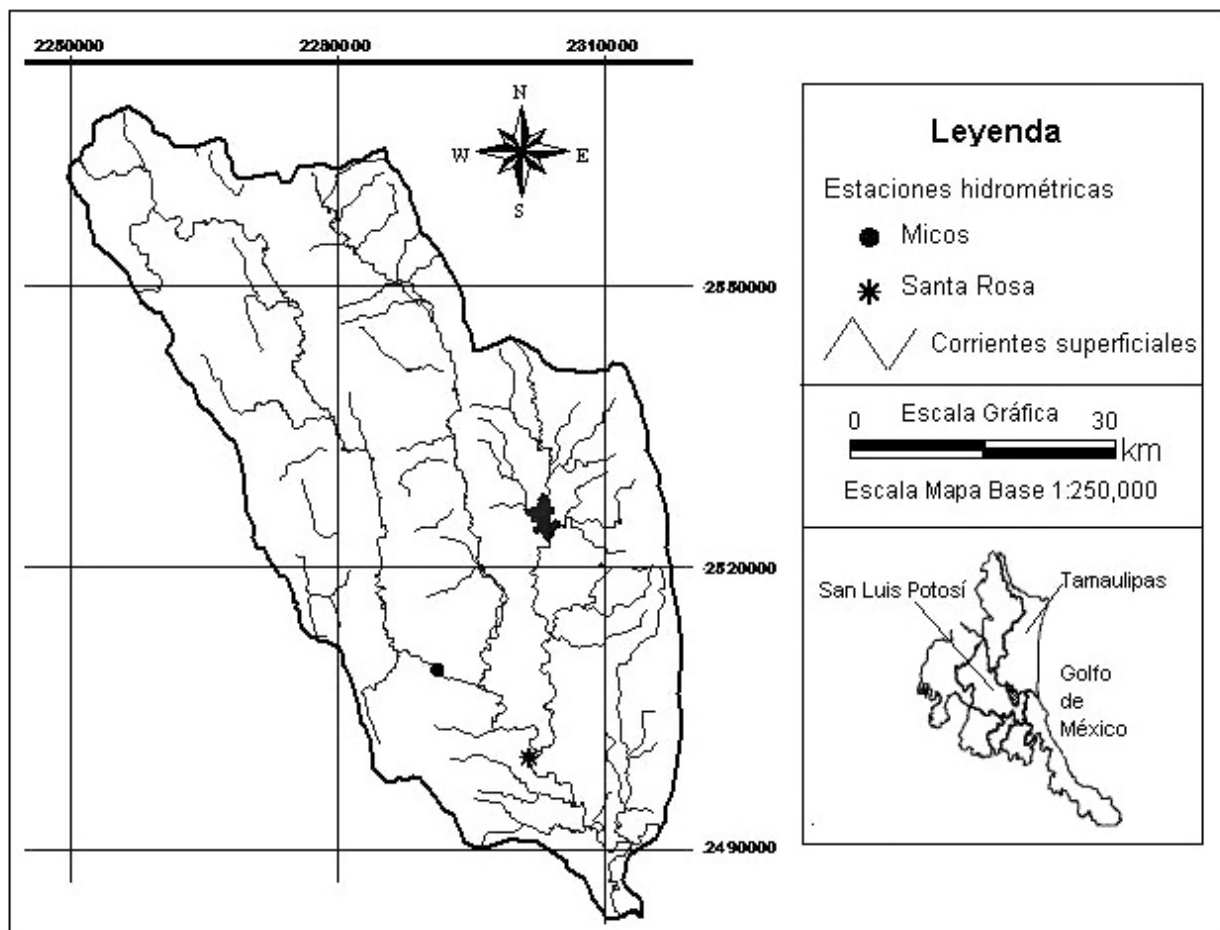


Figura 1. Localización de estaciones hidrométricas en la cuenca del río Valles

mayoría de las formas de vida acuática, durante los periodos de crecimiento iniciales (García et al. 1999; Maunder & Hindley, 2005; Pyrce, 2004). En tal sentido, el método Tennant identifica diferentes niveles de caudales recomendados como adecuados para la vida acuática con base en diversas proporciones de los caudales medios (Acreman & Dunbar, 2004; Moore, 2004; Smakhtin, 2001; Stewardson, 2005), proporciona de manera rápida y económica una aproximación de los caudales ecológicos (García & Soldán, 1997), considerando a éstos como un porcentaje del caudal medio anual (Pyrce, 2004).

RESULTADOS

De los aprovechamientos hidráulicos.

La cuenca del río Valles presenta condiciones biofísicas que favorecen o propician determinados usos del agua. En las subcuencas en las que se ha dividido la cuenca del Río Valles existen condiciones particulares que las hacen más o menos "aptas" para un determinado uso. Los aprovechamientos hidráulicos actuales en la cuenca del Río Valles se encuentran sistematizados en el **Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)** de la Comisión Nacional del Agua (CNA). En este registro aparece el volumen de agua anual concesionada y el tipo de aprovechamiento. Como se mencionó en el apartado de métodos, los

aprovechamientos de agua fueron georeferenciados en el SIG de la cuenca del Río Valles (Figura 2) a partir de una base de datos generada con información proporcionada por la CNA.

De acuerdo con la base de datos y el SIG de la cuenca del río Valles, el volumen de agua superficial concesionado en la subcuenca "Río El Salto" es de 33.22 Mm³/año; aquí se asume que éste es el volumen de extracción. El 90% del volumen extraído se emplea en el sector agrícola; el 6% se emplea en el sector industrial, aquí es importante destacar que este uso es, en esencia, agroindustrial y está constituido por un solo usuario, que extrae 1.90 Mm³/año; el 4% restante del volumen extraído se destina al uso público-urbano.

La subcuenca "Río Los Gatos" abarca todo el municipio de Nuevo Morelos, Tamaulipas. Las concesiones otorgadas en este municipio por la CNA no se encuentran geoposicionadas; sin embargo, se sabe el tipo de uso y la cantidad de agua extraída. El volumen de agua superficial concesionado es de 7.79 Mm³/año, de éstos se extraen 2.8 Mm³/año (35.94%) en la porción de Nuevo Morelos, Tamaulipas. El uso agrícola es el que mayor volumen de agua superficial extrae de la subcuenca: 6.96 Mm³/año; le siguen los destinados a usos múltiples y pecuarios con 0.39 Mm³/año y 0.24 Mm³/año, respectivamente; finalmen-

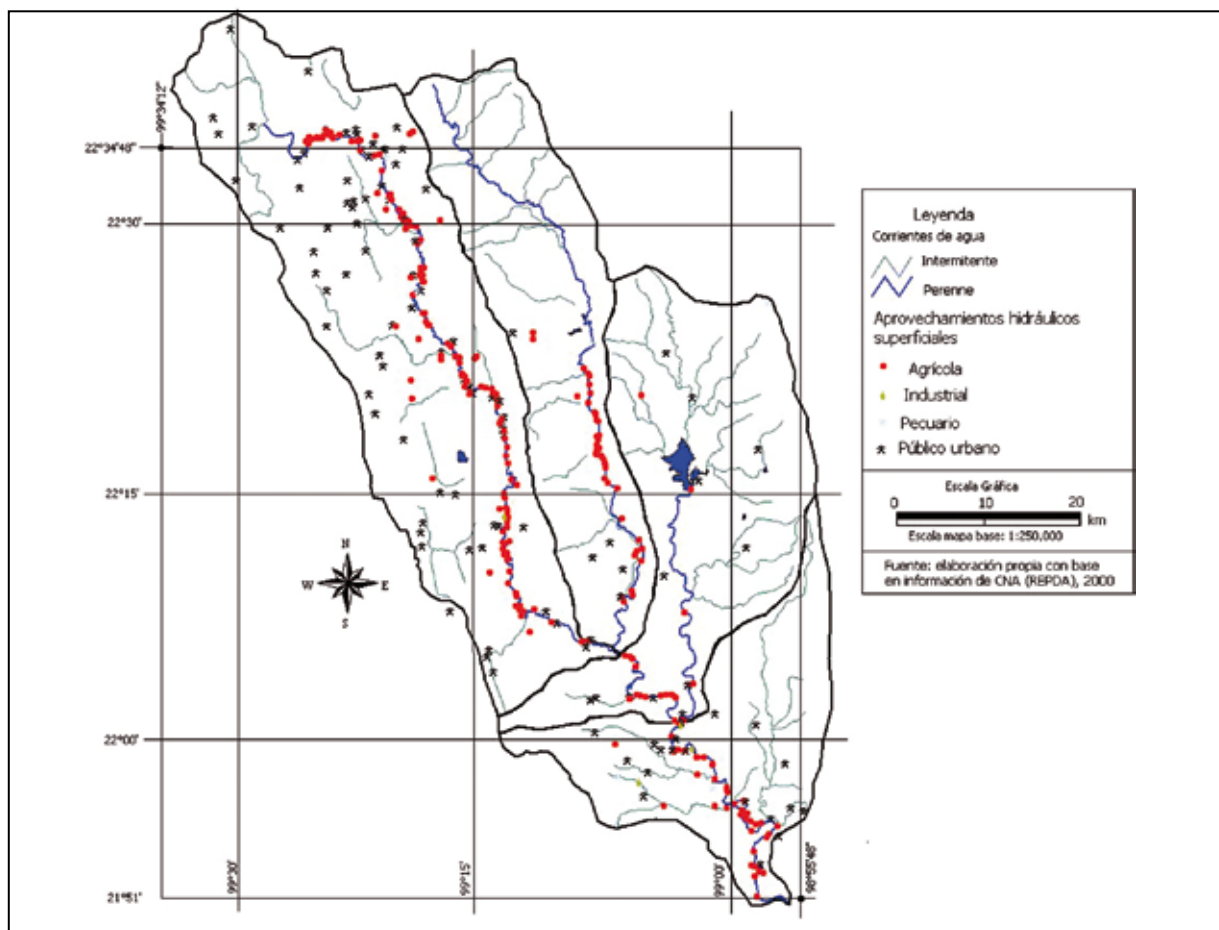


Figura 2. Aprovechamientos hidráulicos superficiales actuales en las subcuencas del río Valles

te, se encuentra el uso público-urbano, que engloba al uso doméstico, que extrae 0.061 Mm³/año. Por lo tanto, el 90.9 % del agua extraída en la subcuenca “Río Los Gatos” se destina a uso agrícola.

La subcuenca “Río Mesillas” contiene una pequeña porción del municipio de Antiguo Morelos, Tamaulipas; esta porción se encuentra ubicada en la parte alta de la subcuenca, por esto y por lo pequeño de esa porción no se consideran las concesiones de aprovechamiento de agua otorgadas por la CNA en este municipio. Por otro lado, la distribución espacial de las concesiones de agua superficial correspondientes al municipio de Ciudad Valles se conoce a partir del SIG de la cuenca del Río Valles (Figura 2). Los aprovechamientos superficiales en la subcuenca son 36 y se ubican mayoritariamente en la parte baja de la subcuenca. El volumen de agua superficial concesionado es de 23.92 Mm³/año; los aprovechamientos superficiales destinados al uso agrícola son 22, mediante los cuales se extrae el 93.18% del volumen total; para uso pecuario se destina el 5.85 % del volumen de agua extraído y el 0.97% se destina a uso público urbano.

En la subcuenca “Río Valles” se tienen 71 aprovechamientos superficiales en los que se extrae un volumen de 16.4 Mm³/año de agua. Para uso agrícola se destina el 73% del volumen de agua superficial;

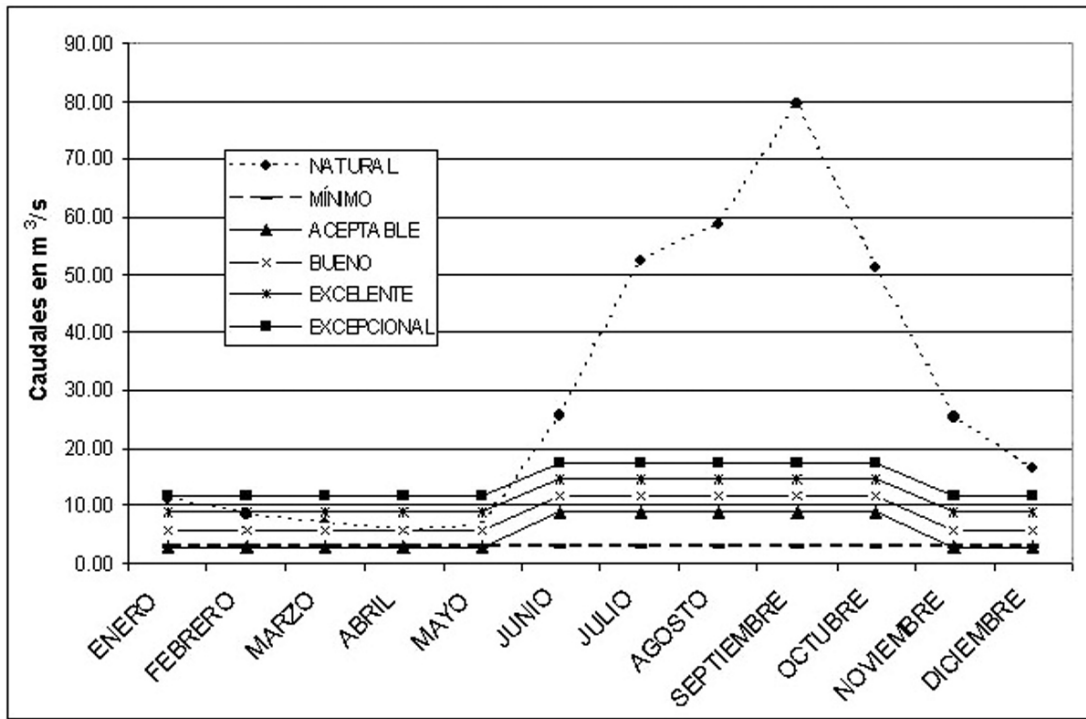
para uso público urbano el 1.67% y para uso agroindustrial el 25% del volumen extraído. Dos industrias son las que aprovechan el 98.8% del volumen de agua destinado a uso agroindustrial.

En resumen, el volumen de agua concesionado en la cuenca del Río Valles es de 89.85 Mm³/año. El 89.2% se destina a uso agrícola. Ello como se verá adelante tiene efectos considerables en la vida acuática que constituyen la cuenca del río Valles.

Variación temporal de los caudales ecológicos en la estación Micos

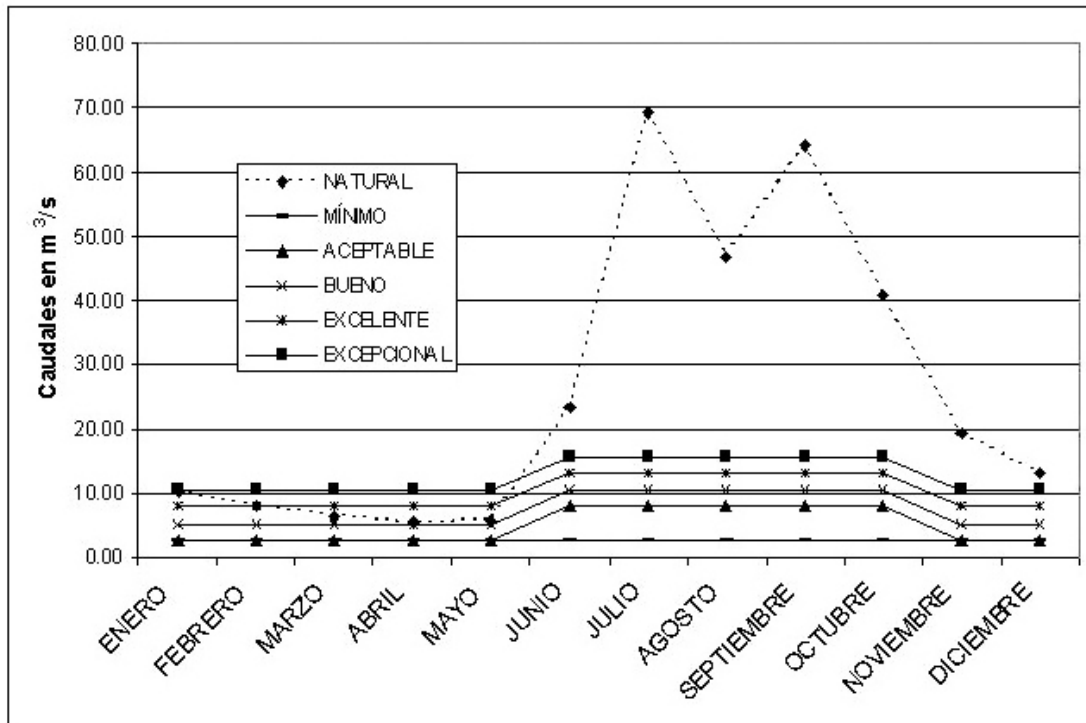
En el período 1960-1975 el caudal medio anual en la estación Micos fue de 28.98 m³/s y éste disminuyó a 26.01 m³/s en el período 1976-2000. Este descenso provocó un decremento en los caudales ecológicos; así, el caudal catalogado como mínimo pasó de 2.89 m³/s a 2.60 m³/s y el considerado como excelente, para la época de estiaje, pasó de 8.69 m³/s a 7.80 m³/s (Figuras 3 y 4); en términos porcentuales éstos disminuyeron entre 10.0% y 10.2%. De acuerdo con lo anterior, cualquier incremento o descenso en los caudales medios anuales, provoca respectivamente un aumento o decremento en los caudales ecológicos estimados a partir del método Tennant.

El decremento en los valores de los caudales ecológicos no implica que las condiciones ecológicas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Caudal medio natural versus caudales ecológicos, estación Micos, período 1960-1975. Subcuenca "Río El Salto"



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Caudal medio natural versus caudales ecológicos, estación Micos, período 1976-2000. Subcuenca "Río El Salto"

actuales en el punto estudiado del río sean las más favorables para la vida acuática; este descenso es provocado por el incremento en las extracciones de agua del río para usos agroindustriales y domésticos aguas arriba de la estación Micos.

El caudal medio mensual para los meses de febrero a mayo del período 1961-1975 analizado fue inferior a los caudales ecológicos catalogados como excelentes y excepcionales. Para el período 1976-2000, el caudal medio mensual del mes de febrero está ligeramente por arriba del caudal considerado como excelente pero es inferior al considerado como excepcional; los caudales medios mensuales de marzo, abril y mayo son inferiores a los caudales considerados como excelentes y excepcionales (Figuras 3 y 4).

Por otro lado, en los meses de diciembre a agosto, del período 1961-1975, el caudal mensual mínimo resultó inferior a los caudales ecológicos considerado como excelentes y excepcionales y en el período 1976-2000 sólo el mes de octubre presentó un caudal mínimo mensual mayor que los considerados como excelentes y excepcionales.

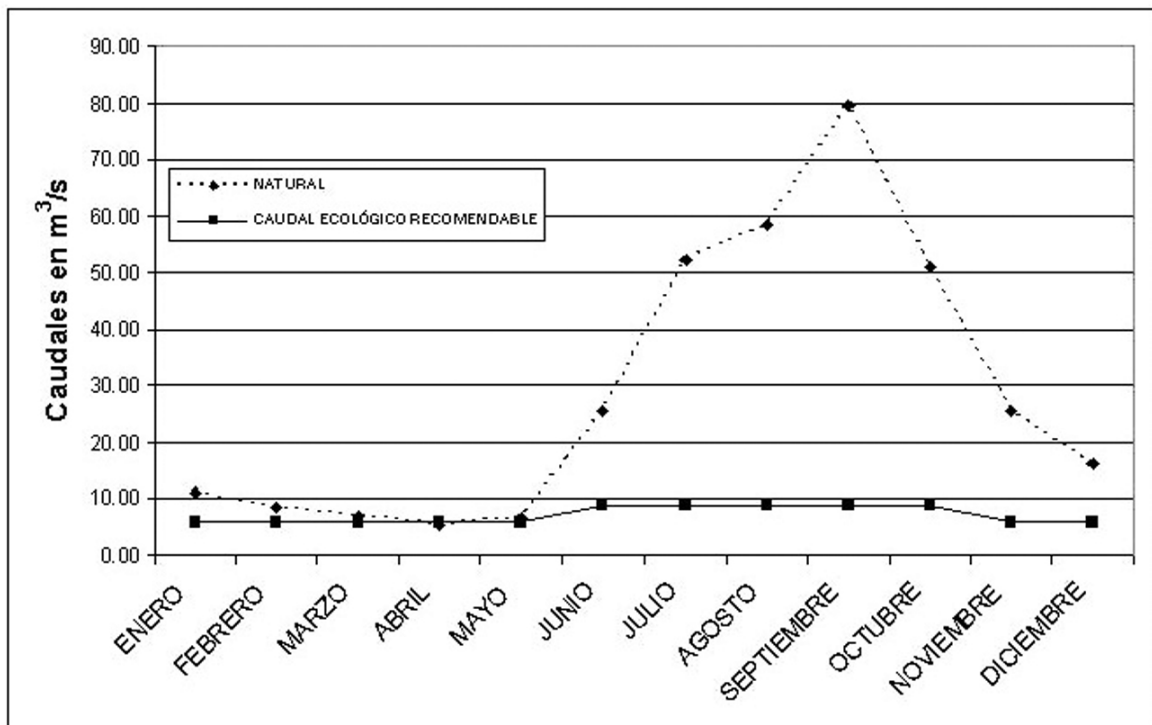
De acuerdo con lo anterior, en la estación Micos el mes de abril es el más crítico para la vida acuática. En este mes se presentó en el primer período analizado un caudal medio mensual inferior al caudal

ecológico recomendable, el cual se define como el caudal que resulta de considerar el 20% del caudal medio anual en la época de estiaje; en el segundo período el caudal medio mensual de abril resultó ligeramente superior al caudal ecológico recomendable (Figuras 5 y 6).

Variación temporal de los caudales ecológicos en la estación Santa Rosa

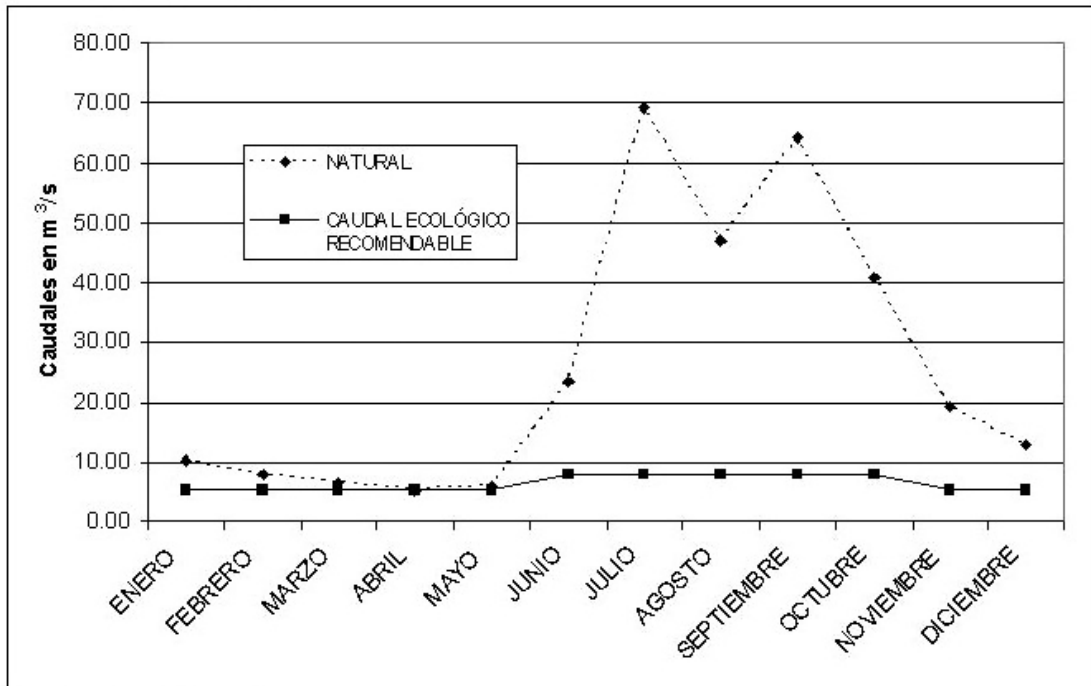
En la estación Santa Rosa, localizada en la subcuenca "Río Valles", el comportamiento de los caudales es similar a los de la estación Micos. El caudal medio anual en el período 1959-1975 fue de 38.92 m³/s y se redujo a 34.51 m³/s en el período 1976-2000.

El descenso en los caudales medios mensuales generó que los caudales ecológicos disminuyeran. La reducción en términos porcentuales fue de 11%, el cual es significativo y similar al que se presentó en la estación Micos. De acuerdo con lo anterior, el caudal medio mensual en la época de estiaje, para ambos períodos, únicamente estuvo por arriba de los caudales ecológicos mínimos y aceptables (Figuras 7 y 8); sin embargo, en los meses de febrero a mayo presentó valores inferiores al del caudal ecológico excelente. El caudal mensual mínimo que se presentó durante los meses de enero a agosto, del primer



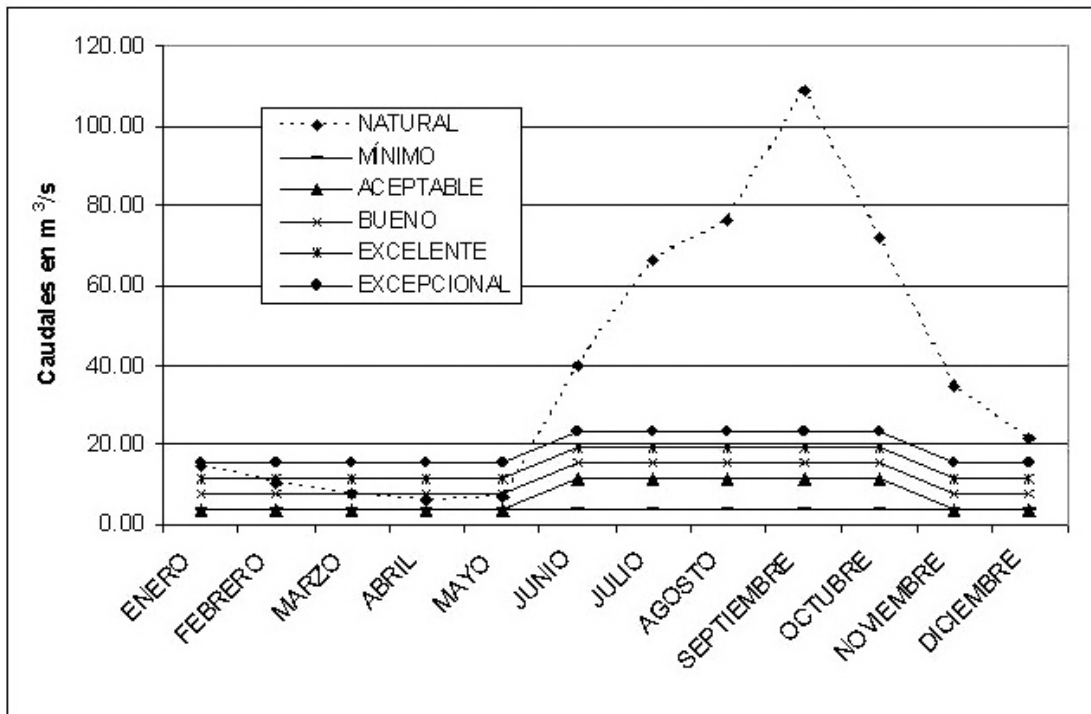
Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Micos, período 1960-1975. Subcuenca "Río El Salto"



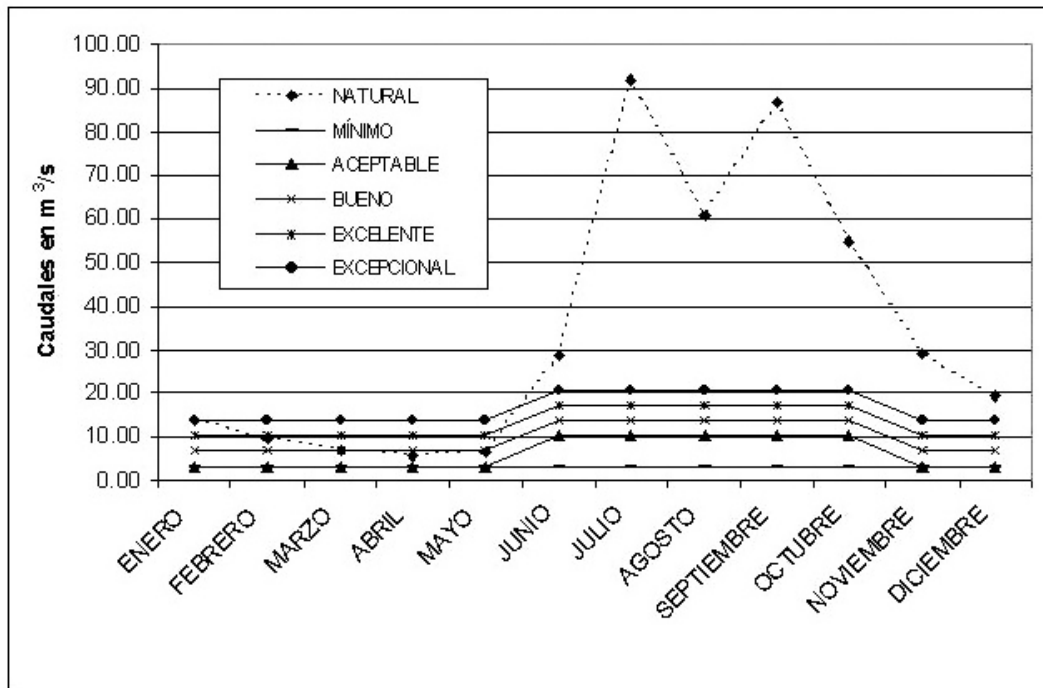
Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Micos, período 1976-2000. Subcuenca “Río El Salto”



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Santa Rosa, período 1960-1975. Subcuenca “Río Valles”



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Santa Rosa, período 1976-2000. Subcuenca “Río Valles”

período analizado, fue inferior a los caudales ecológicos catalogados como buenos, excelentes y excepcionales y en el segundo período de análisis sólo octubre presentó un caudal superior al considerado como bueno y ese mismo caudal resultó inferior a los catalogados como excelentes y excepcionales.

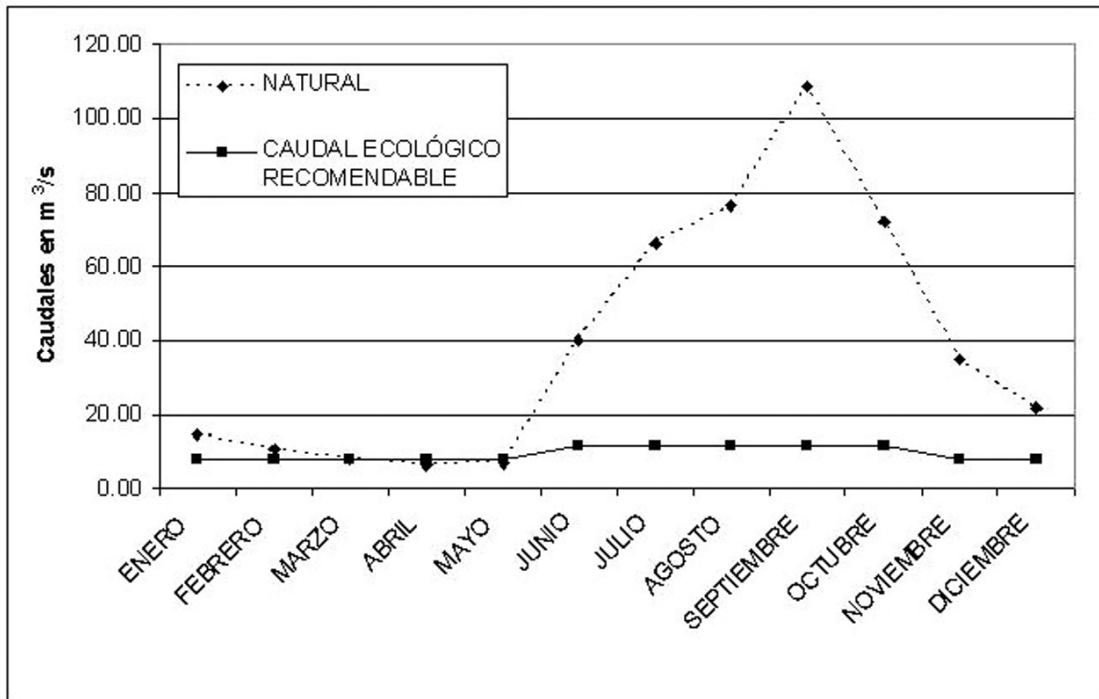
De acuerdo con lo expuesto, los meses de abril y mayo presentaron los menores valores de caudal medio mensual y, en términos hidrométricos, las condiciones más adversas para la vida acuática (Figuras 9 y 10). Por ejemplo, el caudal medio mensual de abril en el primer periodo resultó inferior en 18.8%, 47.17% y 60.37% a los caudales ecológicos bueno, excelente y excepcional, respectivamente; en el segundo período este mismo mes presentó un valor que fue inferior a esos caudales en porcentajes similares a los anteriores.

Los resultados anteriores muestran que la variación temporal de los caudales naturales y ecológicos calculados en ambos puntos es de consideración, reflejan en cierta medida que aguas arriba de cada uno de ellos están presentándose acciones humanas que son la causa de la disminución de los caudales.

Es importante recordar que la estación Micos se encuentra aguas arriba de la estación Santa Rosa, de modo que el caudal aforado en esta última corres-

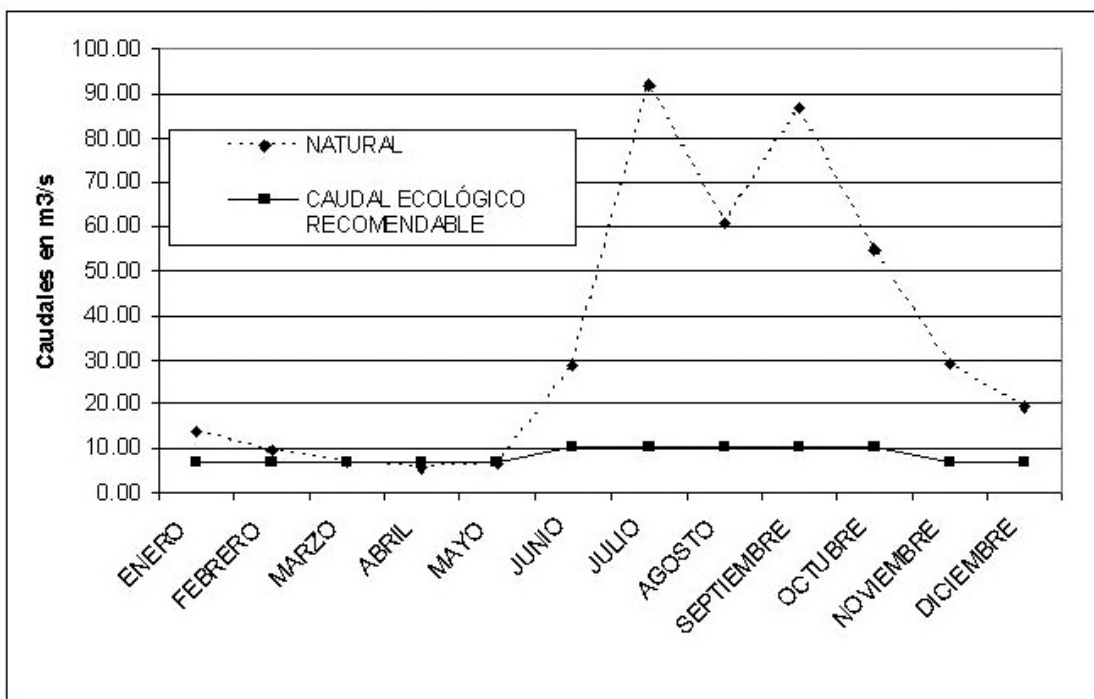
ponde a una mayor superficie hidrográfica e incluye a una parte del aforado en Micos. En tal sentido, el caudal medio anual para la estación Micos en el período 1960-1975 fue de 28.98 m³/s y en la estación Santa Rosa fue de 38.92 m³/s. En el segundo período este caudal se reduce y su valor fue de 26.01 m³/s para Micos y de 34.51 m³/s para Santa Rosa. De acuerdo con lo anterior el incremento en el caudal medio anual entre Micos y Santa Rosa fluctuó entre 24.5% y 25.5%, esto a pesar de las extracciones de agua del río para usos domésticos y agroindustriales. De acuerdo con lo anterior, debe ser posible establecer en los tramos Micos-Santa Rosa un caudal ecológico de 16.9 m³/s cuyo valor resulta de sumar al valor del caudal ecológico excepcional el 25% del valor del caudal medio anual en la estación Micos, ello, sobre todo, con fines de gestión integrada de recursos hídricos e incluso con la finalidad de limitar las extracciones de agua del río.

Sin embargo, los caudales medios mensuales, en condiciones reales, de enero a mayo resultan inferiores al caudal ecológico anterior, lo cual muestra que es necesario establecer acciones en el río, pero sobre todo en la cuenca hidrográfica, las cuales deben ir encaminadas a mantener y permitir las condiciones ecológicas favorables a la vida acuática, más cuando estas condiciones se ven impactadas por la contami-



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Santa Rosa, período 1960-1975. Subcuenca “Río Valles”



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Caudal medio natural versus caudales ecológicos recomendables en la estación Santa Rosa, período 1975-2000. Subcuenca “Río Valles”

nación producida por las descargas de agua residual doméstica y agroindustrial en el río.

Los resultados muestran, por un lado, la importancia que tiene el conocimiento de la variación temporal de los caudales medios anuales que escurren por un punto, máxime cuando éstos se emplean para calcular y, con ello, fijar caudales ecológicos; esto es, muestran que un lapso considerable de tiempo, por ejemplo de más de 30 años, los caudales naturales y los caudales ecológicos presentan variaciones; de aquí que estos últimos no deben considerarse como fijos en el tiempo. Así, es recomendable que en un río sometido a nuevas y grandes extracciones de agua para usos humanos se calculen y revisen, en términos hidrológicos, cuando menos en un período de diez años tales caudales.

Por otro lado, los resultados muestran la importancia de conocer la variación espacial de los caudales medios anuales y, con ellos, de los caudales ecológicos, ya que en una misma corriente superficial, como aquí se demostró, éstos varían de un tramo a otro; este conocimiento permite establecerlos en función de la hidrometría en diferentes tramos del río.

CONCLUSIONES

Desafortunadamente, en México, a pesar de que la legislación en la materia lo establece, a pocos ríos se les han fijado, por uno u otro método, caudales ecológicos. Esto se debe, en buena medida, a que por un lado, son pocas las corrientes superficiales que cuentan con estaciones hidrométricas y, por otro lado, que las que existen no funcionan adecuadamente.

De acuerdo con lo anterior, es necesario considerar la protección de la fauna acuática y asegurar que, sobre todo, en la época de estiaje se mantenga el caudal ecológico recomendable.

Los resultados permiten concluir que el caudal ecológico ha disminuido entre 10 % y 11 % en los últimos treinta años en el tramo estudiado del río Valles; que los meses más críticos, en relación con la cantidad de agua que fluye por los puntos estudiados, para la vida acuática son marzo y abril, meses en los que se presenta el período de sequía y, con ella, las mayores extracciones de agua para uso agrícola y doméstico.

Por otro lado, se concluye que es importante conocer la variación temporal de los caudales medios anuales que escurren por un sitio; sobre todo, cuando éstos se emplean para calcular y, con ello, fijar caudales ecológicos.

Finalmente es necesario realizar acciones, como regular las extracciones de agua del río para uso agrícola, regular las descargas de agua residual doméstica y agroindustrial, entre otras que mejoren las condiciones ecológicas favorables para la vida acuática. Aunque es necesario tener presente que el caudal ecológico no especifica calidad del agua, sólo

cantidad o volumen, por lo que a partir de él no se pueden deducir efectos de contaminación.

REFERENCIAS

Acreman, A & M. Dunbar. 2004. Defining environmental river flow requirements-a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 8 (5): 861-876.

Arthington, A., R.Tharme, S. Brizga, B. Pusey & M. Kennard. 2005. Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. Technical Report. Centre for Riverine Landscapes, Faculty of Environmental Sciences, Griffith University, Nathan, Queensland, Australia. 31 p.

Dyson, M., G. Bergkamp, & J.Scanlon (Eds.) 2003. Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Traducción de José María Blanch. UICN-ORMA. San José, Costa Rica. 125 p.

García, E.; R. González, P. Martínez, J. Athala & G. Paz-Soldan. 1999. Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México. Libro en CD. Colección Manuales. CNA-IMTA-SEMARNAP. México.

García, E. & Paz-Soldan, G. 1997. Estimación de las necesidades hídricas para la conservación de la ecología fluvial de los ríos regulados. En *Descentralización en la gestión ambiental*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. México. p, 1-8.

Hughes, D.A., P. Hannart & D. Watkins. 2003. Continuous baseflow separation from time series of daily and monthly streamflow data. *Water SA* 29 (1): 43-48.

Hughes, D.A. 1999. Towards the incorporation of magnitude-frequency concepts into the building block methodology used for quantifying ecological flow requirements of South African rivers. *Water SA* 25 (3): 279-284.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2002. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). IMTA-SEMARNAT. Discos Compactos. México.

Martínez-Capel, F. 2001. Preferencias de microhábitat de *Barbus bocagei*, *Chondrostoma polylepis* y *Leuciscus pyrenaicus* en la cuenca del río Tajo. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. España. 255 p.

McKenny, C. & Read, M. 1999. Ecological flow requirements for the Great Forester River. Report Series WRA 99/15. Tasmania. 42 p.

Moore, M. 2004. Perceptions and interpretations of Environmental Flows and implications for future water resource management. Tesis de Maestría. Department of Water and Environmental Studies. Linköping University. Suecia. 56 p.

Pyrce, R. 2004. Hydrological Low Flow Indices and their Uses. Watershed Science Centre. WSC Report No. 04-2004. Ontario. Canada. 33 p.

Sanz, F. & Martínez, A. 1998: Propuesta de un régimen de caudales ecológicos para el coto de pesca de Melgar de Arriba (Valladolid). Libro de actas (en CD) del "1er. Congreso de Planificación y Gestión de

Aguas". Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Zaragoza, España.

Smakhtin, V. U. 2001. Low Flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* (240): 147-186.

Stewardson, M. 2005. Environmental flow analysis. Technical Report 05/13. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Australia. 47 p.

EVALUACIÓN DE LA OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN EN LA PREDICCIÓN DE NIVELES DE PRECIPITACIÓN DE LA COSTA ECUATORIANA

ASSESSMENT OF THE MADDEN-JULIAN OSCILLATION IN THE PREDICTION OF PRECIPITATION LEVELS OF THE ECUADORIAN COAST

Michele Trickey¹, M. Pilar Cornejo-Grunauer², Jonathan Cedeño²

Resumen

Continuando con el esfuerzo de mejorar el pronóstico estadístico de precipitación estacional en la costa sudamericana, datos mensuales de precipitación de tres regiones costeras del Ecuador (provenientes del producto GPCC Full Data Reanalysis Version 3) fueron analizados para ver su comportamiento con respecto a nuevos índices predictores. El análisis, que permitiría una estimación más consistente de los niveles estacionales de precipitación, se realizó con el programa WFCC/WTC distribuido por NOAA-OGP/UCR. Los índices predictores fueron basados en combinaciones lineales de la TSM promedio de la región Niño 3 y del índice de oscilación Madden-Julian (OMJ). Los resultados sugieren que los índices propuestos no mejorarían el esquema de predicción estacional ya existente, ya que los resultados estadísticamente más fuertes permiten pronosticar adecuadamente tan sólo el final de la estación lluviosa, los cuales tienen una utilidad limitada. Se sugiere que el mejoramiento moderado que se observó en dichos pronósticos resulta de la interferencia entre la señal del Niño 3 y efectos rezagados de la subsidencia asociada con la OMJ. Además, el método de análisis probado, el cual fue automatizado durante el presente estudio, se ha mostrado efectivo, facilitando evaluaciones futuras del esquema propuesto.

Palabras clave: Oscilación Madden-Julian, índices Niño, ENOS, probabilidad de lluvias, precipitación, Ecuador.

Abstract

In a continuation of the effort to improve statistical forecasting of seasonal rainfall along the South American coast, monthly precipitation data in three coastal regions of Ecuador (taken from the GPCC Full Data Reanalysis Version 3) were analyzed to see their response to new predictive indices. The analysis, which was meant to permit a more consistent estimation of seasonal levels of precipitation, was conducted using the WFCC/WTC program distributed by NOAA-OGP/UCR. The predictive indices were based on linear combinations of the Niño 3 regionally averaged SST and the Madden-Julian Oscillation (MJO) index. The results suggest that the proposed indices do not improve current seasonal predictions because strong statistical results were only obtained for forecasts at the end of the rainy season, when they are least useful. We suggest that the moderate improvements observed result from interference between the Niño 3 signal and the lagged effects of the subsidence associated with the MJO. The method of analysis used, which was automated through this study, has proven effective, simplifying future investigations of the proposed schema.

Keywords: Madden-Julian oscillation, Niño indexes, ENSO, rain probability, precipitation, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

La predicción estacional de lluvias a partir de modelos estadísticos y físicos es importante en el Ecuador tanto por sus potenciales aplicaciones agrícolas y de prevención en sectores estratégicos (e.g., energía hidráulica), como por sus otras implicaciones antropogénicas. Sin embargo, tal predicción sigue siendo imperfecta por la multiplicidad de factores que influyen en el clima del país. Se sabe que el ciclo ENOS está fuertemente ligado a la variabilidad interanual en el clima de la costa ecuatoriana. Sin embargo, su señal solamente explica una cierta fracción de la variación en precipitación (Rossel, 1997). Por lo tanto,

este estudio propone apoyar la búsqueda de nuevos predictores estadísticos, los cuales permitirán estimar consistentemente el campo de niveles estacionales de precipitación en la costa ecuatoriana. Este tipo de pronóstico estadístico sigue siendo importante en el sistema de predicción del país, debido a la baja resolución espacio-temporal de los modelos físicos (Coelho *et al.*, 2005; Martínez *et al.* 2008).

Siguiendo el esquema propuesto por Enfield *et al.*, 2003, se define los niveles de cualquier variable por terciles. En un año "alto de lo normal" (AN), el valor de la variable fue mayor a su valor en dos tercios de los años en el registro histórico. En un año "dentro de lo normal" (DN), el valor fue mayor al valor en un

¹ Department of Physics, Yale University, P.O. Box 208120, New Haven, CT, U.S.A. 06280-8120.

² Centro de Agua y Desarrollo Sustentable CADS, Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL., Guayaquil, Ecuador.

tercio de los años del registro. De la misma manera, la precipitación en los años que se denominan “bajo de lo normal” (BN) tiene un valor que equivale a 1/3 o menos del promedio histórico.

Entre los índices del Niño típicamente utilizados para pronóstico estadístico en el Ecuador, los primeros en ser desarrollados fueron los índices Niño. Éstos corresponden a anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) entre latitudes/longitudes determinadas del océano Pacífico, entre 5°N y 5°S. Entre todos los índices Niño, el Niño 3 (correspondiente a la TSM entre 90° - 150°W y 5°N - 5°S), ha sido identificado como el mejor predictor de eventos extremos de la precipitación para la región costera de Ecuador (Cedeño *et al.*, 2006).

Mientras tanto, estudios recientes indican que la adición del índice de Oscilación Madden-Julian (OMJ) al Niño1+2 mejora su correlación con niveles de precipitación en Guayaquil (Nieto, 2007). Esta oscilación, que tiene un periodo de 30-60 días (Madden y Julian, 1971), está marcada, en parte, por un aumento en la temperatura del mar. Por eso, tiene una influencia directa en los patrones de precipitación en la zona tropical entre 40°E y 120°W a través de células de convección (Donald *et al.*, 2006). A pesar de que las células no alcanzan la costa ecuatoriana, las variaciones en la OMJ, a través de una respuesta radiada de ondas Kelvin, afectan efectivamente al Ecuador (Zavala-Garay *et al.*, 2005). Aunque estudios previos indicaron que la fase y amplitud de esta oscilación no tiene un impacto directo en la precipitación al este de 140°W (Waliser *et al.*, 2003), otros trabajos más recientes sugieren que la OMJ sí puede tener efectos indirectos en la precipitación de la costa ecuatoriana (Donald *et al.*, 2006). Por lo tanto, los nuevos predictores evaluados en este estudio se basaron en una combinación del índice Niño 3 (el mejor predictor actual) y la OMJ.

Para reflejar la diversidad de los regímenes pluviométricos en el litoral, y para mejorar la utilidad práctica de lo analizado, el estudio se enfocará en tres regiones costeras: Chone, Guayaquil, Machala y sus cercanías, ubicadas en las provincias de Manabí, Guayas, y El Oro, respectivamente (Figura 1).

Chone, en el norte, está rodeado por las estribaciones de la cordillera costera. Guayaquil en cambio está situado al nivel del mar, en la cabecera del río Guayas. Machala, más al sur, está localizado entre las estribaciones de la cordillera de los Andes en el este y el canal de Jambelí (estuario externo del río Guayas) en el oeste. Las diferencias orográficas de las tres regiones las hacen útiles para la investigación de predicción climática a lo largo de una costa con un clima bastante variable. Además, las tres regiones representan intereses estratégicos para el Ecuador, siendo importantes centros de población economía, agricultura y acuicultura.

Bajo estas condiciones, el objetivo principal de la presente investigación es evaluar si existe un índi-

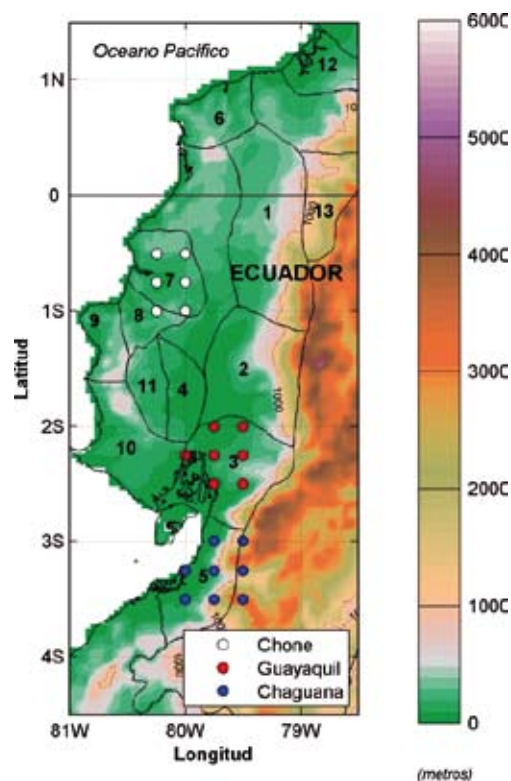


Figura 1. Zonas de precipitación homogénea, de acuerdo a Rossel *et al.*, 1998; y ubicación de los puntos de grilla usados en este estudio, de los cuales se extrajeron los datos de precipitación del producto GPCC.

ce que combine OMJ y Niño 3 que pueda mejorar la predicción de niveles de precipitación estacionales en localidades en la costa del Ecuador con orografía variable.

DATOS

Para la evaluación propuesta, se eligieron 22 series de tiempo de precipitación mensual que cubren tres regiones de la costa ecuatoriana (Chone, Guayaquil y Chaguana, Figura 2). Las regiones de variabilidad homogénea de precipitación en la costa ecuatoriana fueron definidas por Rossel (1998). Se obtuvieron las series del producto de precipitación GPCC Full Data Reanalysis Version 3 (Global Precipitation Climatology Center, Rudolf y Schneider, 2005). Se las interpoló linealmente a una resolución de 0.25° y se las validó con respecto a datos observados de la red de estaciones meteorológicas (Cedeño, 2008 y Cedeño y Cornejo-Grunauer, 2008). Estas series de tiempo corresponden a las variables dependientes en el esquema de análisis del WFCC y WTC, descrito más adelante.

Como variables independientes (predictores), se definió cinco índices en base a combinaciones lineales entre el índice Niño 3 y una variante de la OMJ, llamada desde ahora el índice-base OMJ. Debido a que la serie de tiempo base de la OMJ disponible

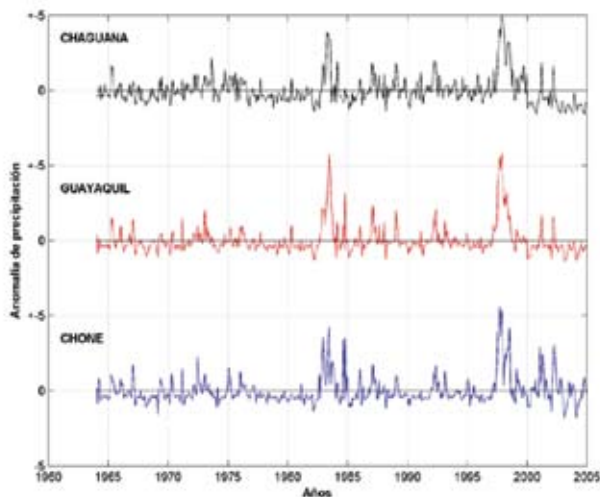


Figura 2. Vectores regionales de anomalías de precipitación correspondientes a las regiones Chone, Guayaquil y Chaguana.

desde el Buró de Meteorología de Australia (BoM) comienza en medios del 1974, y que las series de tiempo del GPCC vencen a fines del 2004, el período de evaluación fue definido entre los años de 1975-2004 (Figura 3).

El cálculo del índice-base OMJ se basó en la serie de tiempo de amplitud diaria de la OMJ desarrolla-

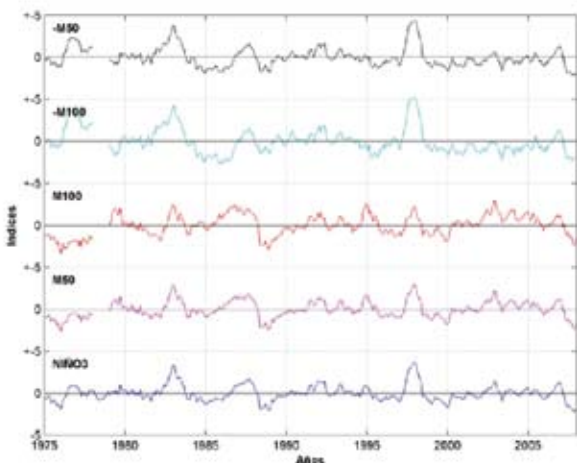


Figura 3. Índices climáticos utilizados como variables independientes.

do por Wheeler y Hendon (2004) y distribuida por el BoM. Esta amplitud es una medida de la intensidad de las dos primeras funciones empíricas ortogonales de variación en tres variables relacionadas con la OMJ, expresadas como índices multivariados RMM1 y RMM2. Se entiende que el valor de la amplitud de la OMJ tiene su máximo cuando hay una señal fuerte de la OMJ en algún sitio entre África y el Pacífico Oeste.

Para crear el índice-base de OMJ, se sumó para cada periodo mensual la amplitud diaria-cuadrada

de la OMJ, extrayendo luego las anomalías mensuales respectivas de estos valores según las siguientes expresiones:

$$s_{mes} = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (1) \quad m = \frac{s_{mes} - \overline{s_{mes}}}{\sigma_{mes}} \quad (2)$$

en donde a_i es la amplitud diaria del OMJ, n es el número de días en el mes indicado, σ_{mes} es la desviación estándar de los valores s del mes indicado, y m son los valores mensuales del índice-base OMJ. La derivación de este índice-base de OMJ se explica debido a que fue necesario convertir los datos diarios de la OMJ a mensuales, ya que existía la limitación de uso de series de tiempo de precipitación con frecuencia mensual para su análisis. Además, es la energía de la oscilación la que mide su impacto relativo en el comportamiento del océano y clima.

Los índices que se definió como variables independientes son definidos según las siguientes fórmulas (Tabla 1):

Tabla 1. Índices usados como variables independientes

Nombre de la variante	Formulación	Código design.
Niño 3	TSM promedio para el área de 150°W-90°W y 10°S-10°N.	Niño 3
Niño 3 y 100% OMJ	Niño 3 + OMJ	M100
Niño 3 y 50% OMJ	Niño 3 + 0.5*OMJ	M50
Niño 3 menos OMJ	Niño 3 - OMJ	-M100
Niño 3 menos 50% OMJ	Niño 3 - 0.5*OMJ	-M50

METODOLOGÍA

El programa EXEVER

El programa EXEVER (Alfaro *et al.*, 2002) permite realizar pronósticos estacionales de variables meteorológicas como precipitación, usando la teoría de los terciles. Para pronóstico en la costa de Ecuador usando índices del Pacífico central, su horizonte de pronóstico óptimo es de tres meses. El EXEVER contiene dos módulos desarrollados bajo ambiente MATLAB. La primera, denominada WFCC, permite calcular una Función de Correlación Cruzada (FCC) entre dos series de tiempo usando medias corridas (promedios móviles), basadas en el promedio normalizado de los productos de varianzas para varios rezagos, en donde se interpreta que para rezagos

negativos la variable independiente antecede a la variable dependiente:

$$c_{xy}[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} \frac{(x_i[t] - \bar{x})(y_i[t+k] - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$

en donde \bar{x} y \bar{y} son las medias muestrales; σ_x y σ_y son las desviaciones estándares de las series x y y de los variables independientes y dependientes, respectivamente, y k es el rezago elegido entre las series de tiempo.

El WFCC, además, calcula los niveles de confianza (90% y 95%) de este factor de correlación cruzada, definiéndolos como 1.645σ y 2.0σ , mientras σ^2 es el valor esperado del FCC en el caso de que los variables son ambos aleatorios y no correlacionados (Alfaro *et al.*, 2002). Un valor del FCC mayor de estos niveles de confianza permite rechazar la hipótesis que las series de tiempo no están correlacionadas.

El segundo módulo del EXEVER es el WTC, el cual construye la tabla de contingencia entre dos variables, además de calcular otros estadísticos que permiten evaluar el grado de asociación entre dos variables que se suponen correlacionadas positivamente o negativamente en el tiempo. Dado que el WTC fue desarrollado como herramienta para hacer pronóstico climático estacional, la utilidad práctica de sus salidas es una medida importante de la utilidad de nuevos predictores.

El cálculo de las tablas de contingencia toma como datos de partida los promedios móviles estacionales de las variables dependientes e independientes obtenidos desde el WFCC, los cuales son categorizadas en terciles: “bajo lo normal” (el tercio más bajo), “dentro del normal” (el tercio que contiene la mediana de los datos), y “alto de lo normal” (el tercio más alto). Después, despliega en forma de tabla el porcentaje de valores independientes de cada tercio que corresponden a años (1) bajo la normal (BN), (2) dentro de lo normal (DN), y (3) alto de lo normal (AN) de cada año (Figura 3). Cada observación tiene que pertenecer a una sola categoría (excluyentes) y las tres categorías agotan todas las posibilidades dentro de la “muestra” o conjunto de observaciones tomadas (Alfaro *et al.*, 2002).

Esta tabla ha sido útil en el pronóstico de niveles de lluvia porque permite extrapolar el patrón que existe entre dos series de tiempo hasta el año actual. Por ejemplo, si en los últimos años, se ve por la tabla de contingencia que un año con índice X bajo del normal, hay probabilidad de 55% de lluvias BN, 30% de lluvias DN, y 15% de lluvias AN, entonces se puede decir que las probabilidades de lluvias de cada nivel en el año actual son los mismos. La tabla de contingencia para esta extrapolación debe tener como

base unas series de tiempo de por lo menos 30 años, el periodo aceptado en climatología para la búsqueda de tendencias entre datos mensuales.

En el caso en que las variables no están correlacionadas, se espera que cada valor de la tabla sea de 33%, porque un tercio de los valores bajos de la variable independiente caerá en años BN de la variable dependiente, un tercio en años DN de la variable dependiente, y un tercio en años AN. En el caso de que las series de tiempo tengan una correlación positiva, se esperaría que los valores de la diagonal que va desde el extremo izquierdo superior al extremo derecha inferior sean altos. Exactamente lo opuesto – valores altos en la diagonal que discurre desde la izquierda a la derecha – se esperaría en el caso en que las series de tiempo tienen una correlación negativa.

Para medir el grado de divergencia entre las frecuencias observadas y esperadas (en base a la tabla de contingencia), el WTC también calcula el estadístico chi-cuadrado (χ^2), que permite evaluar que tanto se aleja una tabla de contingencia del caso aleatorio:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{(f_{ij} - 0.33)^2}{0.33} \quad (4)$$

El WTC también provee el nivel de significación del χ^2 , es decir, la probabilidad de que este valor no podría salir en el caso aleatorio, a partir de la distribución de valores posibles del χ^2 .

Sin embargo, el valor de χ^2 no indica el tipo de patrón encontrado en la tabla. Se pueden encontrar valores altos valores de χ^2 tanto en altas correlaciones (positiva y negativa), como en casos que no representan correlaciones como tales, pero que sí se desvían del esquema aleatorio esperado. Por eso, el χ^2 sirve solamente como medida de la utilidad de una tabla de contingencia cuando otros valores (de las diagonales y del FCC) también han sido analizados.

El Uso del Programa

El EXEVER, es decir, los programas WTC y WFCC, están construidas para correr aparte del ambiente de MATLAB. Sin embargo, también se incluye las rutinas correspondientes en lenguaje MATLAB. Esto permitió automatizar el proceso de obtención del FCC y de la tabla de contingencia, con las respectivas medidas de significación, para siete periodos temporales en cada data punto. Las variables independientes correspondieron a los promedios móviles de valores de tres meses de los índices climáticos, y las variables dependientes, a los promedios móviles de precipitación de los siguientes tres meses por punto de grilla. Los periodos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Periodos de evaluación de pronóstico

Meses del índice	Meses de precipitación
julio-agosto-septiembre (JAS)	octubre-noviembre-diciembre (OND)
agosto-septiembre-octubre (ASO)	noviembre-diciembre-enero (NDE)
septiembre-octubre-noviembre (SON)	diciembre-enero-febrero (DEF)
octubre-noviembre-diciembre (OND)	enero-febrero-marzo (EFM)
noviembre-diciembre-enero (NDE)	febrero-marzo-abril (FMA)
diciembre-enero-febrero (DEF)	marzo-abril-mayo (MAM)
enero-febrero-marzo (EFM)	abril-mayo-junio (AMJ)

Se eligió estos siete periodos porque la época lluviosa empieza en diciembre o enero y termina en abril o mayo. Por eso, la utilidad de un índice climático en predecir niveles de lluvia está determinada por su nivel de acierto en pronóstico para periodos que incluyen los meses entre diciembre y junio. Entre los periodos que solamente incluyen o uno o dos de estos meses, OND, NDE, y AMJ fueron incluidos, pero no MJJ. Esto se debió a que la utilidad de un pronóstico se basa más en predecir una estación cuando no ha empezado o apenas empezó, que en predecir las lluvias al final de la estación, las cuales normalmente siguen el patrón de inicio de la estación.

Métodos de Análisis

Para establecer la tasa de aciertos de los índices, en las tres localidades, para cada periodo mensual, se dividió el problema en dos partes: Primero se obtuvo un porcentaje de aciertos de la correlación cruzada para cada periodo, en cada localidad. Esto es el porcentaje de los puntos de grilla para cada localidad que tenían, en el periodo mensual elegido, un FCC que sobrepasó el nivel de significación 95%. De esta manera se seleccionó los índices que por lo menos tenían un nivel alto de correlación con las lluvias en años extremos (porque los años extremos pesan más en el FCC). Esto es el factor más importante en un predictor. Sin embargo, no mide su valor en la mayoría de los años, los cuales caen dentro de una desviación estándar del promedio. La segunda y más estricta medida, para medir el valor del pronóstico en años no extremos, fue el porcentaje de los puntos de grilla de cada localidad que lograron un alto nivel de significación del FCC, valores de significación de χ^2 superior al 80% y valores iguales o mayores de 33% en la diagonal de la tabla de con-

tingencia que transcurre de izquierda a la derecha. Esto permitió seleccionar los casos más distintos del caso aleatorio (por el χ^2) que tenían también la marca de correlación positiva (por la diagonal alta).

RESULTADOS

Los niveles de correlación fueron destacadamente mejores para periodos en que los meses pronosticados eran más secos, siendo el mejor pronóstico encontrado para el periodo EFM AMJ. Además, hubo correlaciones más altas en Machala que en Guayaquil, y en Guayaquil que en Chone. El índice M100 tuvo el desempeño más bajo de todos y, en algunas instancias, para pronosticar periodos relativamente secos, los índices M50, -M100, y -M50 sí lograron mejorar el pronóstico, encontrándose valores asociados altos de χ^2 y de la diagonal de la tabla de contingencia. Sin embargo, en términos generales el índice -M100 tuvo el mayor éxito en los pronósticos, por lo cual enfocaremos los resultados de sus salidas en este análisis.

Los índices Niño 3 y -M100 no lograron alcanzar un nivel de significación del FCC superior al 95% para los periodos SON DEF, OND EFM, y NDE FMA. Es decir, no correlaciones altas entre los índices y las series de tiempo de precipitación para los periodos en los cuales los tres meses pronosticados se situaron completamente dentro de la estación lluviosa. En Chone, los dos índices tampoco alcanzaron dicho nivel de significación para el periodo DEF MAM (Tabla 3).

En contraste, en cada punto de grilla de las tres regiones, el índice -M100 alcanzó un nivel de significación del FCC de 95% para los periodos JAS OND, ASO NDE, y EFM AMJ. Es decir, el factor de correlación cruzada entre índice y precipitación se mantuvo alto para los periodos en que por lo menos la mitad de la época pronosticada está dentro de la estación seca. Además, en Guayaquil y Chone, -M100 alcanzó los niveles referidos en todos los puntos de grilla para el periodo DEF MAM; no así Niño 3, que no consiguió tal nivel de significancia en al menos la mitad de puntos de grilla que conforman cada región.

En cuanto a valores altos del χ^2 y de la diagonal que correspondieron con valores altos del FCC, solamente se encontraron siete casos en que Niño 3 logró los tres aciertos en por lo menos uno de los puntos de grilla de la región.

En Guayaquil y Chaguana, -M100 alcanzó valores altos del χ^2 y de la diagonal en todos los puntos de grilla en el periodo de pronóstico EFM AMJ, mejorando la tasa de aciertos de Niño 3 por un punto en Guayaquil y tres en Chaguana. Dicho índice también tuvo una tasa de valores superiores al 75% durante DEF MAM en Chaguana.

Lo que más destacó fue la ausencia de niveles significativos altos de χ^2 y la diagonal para los periodos SON DEF, OND EFM, y NDE FMA, lo que se reflejó

también valores bajos de la FCC en aquellos periodos. Es decir, el pronóstico falló para los meses más lluviosos del año por cuanto sus niveles de FCC se mantuvieron bajos.

DISCUSIÓN

Los nuevos índices evaluados no sirvieron para mejorar consistentemente las perspectivas climáticas en comparación con los pronósticos estacionales ya existentes (mayormente basados en índices TSM). Sin embargo, la inclusión de la OMJ mejoró los pronósticos para el fin de la época lluviosa, sugiriendo que, por combinar nuevos índices con Niño 3, quizá se puede acercar a pronósticos cada vez más anticipados a la estación lluviosa. ¿Cómo se puede explicar este resultado?

Cuando la amplitud de la OMJ está alta, el índice -M100 tienen valores más bajos que Niño 3. Usualmente, esta señal trae niveles más bajos de lluvias. Asimismo, una amplitud baja de la OMJ hace que, en los índices -M100, la señal de Niño 3 aparezca más fuerte, lo cual normalmente trae niveles altos de precipitación. Este esquema es consistente con la observación de que, durante fenómenos El Niño, la amplitud de la OMJ es tan baja que apenas es notable. Esto también explicaría por qué los índices en estudio mejoraron la predicción al final de la estación lluviosa en Guayaquil y Chaguana, regiones en las cuales el clima se ve muy influenciado por lo que sucede en el mar circundante. En años Niño, la baja amplitud de la OMJ causaría que los índices restantes tengan valores altos, prolongando e intensificando la señal normalmente asociada con lluvias – consistente con los efectos de El Niño. Exactamente lo contrario ocurriría en años Niña: la señal de la OMJ sería normal o alto, o bajando o no afectando la señal

de Niño 3 al restar – consistente con la observación que, en los años Niña, a veces hay sequía y a veces no. Sin embargo, este esquema es muy simplificado, y no incluye los efectos de la fase de la OMJ (sólo su magnitud). Pero podría confirmar el supuesto patrón de OMJ en años Niño, y daría la flexibilidad necesaria para explicar el clima en años Niña.

¿Cuál sería el modo físico por el cual se den estos efectos? Se pensaría que una amplitud alta de la OMJ bien podría predecir niveles bajos de lluvias; no obstante, sería la causa de ondas Kelvin más fuertes, que llevarían más calor a la costa – consistente con el efecto opuesto (un incremento en la cantidad de lluvias). Lo opuesto se aplica para amplitudes bajas. La explicación más probable de esta aparente paradoja es que el valor del índice OMJ tres meses antes de los valores de precipitación no es el mismo que indica el periodo de la OMJ en el cual está afectando la costa durante el periodo de predicción. Por sus distintas fases, los efectos de la OMJ y los efectos de Niño no llegan a la costa al mismo tiempo. Entonces, un valor alto del índice OMJ podría corresponder a un valor más bajo de la respuesta oceánica a la OMJ llegando a la costa. Sin datos de precipitación de una frecuencia de por lo menos 20 días – necesarios para resolver una oscilación de aproximadamente 40 días – no se puede determinar adecuadamente estos efectos. Lastimosamente, las series de tiempo de la mayoría de los índices no tienen esa resolución.

La explicación propuesta motiva varias preguntas en cuanto a la relación entre la OMJ y ENOS. Por ejemplo, la amplitud de la OMJ normalmente tiene un máximo en el verano boreal, haciendo inverosímil que la influencia de la OMJ se vea reflejada en el pronóstico cuando los meses de los índices pertenecen al invierno boreal. Esta inconsistencia quizá sea

Tabla 3. Correlaciones en Chone, Guayaquil, y Chaguana para Niño3 (N) y -M100 (M). Porcentaje de (1) factores de correlación cruzada altos (alcanzando 95% significación) y (2) FCCs altos combinados con un X² y diagonal alto para los cinco índices y los seis puntos de grilla cerca de Chone

Periodo Mensual	% de puntos con N.S. alto (95%)						% con FCC, X ² , y diagonal alto					
	Chone		Guayaquil		Chaguana		Chone		Guayaquil		Chaguana	
	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M	N3	M
JAS OND	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00
ASO NDE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.00	0.86	0.00	0.13	0.13
SON DEF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OND EFM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NDE FMA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEF MAM	0.00	0.00	0.29	1.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.13	0.75
EFM AMJ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.17	0.86	1.00	0.63	1.00

debida a que la variabilidad estacional de la OMJ es más evidente en el Pacífico oeste que este (Zhang, 2005). También queda irresuelto cómo influyen otras fluctuaciones climáticas. La OMJ empezó a tener más influencia en el ciclo ENOS a partir de los noventa, cuando cambió la fase de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) desde su fase fría a la fase cálida (Barnett *et al.*, 1999). Reconociendo este problema, sin embargo tuvimos que escoger la inclusión de datos de ambas fases de la ODP para alcanzar el periodo de 30 años requisito para estudios climatológicos estacionales. Es evidente que el efecto de la ODP requiere más investigación.

Los resultados también tienen varias indicaciones interesantes aparte de su utilidad inmediata en pronóstico. En Chone, la falta de valores altos de χ^2 y el diagonal en EFM AMJ, aún cuando aparecen en Guayaquil y Chone, es consistente con la hipótesis que el clima de Chone no se explica por forzamiento remoto.

Además, la respuesta no homogénea de las regiones pluviométricas utilizadas en el estudio a los índices (habían instancias en las cuales la mitad de los puntos respondió a un índice, y la otra mitad no) atrae dudas en cuanto al esquema de regionalización definida por Rossel *et al.* (1998) para la costa ecuatoriana.

En cuanto al método de análisis utilizado, la automatización de los programas WTC y WFCC en MATLAB se comprobó como efectivo, facilitando en un futuro cercano la resolución de la multitud de preguntas dejadas abiertas por este y por otros estudios climáticos de la región.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue realizada con el soporte de la beca "Thomas C. Barry", la Universidad de Yale, y la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL.

REFERENCIAS

Alfaro E., F. Soley y D. Enfield (2002). Guía para el uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas. Ed. por FUNDESPOL-ESPOL, Guayaquil.

Barnett, T. P., D.W. Pierce, M. Latif, D. Dommengot y R. Saravanan (1999). Interdecadal Interactions Between the Tropics and Mid-Latitudes in the Pacific Basin. *Geophys. Res. Lett.* 26, 615-618.

Cedeño J. y M.P. Cornejo-Grunauer, 2008. Evaluation of Three Precipitation Products on Ecuadorian Coast. Presented as Poster at 3rd World Climate Research Program WCRP International Conference on Reanalyses, Tokyo, Japan. January 2008.

-----, 2008. Validación de Tres Productos de Precipitación en la Costa Ecuatoriana. Tesis de Grado de Oceanografía. FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

-----, T. De la Cuadra, K. Abata, M.A. Merizalde y M.P. Cornejo-Grunauer, 2006. Diagnóstico de Probabilidades de Lluvia Asociados a Eventos del Ciclo ENOS en la Costa Ecuatoriana. In: *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (Proceedings of 5th FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 369-374.

Coelho C.A.S. y D.B. Stephenson, 2005. Toward an Integrated Seasonal Forecasting System for South America. *J. Climate*, 19(15), 3704-3721.

Cornejo-Grunauer M.P., 1999. Variaciones Estacionales e Interanuales de la Climatología en la Zona Costera del Ecuador. Reporte Téc. FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

Donald A., H. Meinke, B. Power, A. de H.N. Maia, M.C. Wheeler, N. White, R.C. Stone y J. Ribbe (2006). Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.

Enfield D., E. Alfaro y J. Soley, 2003. Principios de Pronósticos Climáticos Estadísticos. Presentación Oral en el 3^{er} Foro de Perspectivas Climáticas de la Costa Oeste del Pacífico Sur (COF3-WCSA). Guayaquil, Ecuador, noviembre 2003.

Madden, R.A., y P. R. Julian, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* 28, 702-708.

---- y ---., 1994. Observations of the 40-50-Day Tropical Oscillation-A Review. *Mon. Wea. Rev.* 122(5), 814-837.

Martínez R., Á.G. Muñoz y M. Paredes, 2008. Progress on Seasonal Prediction in the Andean Region. Oral Presentation at 4th Alexander von Humboldt International Conference, The Andes: Challenge for Geosciences. Santiago de Chile, Chile, November 2008.

Nieto J., 2007. Modelo de Regresión Lineal Múltiple para Determinar Influencias del Índice Niño 1+2 y la MJO sobre las Precipitaciones en Guayaquil durante Enero-Febrero-Marzo y Abril. *Acta Oceanográfico del Pacífico* 14(1), 25-30.

Rossel F., 1997. Influencia de El Niño sobre los Regímenes Hidro-Pluviométricos del Ecuador. Serie Inundaciones y Sequías INSEQ, INAMHI-ORSTOM, Volumen 18, Tomos 1, 2 y 3.

Rossel F., R. Mejía, G. Ontaneda, R. Pombosa, J. Roura, P. Le Goulven, E. Cadier y R. Calvez, 1998. Régionalisation de l'influence du Niño sur les précipitations de l'Equateur. *Bull. Inst. Fr. Études Andines* 27(3), 819-827.

Rudolf B. y U. Schneider, 2005. Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using

in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey October 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.

Silva G., 1992. Análisis de la Variabilidad Climática de la Zona Costera Ecuatoriana utilizando Componentes Principales. Tesis de Grado de Oceanografía, FIMCM-ESPOL. Guayaquil.

Vuille M, RS Bradley, F. Keimig, 2000. Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *J. Climate* 13(14), 2520-2535.

Waliser D.E., K. M. Lau, W. Stern, y C. Jones, 2003. Potential Predictability of the Madden-Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84, 33-50.

Wheeler M. y H. Hendon, 2004. An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index; Development of an Index for Monitoring and Prediction. *M. Weather Rev.* 132, 1917-1932.

Zavala-Garay J., C. Zhang, A.M. Moore y R. Kleeman, 2005. The Linear Response of ENSO to the Madden-Julian Oscillation. *J. Climate* 18(13), 2441-2459.

Zhang C., 2005. Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.* 43, RG2003, doi: 10.1029/2004RG000158.

**ASSESSING AND MITIGATING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE & HUMAN
ACTIVITIES ON GROUNDWATER QUANTITY AND QUALITY
OF THE GUARANI AQUIFER IN RIBERAO PRETO, BRAZIL***

**RELEVAMIENTO Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
Y ACTIVIDADES HUMANAS EN LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA
SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO GUARANI EN RIBEIRÃO PRETO, BRASIL**

Henrique Marinho Leite Chaves¹

Abstract

The Guarani aquifer is one of the largest sources of good quality groundwater in the world, underlying 4 South American countries. In areas such as the city of Ribeirao Preto (Brazil), the aquifer is being used intensively in the last 30 years, which has caused a drawdown of over 60m. Furthermore, many of the aquifer's recharge areas are being used extensively with intensive agriculture, which could lead to groundwater contamination. In addition to these human impacts, there are also the threats of climate change, which could increase the risks to the aquifer's sustainability in the future. The objectives of the present paper were to quantify the present risks to groundwater quantity and quality, and to assess the risks associated with population growth and climate change in the next 50 years. The selected area was a polygon of 2,500 km² around the city of Ribeirao Preto, and the scenarios analyzed were those related to the best and worst-case conditions, as well as an intermediary (trend) scenario, for both population and climate. As far as water quantity is concerned, the decreasing groundwater recharge due to climate change and the increasing demand (pumping) in the urban area of Ribeirao Preto could lead to the total depletion of the groundwater around the year 2050. The particular geological setting, reducing the regional groundwater fluxes, contributes to this scenario. However, in 2007 about 65% of the groundwater volume still remained unused, which allows for the implementation of a sustainable groundwater management. As for groundwater quality, a contamination risk analysis, which is function of the area vulnerability and potential of contamination of the agricultural areas, indicates that 90 km² of the recharge area present high risk to contamination. Mitigation and adaptation measures were then suggested to the impacts to groundwater quantity and quality. The most viable were the utilization of supplementary water from the Pardo river, and the use of environmentally friendly pesticides, respectively.

Resumen

El acuífero Guaraní es uno de las más grandes fuentes de agua subterránea de buena calidad en el mundo, ubicado en 4 países sudamericanos. En regiones como la ciudad de Ribeirão Preto (Brasil), el acuífero viene siendo utilizado intensamente en los últimos 30 años, lo que ha causado una caída de más de 60 m. Además, muchas áreas de recarga del acuífero vienen siendo utilizadas con agricultura intensiva, la cual podría llevar a su contaminación. Existen también riesgos de cambio climático, que podrían aumentar los riesgos de sostenibilidad del acuífero en el futuro. Los objetivos de este trabajo fueron cuantificar los riesgos actuales a la cantidad y calidad de agua y estimar los riesgos relativos al aumento de la población y cambio climático en los próximos 50 años. El área seleccionada para el estudio fue un polígono de 2.500 km² alrededor de la ciudad de Ribeirão Preto, y las condiciones analizadas fueron aquellas relativas al mejor y peor escenario, y un escenario intermedio, para la población y clima. En términos de cantidad de agua, la disminución de la recarga por el cambio climático y por el aumento del bombeo (demanda) en la zona urbana podría llevar a una depleción del agua subterránea en el año 2050. La situación geológica particular del acuífero local, reduciendo el flujo de agua subterránea regional, contribuye a la tendencia de reducción. Entretanto, como el 65% del volumen del agua subterránea no había sido utilizado todavía en 2007, aún es posible manejarla visando su sustentabilidad futura. En términos de calidad del agua, un análisis de riesgo, basado en la vulnerabilidad y el potencial de contaminación de las áreas agrícolas, indicó que 90km² del área de recarga presentan alto riesgo de contaminación. Medidas de mitigación y adaptación fueron entonces sugeridas para la gestión del acuífero. Las medidas identificadas como más viables fueron el uso suplementar de agua del río Pardo (cantidad) y el uso de pesticidas de menor impacto (calidad).

INTRODUCTION

The Guarani aquifer is one of the largest sources of groundwater in the world. Although it presents high volumes and water yields, there are risks to its sustainability, particularly when pumping rates are higher

than its natural recharge, and unsuitable land uses lie over sensitive recharge areas.

When those two impacts occur simultaneously, the risks increase. Furthermore, there is the potential impact of climate change, which could add even more risk to the aquifer sustainability.

* Article presented at the Unesco's Conference on Water & Global Change, Montevideo, September 2008.

¹ Professor of Watershed Management, Faculdade de Tecnologia-EFL, Universidade de Brasília-UnB, Brasília-DF, Brazil
hchaves@unb.br

Those potential impacts exist in the region of Ribeirao Preto (Brazil), where a fast-growing agribusiness-based economy increasingly demands more water, and where sensitive groundwater recharge areas are being intensively farmed with sugar-cane.

In the urban area of Ribeirao Preto, which is supplied exclusively by groundwater from the Guarani aquifer, the overdraft has caused a significant drawdown of the original groundwater level in a period of 50 years (FIPAI, 1996).

The risks of groundwater contamination are also present. The high vulnerability of coarse-textured soils to pesticide and mollasse leaching, and the intensive farming of sugar cane in recharge areas could lead to a serious groundwater contamination in the future.

The objectives of this paper were three-fold: i) to examine the risks of groundwater depletion in the city of Ribeirao Preto, ii) to evaluate the risk of groundwater contamination of the Guarani recharge areas, and iii) to identify adequate adaptation and mitigation measures to reduce those risks.

Different scenarios were analyzed: a) the population and climate trend for the next 50 years, b) the best-case scenario (population & climate), and c) the worst-case scenario.

METHODOLOGY

Description of the Study Area

The study area was a polygon of 2.500 km² around the city of Ribeirão Preto (Brazil), which included

other 11 small cities. Geologically, the study area is comprised by the sandstones of the Bauru, Botucatu and Piramboia formations (Guarani aquifer), covered by the Serra Geral formation (basalt).

The soils are deep, well drained Oxisols (red latosols) and inceptisols (yellow-red latosols). The groundwater recharge areas are zones where the Botucatu and Piramboia formations surface in the landscape, particularly in the eastern part of the study region. Figures 1 & 2 show the geology and recharge zones of the study area, and Figure 2 shows the main soil classes.

The major land uses in the study area include sugar cane crops (80% or 2.000 km²) and urban areas 15% or 400 km²), as seen from Figure 4.

The total population of the study area, including the city of Ribeirão Preto and other 10 smaller cities, was 813.000 inhabitants in 2007, mostly concentrated in the urban areas. The monthly potable water consumption in the study area in 2007 was 7.8 million m³.

The city of Ribeirão Preto, located in the center of the study area (Figure 2, right), with 572.000 inhabitants in 2007, is totally supplied with groundwater from the Guarani aquifer. There are about 300 deep wells in the urban area, pumping about 10 million m³/month of groundwater.

The natural groundwater recharge, however, is only about 580.000 m³/month or about 6% of the water use (COPLAN, 2004), indicating a serious over pumping. Additionally, the city lies in a valley, where the watershed boundary coincides with the groundwater di-

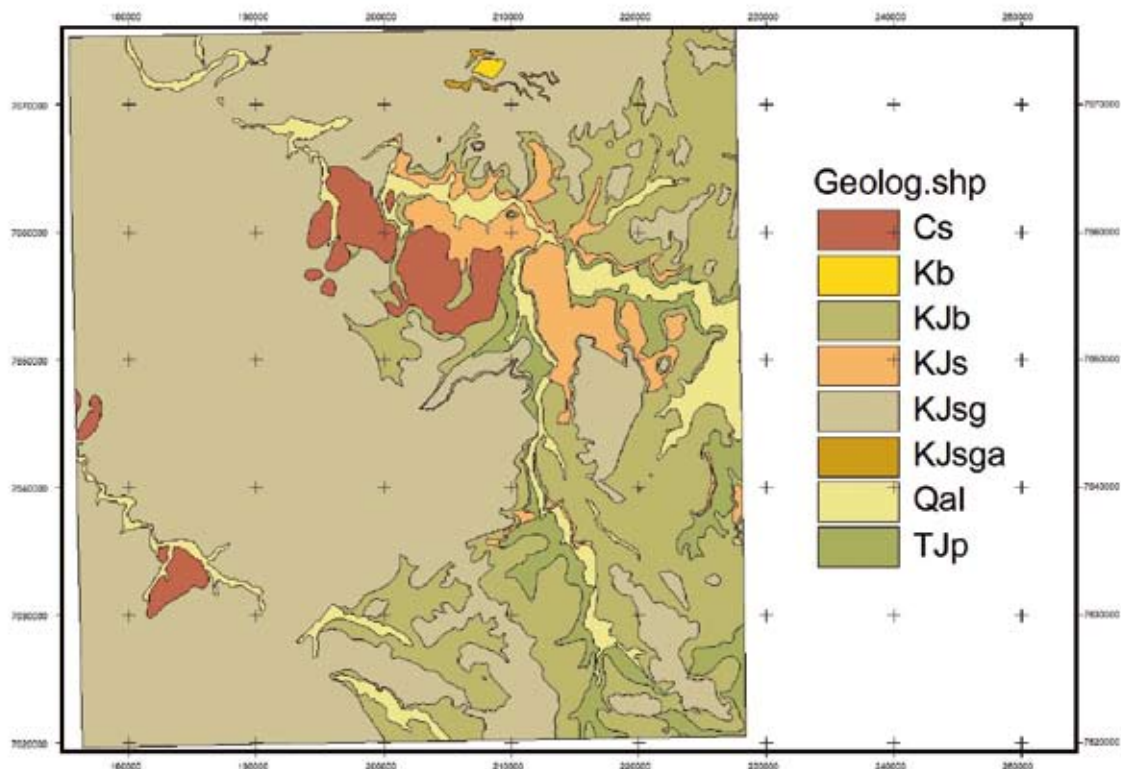


Figure 1. Geology of the study area (Source: Sinelli et al (1973))

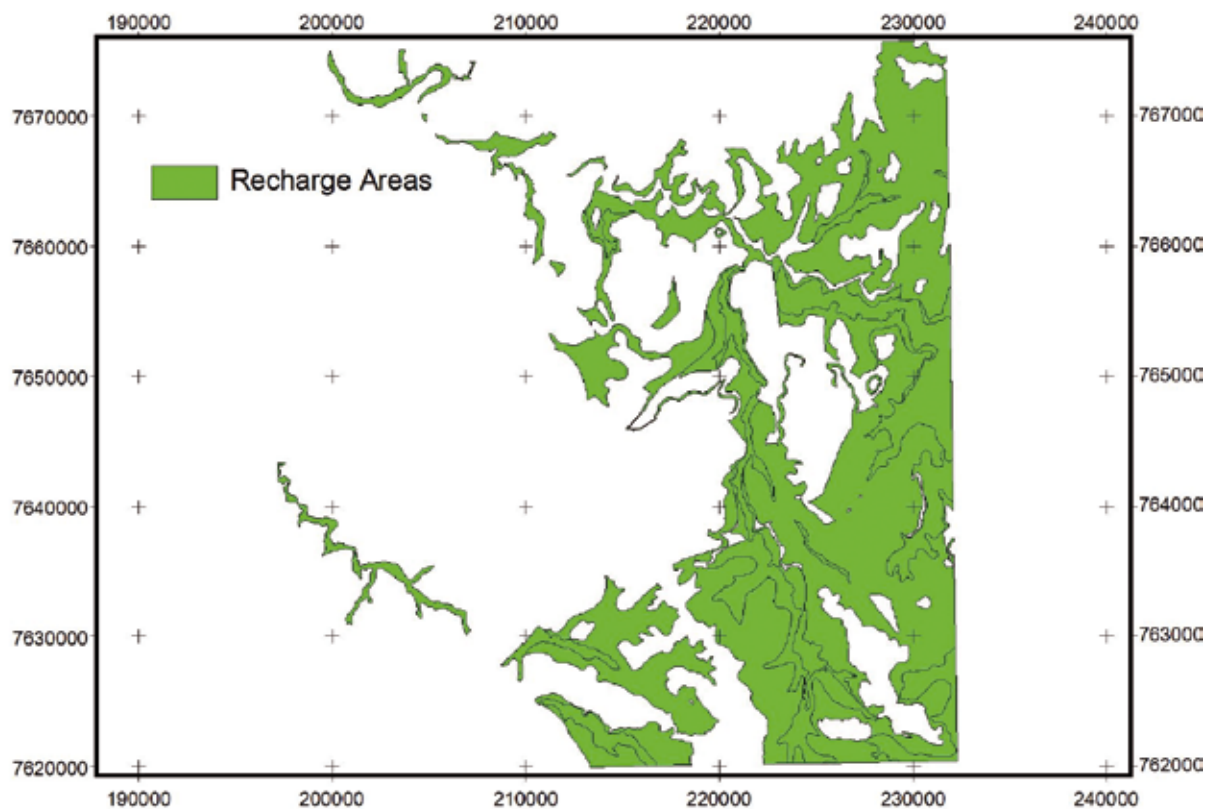


Figure 2. Recharge zones of the study area

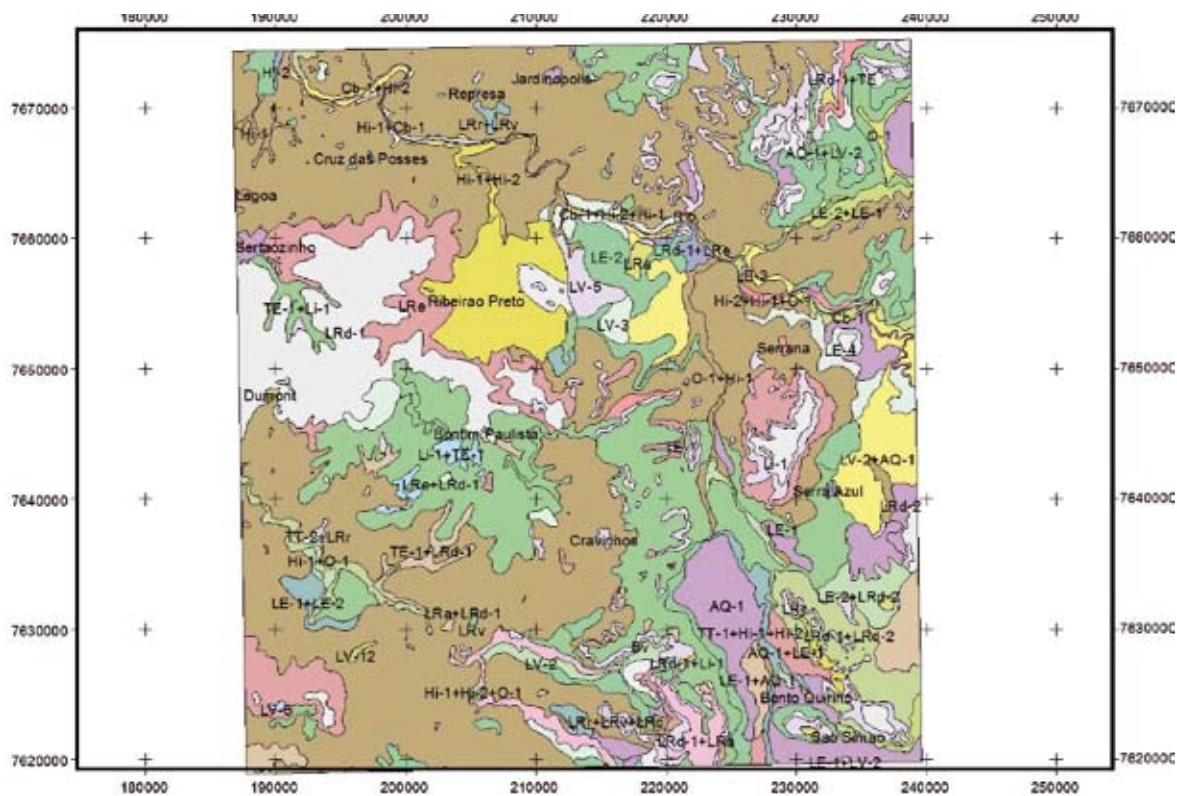


Figure 3. Soils of the study area. Source: Oliveira & Prado (1987)

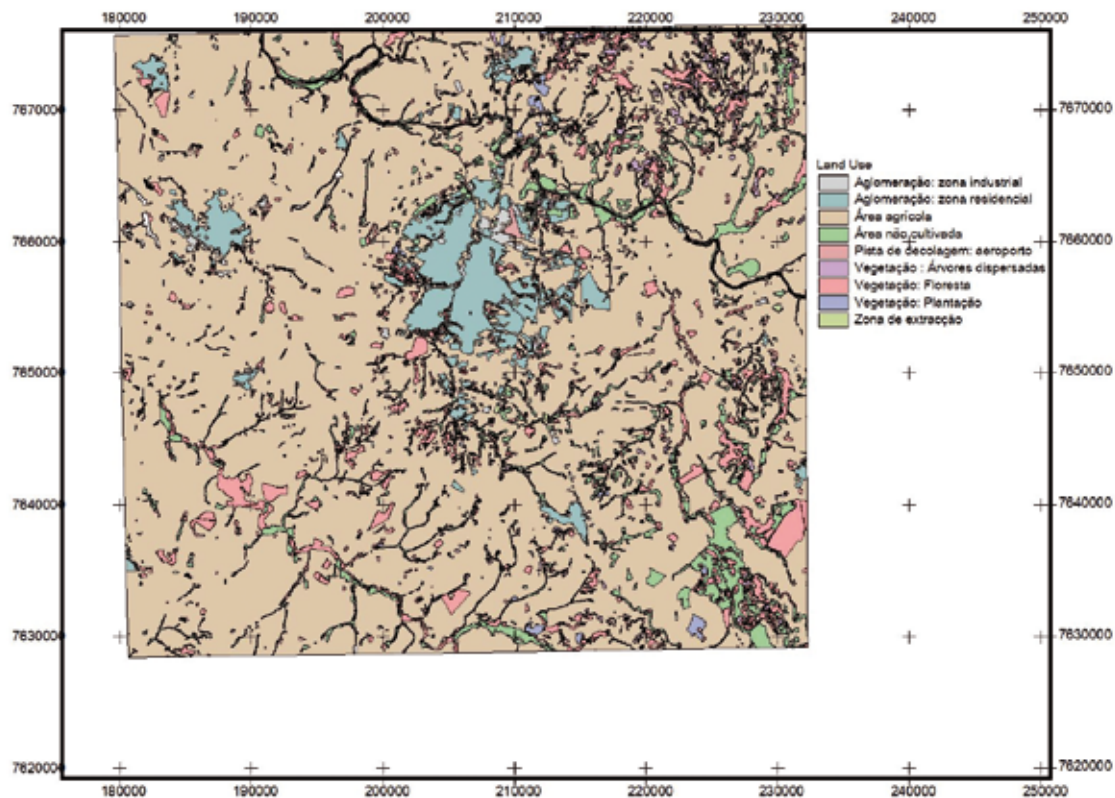


Figure 4. Land use in the study area. Agricultural areas are shown in brown

vide, reducing the lateral fluxes of groundwater from the recharge zones.

Population and Climate Change Scenarios

In order to evaluate the impacts to groundwater quantity and quality in the next 50 years, projections of population growth and climate change were established, considering the present trend, best case, and worst case scenarios.

In the case of the population, the trend obtained in the last 30 years (IBGE, 2008) was extrapolated. The best-case scenario was that of the tendency line less 10%, and the worst-case scenario was the future trend plus 10%. The climate change scenarios were the IPCC's (2008) B2 (best-case), A2 (worst-case), and intermediate (average between A2 and B2) scenarios, respectively.

The temperature increases forecasted by Ambrizzi et al (2007) for the study area in the 3 above mentioned scenarios were then used to compute the water excess curves, using Salatti et al (2007) projections for the nearby city of Piracicaba.

According to Ambrizzi et al (2004), yearly average temperatures are expected to increase by 3°C, 2,5°C and 3,5°C by 2080, in the most probable, best-case, and worst-case scenarios, respectively. Those temperature increases were then applied to the water excess function developed by Salati et al (2007) to estimate the expected change in groundwater recharge in the study area (Figure 5).

According to Figure 3, groundwater recharge in Ribeirao Preto will be reduced by about 17% in 2050, with respect to the year 2000, due mainly to temperature increase.

As for the population and water consumption change between 2000 and 2050, they are presented Figures 6 and 7, for the three selected scenarios. According to those figures, the total population and the water consumption will increase significantly.

Analysis of the Depletion Risk of the Guarani Aquifer in Ribeirao Preto

Due to the confinement of the overlying basalt, and to the eastern and western groundwater divides, the Guarani aquifer under the city of Ribeirao Preto presents a low transmissivity. Consequently, it is subject to depletion, particularly if the pumping rates exceed the groundwater recharge rates.

The risk of depletion of the Guarani aquifer in the city of Ribeirao Preto was estimated with the production frontier approach (Pearce, 1976). This approach allows the estimation of the remaining groundwater volume at the time $t+1$ based on the estimated based on the initial quantity Q , the pumping rate (p) and the recharge rate (r) (Figure 8).

The initial exploitable volume Q under the city of Ribeirao Preto was estimated to be 10,8 billion m^3 in 1950 (Fipai, 1996), the time when groundwater began to be pumped from the aquifer. The depletion risk was assumed to the tangent of the slope angle

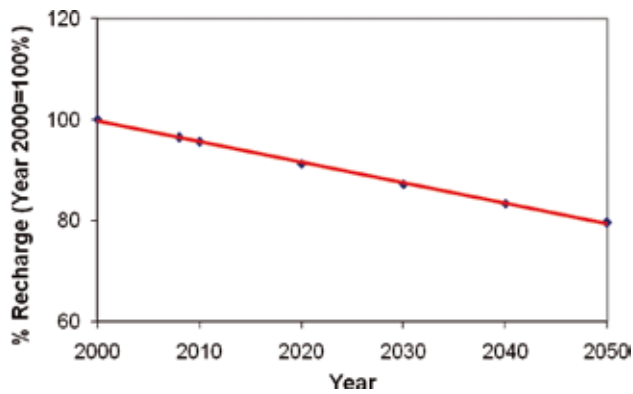


Figure 5. Reduction in groundwater recharge between 2000 and 2050 in the study area (scenario B2)

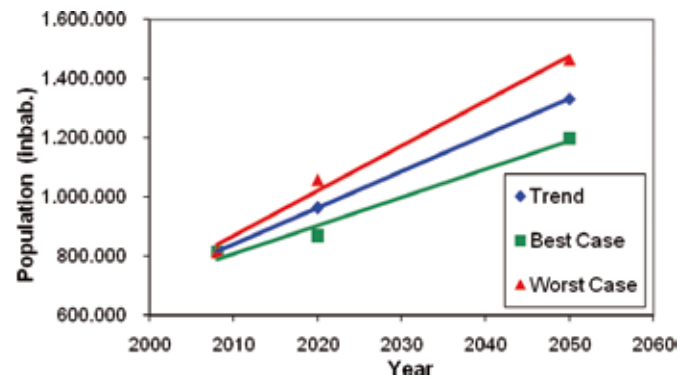


Figure 6. Population trends in the different scenarios, for the study area

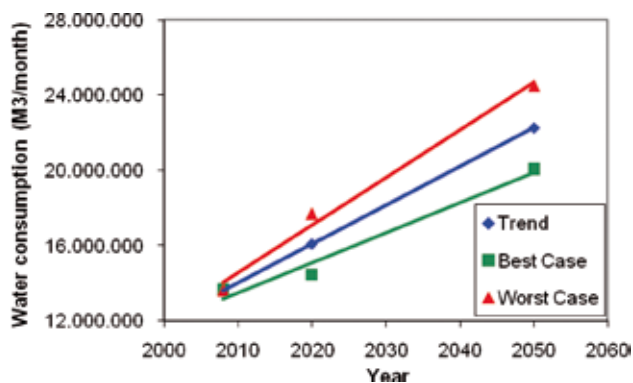


Figure 7. Trends in water consumption in the different scenarios, for the study area

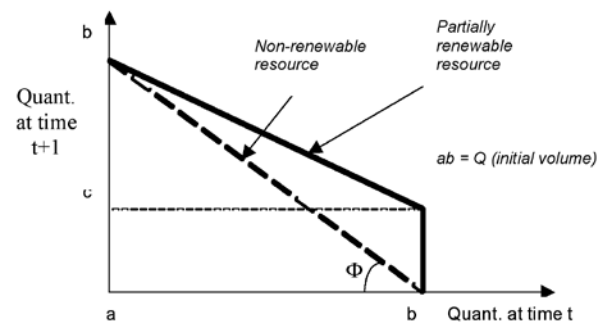


Figure 8. Production frontier of non-renewable resources (Adapted from Pearce, 1976)

(Φ) of the production frontier, as shown in Figure 8. The steeper the slope of the production frontier, the higher the risk, and vice-versa.

Vulnerability and Risk of Contamination of the Guarani Recharge Areas

In addition to the risks of groundwater depletion in the urban zones of the study area, there are risks related to the contamination of the aquifer by pesticides, particularly in the vulnerable recharge areas.

The contamination risk (R_c) was defined as the product of the contamination vulnerability (V), which is a function of the natural soil and geologic conditions, and the contamination potential (C_p), which is related to the characteristics and load of the contaminant (Foster & Hirata (1988):

$$R_c = V \cdot C_p \quad [1]$$

The vulnerability of the recharge area was estimated by the product of the soil clay content (%C), the soil permeability (Perm), and the soil depth (D) (Chaves, 2008):

$$V = \%C \cdot Perm \cdot D \quad [2]$$

Each of the factors of equation 2 varies from 1 to 3, based on their minimum and maximum values, and

therefore V varies from 1-27. Tables 1 and 2 present the levels of the factors and vulnerability of equation 2, considering the soils of the study area.

Although equations 1 & 2 are very simple, they are good indicator about the vulnerability of the aquifer recharge areas.

The contamination potential (C_p) was estimated by the product of the pesticide application volume (Vol, in L), the pesticide toxicity (T), with toxicity classes varying from 1-4, established from the pesticide LD_{50} in mice, and the groundwater ubiquity score (GUS), the latter defined by Gustafson (1991):

$$C_p = Vol \cdot T \cdot GUS \quad [3]$$

Where:

$$GUS = \log_{10}(t_{1/2}) \cdot [4 - \log_{10}(K_{oc})] \quad [4]$$

In equation [4], $t_{1/2}$ is the half-life (in days) of the pesticide, and K_{oc} = soil and organic matter adsorption coefficient (l/kg). Equations 3 and 4 were applied to the herbicides, which are the pesticides most used in the study area.

After the numerical product of pesticide i in equation 3 is obtained, it was normalized, i.e., $C_p = (C_{p_i} - C_{p_{min}}) / (C_{p_{max}} - C_{p_{min}})$, and divided into 3 classes (low, me-

dium and high contamination potentials), spanning the range of C_p .

The contamination risk (R_c), which is the product of the vulnerability (V) and the contamination potential (C_p) was classified in three levels, namely, low, medium and high (Table 3).

The next step was to map the study area with respect to contamination vulnerability, contamination potential and contamination risk, based on the soils and land use of the recharge zones, as well as equations 1, 2 & 3 and tables 1, 2 & 3.

Mitigating the Impacts to Groundwater Quantity & Quality in the Study Area

In order to mitigate the potential impacts to groundwater quality and quantity in the study area, appropriate measures were identified and evaluated, considering their socioeconomic and environmental feasibility.

The socioeconomic and environmental feasibility F was estimated using a simple optimization approach (see Turban & Aronson, 1998), where the indicators were the environmental risk (R) of the measure, its social impact (S), and its cost (C). The most viable measure was that that minimized the product:

$$F = R \cdot S \cdot C \quad [5]$$

subject to the following constraints:

$$R < \rho, S < \sigma, C < \chi \quad [6]$$

where ρ , σ , χ are maximum acceptable values for R , S and C , respectively. The details of the optimization model [5, 6] are described in detail in Chaves (2008).

The environmental risk parameter for groundwater quantity was the slope of the groundwater production frontier ($\tan \Phi$ of Figure 5), the social impact parameter was the reciprocal of Marshall's consumer surplus function, and the cost parameter was the alternative cost, considering implementation, its operation and maintenance.

Among the measures considered for reducing the risk to groundwater depletion in the city of Ribeirao Preto were the use of water from the nearby Pardo river and the use of well fields in the less developed rural areas.

In the case of the reduction of the risks to the contamination of the recharge areas, the measures considered were the protection of vulnerable areas and the use of pesticides with less contamination potential, using the philosophy of the Water Provider Program (Chaves et al, 2004). In that program, the contamination abatement is estimated by the following function:

$$C_a = 100 [1 - (C_{p1}/C_{p0})] \quad [7]$$

where C_a = % of contamination abatement, C_{p1} = contamination potential using BMPs, and C_{p0} = con-

Table 1. Vulnerability factors and values for the soils of the study areas.

Soil Type	%C	Level	Perm.	Level	D	Level	Vuln.	Level
Psaments (Neossolo)	Low	3	High	3	High	1	9	High
Brunizém averm. (Chernossolo)	High	1	Low	1	Medium	2	2	Low
Inceptisol (Cambissolo)	High	1	Low	1	Low	3	3	Medium
Hapludalf (Gleissolo)	Medium	2	Medium	2	Low	3	12	High
Red Oxisol (Latosolo verm. Escuro)	Medium	2	High	3	High	1	6	Medium
Clayey oxisol (eutrof.)	High	1	Medium	2	High	1	2	Low
Yellow-red clayey oxisol (Latosolo verm. amarelo arg.)	High	1	Medium	2	High	1	2	Low
Loamy Oxisol (Latosolo verm. amar. text. méd.)	Medium	2	Medium	2	High	1	4	Medium
Litholic (Neossolo)	Medium	2	Medium	2	Low	3	12	High
Eutrox (terra roxa)	High	1	Medium	2	High	1	2	Low

tamination potential without the BMPs. Cp_0 and Cp_1 are estimated by equation [3], and depend on the volume, toxicity and GUS of the pesticide package used in the farm.

Table 2. Classes of vulnerability to contamination of the recharge areas.

Result	Vulnerability
1-2	Low
3-8	Medium
9-27	High

Table 3. Groundwater contamination risk and its levels.

Cont. Pot. (Cp)	Vulnerability (V)		
	Low (1)	Medium (2)	High (3)
Low (1)	Low (1)	Low (2)	Medium (3)
Medium (2)	Medium (2)	Medium (4)	High (6)
High (3)	High (3)	High (6)	High (9)

RESULTS

Analysis of the Depletion Risk of the Guarani aquifer under Ribeirão Preto

The groundwater depletion risk of the Guarani aquifer in the city of Ribeirao Preto was analyzed using the three population and climate change scenarios, as well as the extraction and recharge rates under the same scenarios. Figures 9, 10, and 11 present the groundwater depletion risks, given by $\tan(\Phi)$, for the most probable, best-case and worst-case scenarios, respectively.

As seen from Figures 9, 10 and 11, the expected depletion years for the Guarani aquifer water under Ribeirao Preto were 2052, 2056, and 2048, for the most probable, best-case and worst-case scenarios, respectively, corresponding to the values of 1,48, 1,35 and 1,63 for $\tan \Phi$, respectively.

In another study, where the climate and population scenarios were not analyzed, it was concluded that the aquifer depletion in the city would occur in 2100 (Fipai, 1996). Another indication of the gravity of the problem is that the drawdown of the aquifer below the city center was over 60 m in 2007, causing the drying if many deep wells (Coplan, 2002).

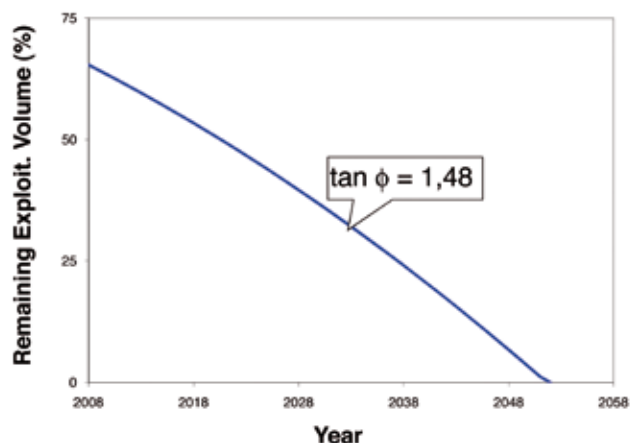


Figure 9. Production frontier for the Guarani aquifer in R. Preto between 2008 and 2050 in the most probable scenario (volume in 1950=100%)

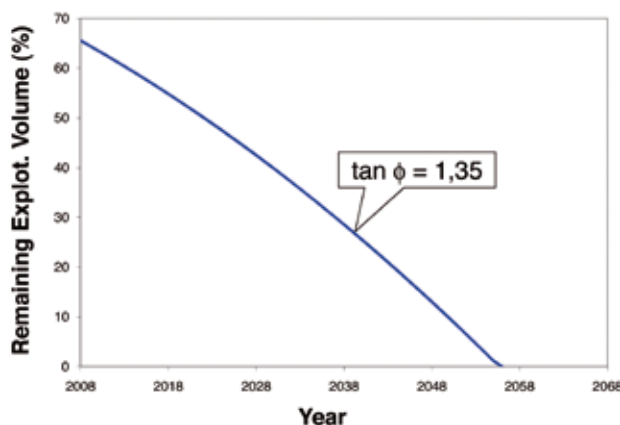


Figure 10. Production frontier for the Guarani aquifer in R. Preto between 2008 and 2050 in the best-case scenario (volume in 1950=100%)

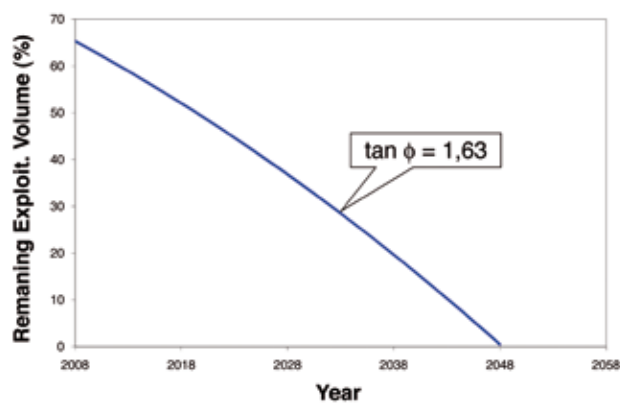


Figure 11. Production frontier for the Guarani aquifer in R. Preto between 2008 and 2050 in the worst-case scenario (volume in 1950=100%)

The good news is that in 2008 more than 65% of the original aquifer volume still remained unexploited, allowing for its conservation in the coming years.

Analysis of the Risk of Contamination of the Recharge Areas

Figure 12 below presents the vulnerability of the recharge zones of the Guarani aquifer in the study area, as estimated by equation 2 and Table 2. In figure 9, 39,5% of the recharge area presented low vulnerability to contamination, 39,2% medium vulnerability, and 29,6% high vulnerability.

The contamination potential (C_p , equation 3 and 4) for the pesticides used in the study area (mostly sugar cane plantations) is presented in Figure 13 below.

According to Figure 10, there are 3 herbicides with high contamination potential ($C_p=3$), 4 with medium potential ($C_p=2$) and 5 with low potential ($C_p=1$). A weighed average of C_p and the number of pesticides in each level yielded an average value of $C_p \approx 2$ for sugar cane.

Overlaying the vulnerability of the recharge zone by the agricultural (dominantly sugar cane) land use, and applying equation 1 and table 3, the map of risk to contamination was obtained, and is presented in Figure 14 below.

In Figure 14, there are 89,2 km² of areas with high risk of contamination, 105,6 km² of areas with medium risk, and 155,1 km² of areas with low risk. The areas of high contamination risk are associated with vulnerable soils and with a medium contamination potential, suggesting that if sugar cane is to be grown in those areas, pesticides with lower C_p are required.

Evaluation of the Feasibility of the Measures to Reduce the Risks to Groundwater Sustainability in the Study Area

In order to reduce the risk of groundwater depletion in the city of Ribeirão Preto, the measures evaluated were the utilization of supplementary water from the Pardo river, water harvesting and utilization in new condominiums, and the establishment of well fields in the rural areas of the city, away from the depression cone area. Table 4 presents the socioeconomic feasibility of the water quantity measures for the city of Ribeirão Preto, and their overall ranking.

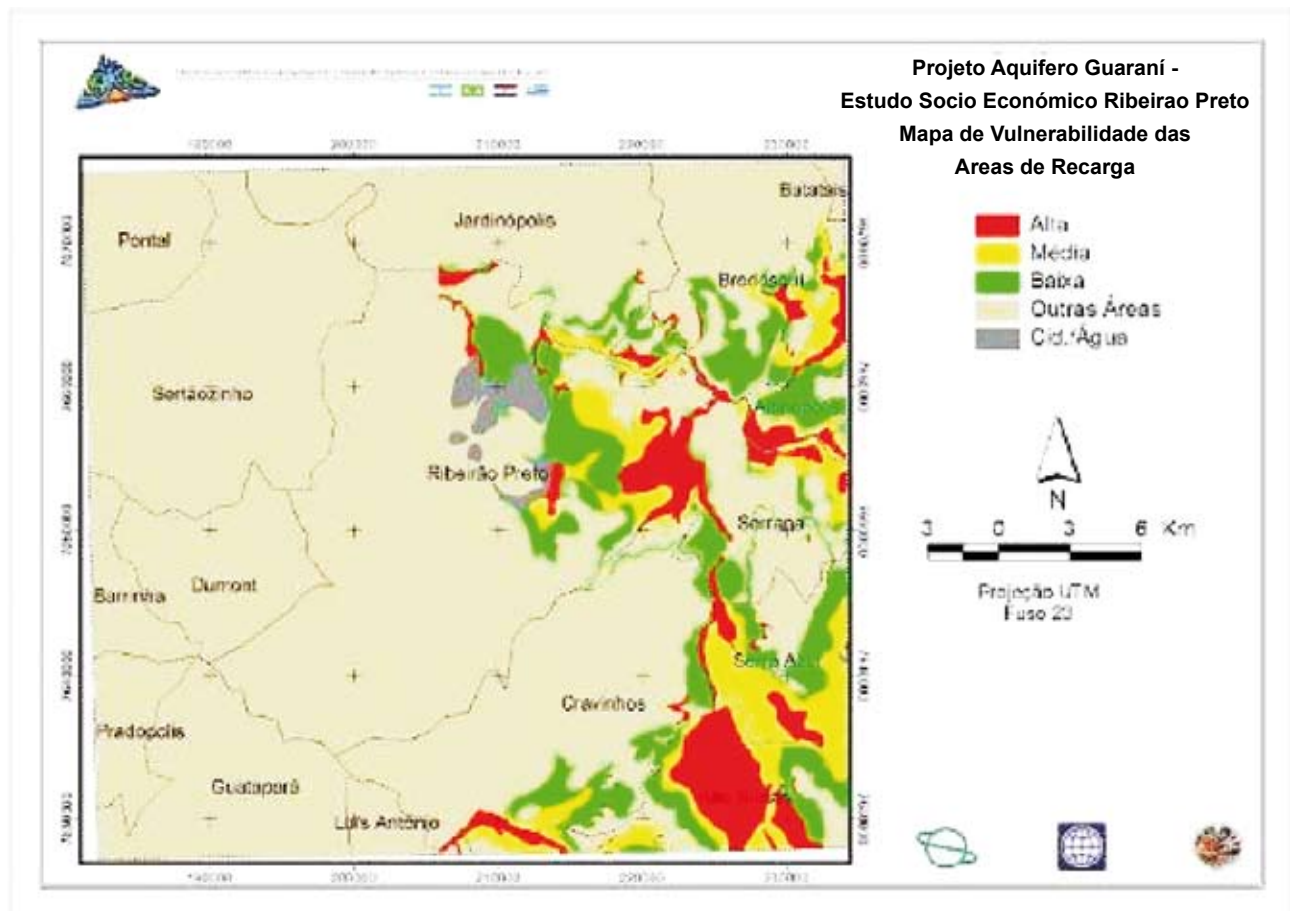


Figure 12. Vulnerability of the recharge zone of the Guarani aquifer in the study area (red=high, yellow=medium, green=low).

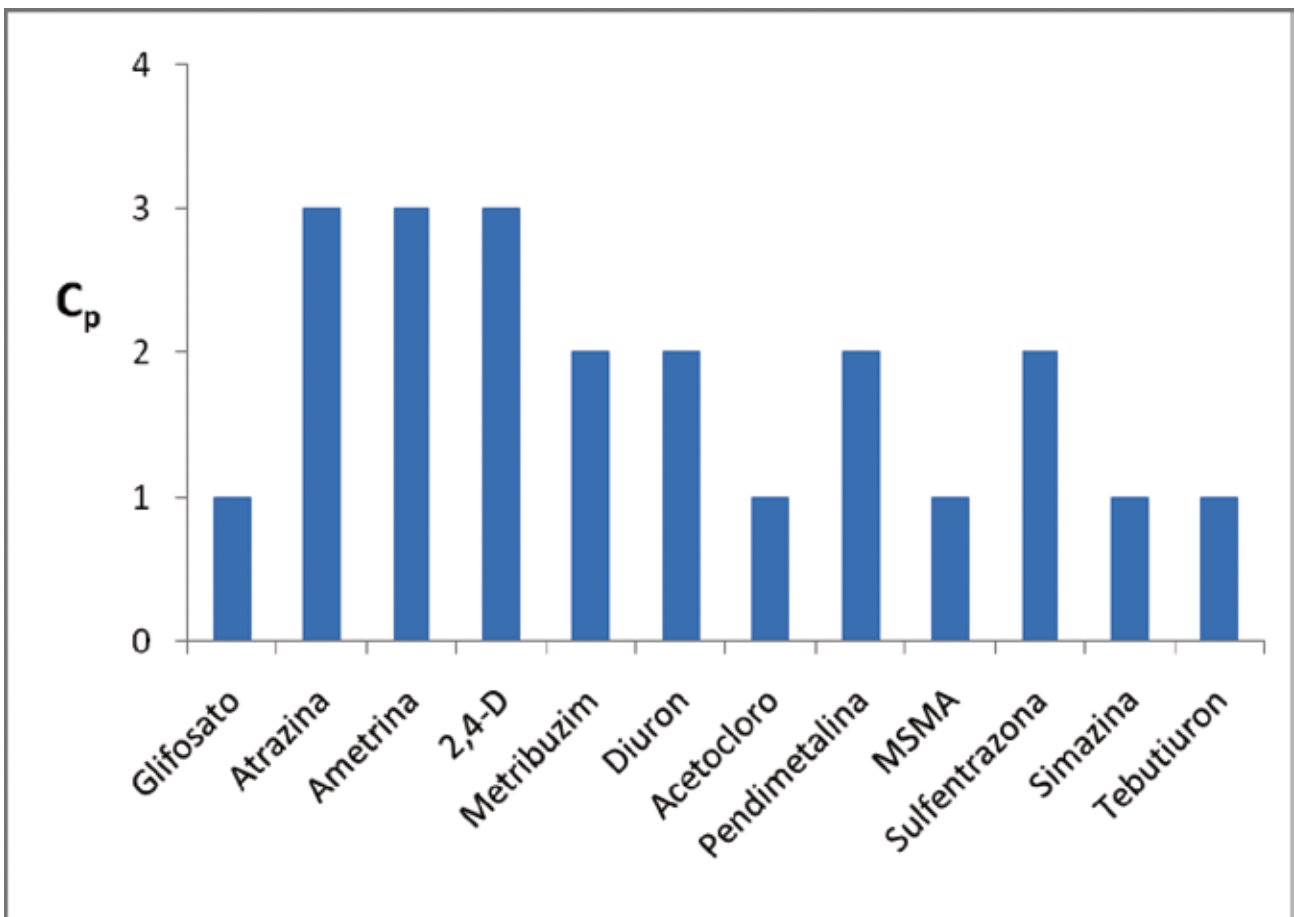


Figure 13. Contamination potential of the pesticides in the study area.

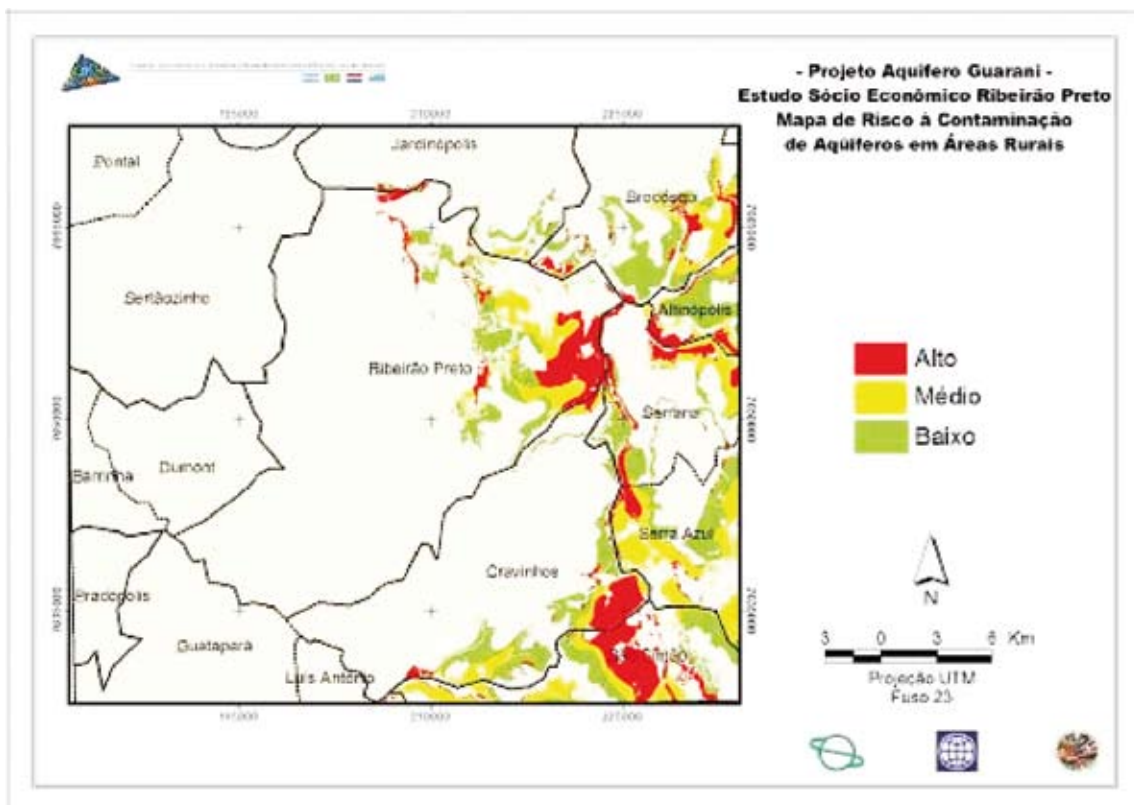


Figure 14. Risk of contamination of the recharge areas by pesticides

Table 4. Socioeconomic feasibility and ranking of alternatives for reducing the risk of groundwater depletion in the city of Ribeirao Preto

Indicator		Alternative		
		Pardo R.	Well Field	Rain Harv.
C	Result	73,5	97,2	199,4
	Normaliz.	0,37	0,49	1,00
R	Result	0,80	0,80	1,39
	Normaliz.	0,58	0,58	1,00
S	Result	-	-	-
	Normaliz.	0,10	0,10	0,43
V	-	0,0215	0,0284	0,430
Rank	-	1st	2nd	3rd

According to Table 4, the normalized product was the lowest for the alternative of supplementary water supply from the Pardo river ($V=0,0215$), reducing the pumping from the Guarani aquifer in the city of Ribeirao Preto. The rural well field alternative came close ($0,0284$).

In the case of the groundwater contamination risk from pesticides, a feasible measure was to use herbicides with smaller C_p values. In the case of Figure 14, if only those herbicides with $C_p=1$ were used, and considering the average of C_p of sugar cane fields in the region is $C_{p0}=1,83$ (previous condition), the contamination abatement (eq. [7]) would then be:

$$C_a = 100 [1 - (1,0/1,83)] = 45,4\%$$

Considering that the risks to groundwater quantity and quality would significantly impact the water users in the future, increasing the costs and reducing their reliability, the investments for mitigation measures suggested could be easily amortized. Additionally, financial compensation programs (PES), such as those related to the improvement of the water quality of the Pardo river to meet tolerable levels for urban consumption, and those related to the use of environmentally friendly pesticides, could be implemented in the study area.

CONCLUSIONS

The main conclusions of the present study were the following:

- There risks to the Guarani aquifer sustainability in the study area of 2,500 km² around Ribeirao Preto (Brazil) are those related to groundwater depletion under the urban area and the contamination of recharge areas;
- Considering the scenarios of climate change, the groundwater recharge would be reduced by 17% (B2) and by 20% (A2) in 2050;
- Considering that in 2007 about 65% of the original groundwater volume remains unexploited, there is an opportunity for the implementation of appropriate groundwater management measures;
- If groundwater is not managed properly in the city of Ribeirao Preto, there is a high probability that it would be depleted between 2048 and 2056, depending on the climate change scenario;
- 90km² of the recharge area the region studied present high risk to contamination by pesticides. Though this area represents only 3,6% of the total area studied, the high permeability rates and the contamination potential of the pesticides could lead to a serious groundwater contamination problem in the future;
- Alternatives to reduce the risk of groundwater depletion in the region included the supplementary supply of water from the nearby Pardo river, installation of well fields in the rural areas, and water harvesting in new urban condominiums;
- The most socioeconomic and environmentally viable of those alternatives was the use of river water, followed by the installation of well fields in the rural areas;
- The enforcement of the use of environmentally friendly pesticides would significantly reduce the risks to groundwater contamination in the recharge areas of the Guarani aquifer.

REFERENCES

- AMBRIZZI, T., ROCHA, R.P., MARENGO, J., ALVES, L., & FERNANDEZ, J. 2007. Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Séc. XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório No. 03, MMA, Brasília, 112 p. (in Portuguese).
- CHAVES, HML. 2008. Estudo Sócio Econômico Ribeirão Preto-Relatório Final de Consultoria. OEA-Projeto Aquífero Guarani, Montevideu, 150 p. (in Portuguese).
- CHAVES, HML, BRAGA, B, DOMINGUES, A., SANTOS, D. 2004. Quantificação dos Benefícios e Compensações Financeiras do “Programa do Produtor de Água” (ANA): I. Teoria. *Revista da ABRH*, vol. 9(3) 5-14.
- COPLAN, DORSCH CONSULT, GEOTECHNICAL CONSULTANTS, IT & MORE. 2004. Gerenciamento de Aquíferos: Um exemplo de Solução Integrada para a Criação de Áreas de Proteção de Captações destinadas ao Abastecimento Público com Uso de Modelos de Sustentabilidade e Sistemas Avançados de Suporte de Tecnologia de Informação. Bavária, 41 p. (in Portuguese).
- FIPAI-Fundação Para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial. 1996. Relatório técnico do Projeto de Gestão da Quantidade de Águas subterrâneas. Ribeirão Preto, SP, 43 p.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. 1993. Determinação do risco de contaminação de águas subterrâneas- Um método baseado em dados existentes. Inst. Geológico de SP, 92 p. (in Portuguese).
- IBGE. Dados censitários do Brasil, 2008. www.ibge.gov.br
- IPCC. 2008. Assessment Report No. 4. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. 1987. Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Ribeirão Preto. Boletim Técnico No. 7-IAC, Campinas, 133 p.
- PEARCE, D. 1976. Environmental economics. Longman, London, 260 p.
- SALATTI, E., SALATTI, E., CAMPANHOL, T., & VILLA NOVA, N. 2007. Tendências das variações climáticas para o Brasil no séc. XX e balanços hídricos para cenários climáticos para o séc. XXI. Relatório No. 4, MMA, Brasília, 186 p (in Portuguese).
- SINELLI, O., SOARES, P.C., SOUZA, A. 1973. Geologia do Nordeste do Estado de S.Paulo. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju,SE;v.1.p.209-228 (in Portuguese).
- TURBAN, E. & ARONSON, J.E. Decision support & intelligent systems. Prentice-Hall, N. York, 890 p., 1998.

USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO MEDIANTE SONDAS DE CAPACITANCIA

EFFICIENT WATERING MANAGEMENT USING CAPACITANCE PROBES

Alfonso Luis Orozco Corral¹

Resumen

La explotación del acuífero Cuauhtémoc es de 4,230 pozos, con volumen medio de extracción de 360 Mm³/año, se recarga con 87 Mm³/año, existiendo un déficit medio anual de 273 Mm³ dicha extracción es principalmente para la agricultura (92%). Es necesario incorporar tecnologías y programas de riego más eficientes que contribuyan al desarrollo sustentable de la agricultura en México.

El estudio se realizó durante el período 2005-2008 en el Rancho El Rosario, Municipio de Guerrero, Chihuahua. Cuenta con 570 hectáreas plantadas (628,705 árboles) con manzano variedad Golden Delicious, irrigadas por microaspersión de baja presión, utilizando sondas de capacitancia (FDR) para medir el contenido volumétrico de agua del suelo y el monitoreo del clima en tiempo real.

Con la finalidad de efectuar un manejo eficiente del agua de riego y disminuir las extracciones profundas, se utilizaron metodologías propuestas por la FAO e INIFAP, para el cálculo de las variables: Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo, factor de cobertura, coeficientes de cultivo, clase textural de suelos, punto de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad aprovechable, déficit de humedad, porcentaje permitido de abatimiento de humedad, lámina de riego, momento de riego, densidad aparente, velocidad de infiltración, humedad gravimétrica y volumétrica, precipitación efectiva, requerimientos hídricos diarios, mensuales y anuales, número de riegos, frecuencia y tiempo de riegos. Se instaló un sistema de tubos de acceso para la toma de datos semanales de la sonda de capacitancia para el monitoreo de la humedad del suelo, comparando los valores dieléctricos de la sonda con la humedad volumétrica del suelo. Los datos meteorológicos se obtuvieron de estaciones pertenecientes a la red agroclimática de UNIFRUT. El análisis estadístico se efectuó por medio de la regresión lineal y polinómica (R²).

Además de la obtención de balances hídricos ajustados para uso en investigaciones sobre los procesos de contaminación de acuíferos por nitratos, la utilización de sondas de capacitancia proporciona información que permite la optimización de los riegos, la corrección de estados de stress hídrico en los cultivos y el estudio de la dinámica del suelo.

Los resultados indican ahorros significativos de agua de riego del 45 % (7,000 m³/ha y 4 Mm³ en 570 ha.). Así mismo, se obtuvo un ahorro de energía eléctrica para la extracción profunda de agua, del 42 % (800,000 Kwh). Asumiendo que existen 30,000 ha. de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero en el Estado de Chihuahua, si esta metodología se adoptara significaría un ahorro de 209 Mm³ anuales para el acuífero, lo que impactaría significativamente sobre el déficit de recarga existente, minimizando los impactos ambientales negativos e incrementando las expectativas de vida del acuífero (25 años) y contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la región.

Palabras clave: Ahorro del Agua, Sonda de Capacitancia, FDR, Manejo Eficiente del Agua de Riego.

Abstract

The exploitation of the Cuauhtémoc aquifer is of 4,230 wells, with a mean volume of extraction of 360 Mm³/year, it is recharged with 87 Mm³/year, having a mean annual deficit of 273 Mm³ this extraction is mainly for the agriculture (92%). It is necessary to incorporate technologies and more efficient watering programs that contribute to the sustainable development of the agriculture in Mexico.

The study was carried out during the period 2005-2008 at Rancho El Rosario, Municipality of Guerrero, Chihuahua. It has 570 hectares planted (628,705 trees) with Golden Delicious apple variety, with low pressure micro irrigation system, using capacitance probes (FDR) to measure the contained volumetric water in the soil and real time climate monitoring.

With the purpose of making an efficient handling of the irrigation water and to diminish the deep extractions, methodologies were used proposed by the FAO and INIFAP, for the calculation of the variables: ETo, ETc, canopy factor, Kc, soil texture, saturation point, FC, SP, available humidity, deficit of humidity, allowed percentage of depression of humidity, watering sheet, watering moment, apparent density, infiltration, gravimetric and volumetric humidity, effective rain precipitation, hydric requirements daily, monthly and annual, amount of watering, frequency and time of watering. A system of access tubes was installed for the taking of weekly data with the capacitance probe for the monitoring of humidity in the soils, comparing the dielectrics values of the probe with the volumetric humidity of the soils. Meteorological data was obtained

¹ Alfonso Luis Orozco Corral. Investigador. Grupo La Norteña. Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Km. 98.5 Carr. Chihuahua-Cuauhtémoc. Fracc. Real del Monte. C.P. 31552 Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Tel. +52 (625) 590-2537. Fax +52 (625) 590-2538. alfonsoorozco@grupolanortenita.com www.grupolanortenita.com

at weather stations belonging to the agro-climatic UNIFRUT net. The statistical analysis was made by means of the lineal and polynomial regression (R^2).

Besides obtaining adjusted hydric balances for use in research on the processes of contamination of aquifer by nitrates, the use of capacitance probes provides information that allows the optimization of the irrigation water, the correction of hydric stress in crops and study of the soil dynamics.

The results indicate significant savings of irrigation water up to 45% (6,970 m³/ha and 4 Mm³ in 570 ha.). Likewise, an electric power saving was obtained for the deep extraction of water, up to 42% (800,000 Kwh). Assuming that there are 30,000 ha. of apple cultivar in the region of Cuauhtémoc and Guerrero, Chihuahua, Mexico, if this methodology was adopted it would mean a saving of 209 Mm³ for the aquifer annually, what would impact significantly on the deficit of existing water recharge, minimizing the negative environmental impacts and increasing the life expectations of the aquifer (25 years) and contributing to the socioeconomic development of the region.

Key words: Water economy, Capacitance probes, FDR, Efficient Watering Management.

INTRODUCCION

En la cuenca No. 34 de La Laguna de Bustillos existen aproximadamente 4,230 pozos, con una extracción anual de 360 millones de metros cúbicos (Mm³), una recarga de 87 Mm³, con déficit anual de 273 Mm³ (CNA, 2007). Esto ha originado que cientos de pozos se encuentren secos, en otros tantos se ha bajado el nivel estático y algunos han llegado a perforar hasta una profundidad de 800 metros. (Parra y Ortiz, 2004).

El abatimiento de los mantos acuíferos en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua es preocupante: si no se toman las medidas adecuadas para optimizar el uso del agua de irrigación, se puede llegar a la pérdida de miles de hectáreas dedicadas al cultivo del manzano, ya que el agua es el factor más limitante para la fruticultura. Es importante tener presentes consideraciones de tipo ambiental en el diseño y operación de los sistemas de irrigación, ya que el agua en exceso se infiltra por debajo de la zona radicular, arrastrando residuos de fertilizantes u otras sustancias químicas, contaminando así los mantos acuíferos.

El manejo apropiado del agua debe estar en relación con el sistema de irrigación utilizado. En la irrigación de los huertos manzaneros, el ajuste de las cantidades de agua a aplicar, el tiempo de riego apropiado, el drenaje del suelo, la operatividad de labores culturales y medioambientales, constituyen las características más importantes que deben ser optimizadas.

La utilización de tecnología apropiada es una herramienta para superar las limitaciones que puedan surgir de una demanda creciente de agua. El control del riego permite aumentar la eficiencia de uso del agua de irrigación y reducir o eliminar las pérdidas por lixiviación y escurrimientos y consecuentemente hacer un mejor manejo del recurso agua.

OBJETIVOS

- Manejar eficientemente el agua de irrigación, a través de una programación de riegos.
- Disminuir el volumen de agua de extracción que se usa para riego.

- Disminuir el consumo de energía eléctrica.
- Evaluar el comportamiento de la sonda de capacitancia (FDR)
- Disminuir los riesgos de lixiviación de agroquímicos a los acuíferos.

ANTECEDENTES

Un buen manejo de irrigación se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con el objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos. Las buenas prácticas de irrigación, están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad en esta zona y minimizar la contaminación difusa, es decir, lixiviación del agua y nutrientes por debajo de la zona radicular (Fares y Alva, 2000).

El conocimiento del contenido de agua en el suelo es fundamental para explicar una serie de procesos, tales como: balance del agua, velocidad de infiltración, escurrimientos, abatimiento de mantos acuíferos, crecimiento y desarrollo de cultivos y diseño de sistemas de irrigación (Dasberg y Dalton, 1985).

Varios factores afectan la permitividad (constante dieléctrica) efectiva del suelo. Es el caso del contenido en humedad, la porosidad (Weitz et al., 1997), la frecuencia de la onda electromagnética utilizada (Campbell, 1990), la temperatura (Or y Wraith, 1999), la salinidad (Campbell, 2002), la mineralogía (Olhoef, 1989), el contenido en materia orgánica (Topp et al., 1980; Roth et al., 1992), o el tamaño y forma de las partículas y poros presentes en el suelo (Sen, 1981; Knight y Endres, 1990).

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, de tal forma que ya se considera un factor limitante para un desarrollo sustentable. Lo anterior obliga a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua, para así impactar en aquellos aspectos donde el efecto del rescate del recurso, tanto en cantidad como en calidad, sea el mayor posible (Phene, 1999).

El Coeficientes de cultivo (K_c) es el coeficiente que relaciona la evapotranspiración del cultivo (ET_c), con la

evapotranspiración de referencia (ET_0), y representa la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de crecimiento vegetativo y rendimiento (Doorembos y Pruitt, 1976). Los coeficientes de cultivo (K_c), varían con el desarrollo vegetativo de la planta, clima y sistema de riego; dichos valores se deben obtener para cada región y para cada sistema de riego (Hargreaves y Samani, 1991; Rincón y Sáenz, 1996).

El agua en el suelo está afectada por diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en el agua, en un fenómeno de interfase entre los poros y las partículas coloidales del suelo, y otras como la gravedad, presión hidrostática y presión barométrica. La fuerza (potencial mátrico) con que el agua es retenida por el suelo, depende de la cantidad de agua presente en el sustrato. Mientras más seco está el suelo, mayor es la tenacidad con que el agua es retenida y más es el esfuerzo que debe hacer la planta para absorberla. Por el contrario, si el suelo está muy húmedo, parte del agua no puede ser retenida y se infiltra en profundidad, según lo dicho por Avidan, (1994). Tales fuerzas hacen que el agua sea adsorbida (retenida en la superficie de las partículas por fuerzas eléctricas) temporalmente por el suelo, que sea transferida o distribuida de un punto a otro del perfil, que drene o percole, que fluya a la superficie y sea evaporada o que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada hacia la atmósfera. En este contexto se establecen los niveles de contenido de agua en el suelo que se denominan: Punto de saturación (PS), Capacidad de campo (CC) y Punto de marchitez permanente (PMP). La diferencia entre estos dos últimos niveles definen lo que se conoce como Humedad abatible (HA), (Doorembos y Pruitt, 1976).

Según Clark, et al. (1995), es difícil generalizar acerca de la frecuencia del riego porque hay innumerables factores que deben considerarse; cultivo, profundidad y distribución radicular, características de retención de humedad del suelo, patrón de humedad del goteo y grado de automatización. Sin embargo, según Chávez y Berzoza, (2003), la aplicación de dos reglas básicas puede ser de gran ayuda: Agotar no más del 40% al 50% de la humedad del suelo disponible en la zona radicular activa y limitar las aplicaciones a 10 cm. o menos. Esto limita el grado de saturación de la zona radicular y minimiza la cantidad de agua que pueda drenar por debajo de la zona radicular activa. La frecuencia del riego varía con la etapa de crecimiento del árbol y de las variables específicas del lugar como clima y suelo, lo que concuerda con lo dicho por Hartz, (1995), Davis et al., (1985), Phene et al., (1985).

La técnica FDR está basada en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo aire y agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, debido a que la constante dieléctrica del agua es $\theta = 75$, comparada con la del suelo que es $\theta = 5$ y con la del aire que es $\theta = 1$. La medida de capacitancia nos

da la constante dieléctrica y a partir de esta, el contenido de agua del suelo. La señal de radiofrecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica (H_v) mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997) la cual es facilitada por el *software de calibración* de la sonda.

METODOLOGIA

El lugar donde se implementó este programa y se realizaron los estudios es el *Rancho Experimental El Rosario*, propiedad del Grupo La Norteña, ubicado en el municipio de Guerrero en el Estado de Chihuahua, México. Dicho rancho tiene una extensión de 570 hectáreas y se divide en 30 lotes, los cuales tienen diferentes marcos de plantación, densidades, variedades y portainjertos.

La instrumentalización de los huertos constó de una sonda de capacitancia (FDR) portátil para la monitorización de las reservas de agua en el suelo, a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm.). Los sensores de esta sonda envían sus mediciones al capacitor-datalogger, donde fueron almacenados. El trabajo de campo con la sonda de capacitancia consistió en tomar semanalmente las lecturas a las tres profundidades citadas, en cada uno de los 680 tubos de acceso instalados.

Los datos climáticos del 2005 al 2008 de: radiación solar, velocidad y horas de viento, temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, presión barométrica y precipitación pluvial, se obtuvieron de una estación meteorológica Davis, modelo Vantage Pro 2, fabricada en U.S.A.

La Sonda de Capacitancia (FDR) es un sistema de alta tecnología para monitorear la humedad de los suelos. Las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir, la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el capacitor-datalogger permite la conversión de las medidas de capacitancia en mediadas de contenido volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm. de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm.

La distribución y cantidad de los tubos de acceso fue cuidadosamente planificada. Se instalaron un total de 680 tubos de acceso por hectárea de PVC (cédula 40 y 280 PSI), de 1.20 metros de longitud, los cuales van enterrados 1.00 metro, lo que nos permitió tomar lecturas a los 20, 45 y 75 cm. de profundidad. Al mismo tiempo que se fue alcanzando las profundidades antes citadas durante la instalación de los tubos de acceso, se tomaron muestras de suelo para determinar la clase textural.

Evapotranspiración de Referencia (ET_0). El método de estimación que se utilizó es el de Penman modificado por la FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

Evapotranspiración del Cultivo o Real (ET_c). Para determinarla se utilizó el método Penman-FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

Factor de Cobertura (F_c). En cultivos arbóreos la ET es a su vez función del porcentaje de la superficie de suelo sombreada por el árbol. Para su determinación se aplicó un coeficiente denominado F_c cuyo valor depende del porcentaje de superficie sombreada. Para la determinación del F_c en frutales, se procedió a introducir el diámetro medio de la copa de los árboles de la plantación. (Zazueta, 1992).

Coefficientes de Cultivo (K_c). Para determinarla se utilizó el método FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP). Para su cálculo se consideraron las ecuaciones propuestas por Ortiz (2000).

Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR) y Momento de Riego (MR). Su cálculo se efectuó mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

Densidad Aparente (D_a), Humedad Gravimétrica (H_g) y Humedad Volumétrica (H_v). Se calcularon con las ecuaciones propuestas por Doorembos y Pruitt (1976).

Velocidad de Infiltración (V). Para determinarla se empleó el método del anillo infiltrómetro, utilizando la ecuación citada por Doorembos y Pruitt (1976).

Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}) y Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$). Se calcularon usando las ecuaciones propuesta por Blaney y Criddle. (Doorembos y Pruitt, 1976).

Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR). Su cálculo fue mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

RESULTADOS Y DISCUSION

Evapotranspiración de Referencia (ET_o). Al analizar los valores diarios obtenidos de ET_o del 2005

al 2008, se encontró una escasa correlación ($R^2 = 0.49$). Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_o son influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial. Sin embargo, se observa que el coeficiente de correlación es mayores cuando los valores de evapotranspiración fueron analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.79$). Se observó una excelente correlación entre la evapotranspiración de cada año según los valores de acumulación anual ($R^2 = 0.98$).

Evapotranspiración del Cultivo (ET_c). Los valores de ET_c diarios del 2005 al 2008 fueron analizados, encontrándose una moderada correlación ($R^2 = 0.65$). Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_c son un poco menos influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial. Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores son analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.81$). Se observó una excelente correlación entre los valores anuales ($R^2 = 0.98$).

En la figura 3 se puede observar la correlación entre ET_o y ET_c en la zona El Rosario, promedios mensuales durante los años 2005 – 2008, donde se aprecia que la ET_o supera a la real ET_c , siendo la ecuación lineal de ajuste $y = 1.1806x - 1.8459$ y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.92$), lo que nos sugiere que existe una correlación alta entre ambas, debido a que en los meses de mayor evapotranspiración la dispersión de los puntos es menor que en los meses de menor demanda.

Factor de Cobertura (F_c). Entre los valores del F_c obtenidos para los meses de Enero a Diciembre y los valores de K_c para el mismo período, existe una

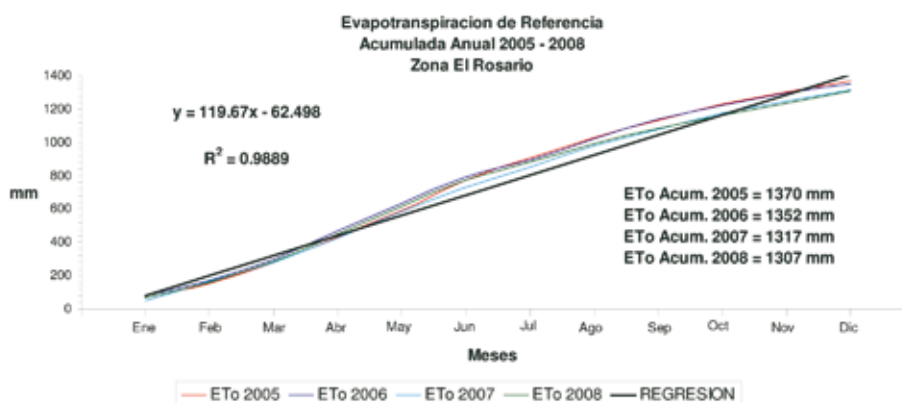


Figura 1. ET_o acumulada anual del 2005 al 2008.

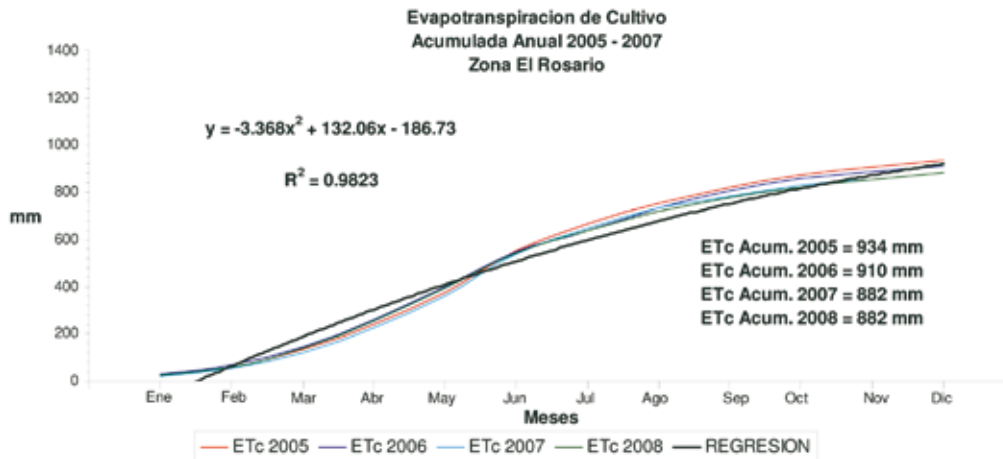


Figura 2. ETc acumulada anual del 2005 al 2008.

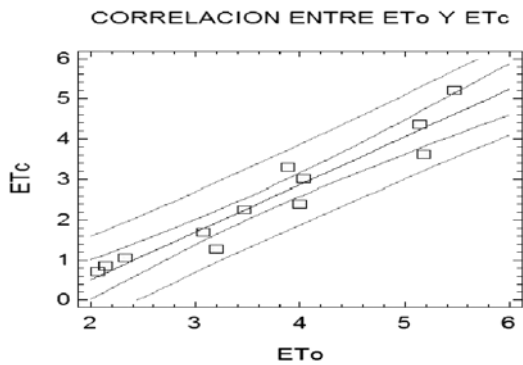


Figura 3. Correlación entre ETo y ETc promedios mensuales durante los años 2005 – 2008.

fuerte correlación entre ambas variables ($R^2 = 0.91$), lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico, lo que se ve representado en la figura 4.

Coefficientes de Cultivo (K_c). En la figura 4 se pueden observar los valores del F_c obtenidos para los meses de Enero a Diciembre. Así mismo, se observan los valores de K_c para el mismo período. Existe una fuerte correlación entre ambas variables, donde la ecuación polinomial de ajuste es $y = -0.0183x^2 + 0.2422x + 0.0659$ y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.91$) lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico.

Punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR), Momento de Riego

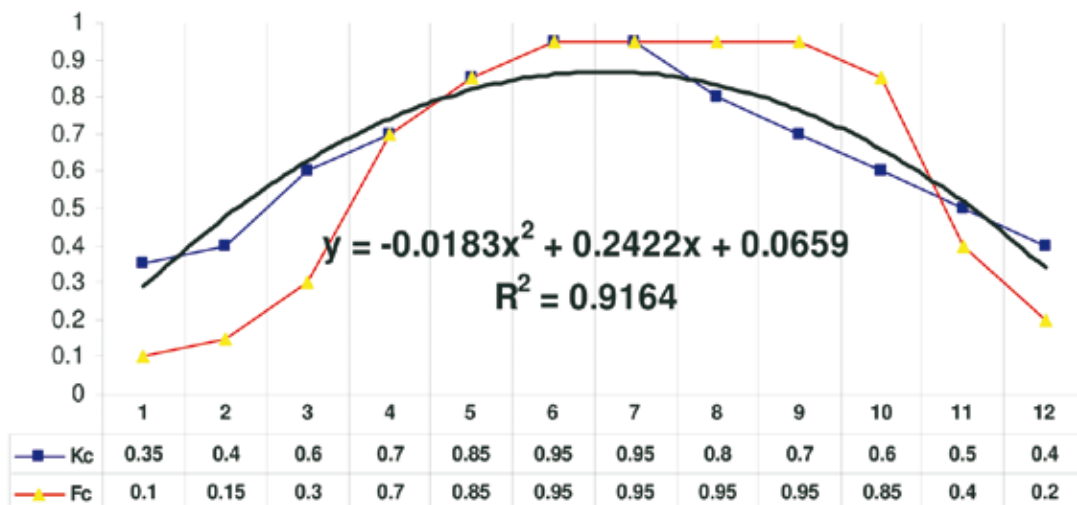


Figura 4. Valores de K_c y F_c en la zona de estudio.

(MR), Densidad Aparente (D_a), Humedad Gravitométrica (H_g) y Humedad Volumétrica (H_v). En los valores de la capacidad de almacenamiento de agua se observó variabilidad en los parámetros hídricos de los lotes comprendidos en la zona El Rosario. Dicha variabilidad es debida a las diferentes clases texturales del suelo (Anexo 1).

Velocidad de Infiltración (V_i). Al analizar los datos de V_i para las diferentes clases texturales encontradas, el coeficiente de regresión fue alto ($R^2 = 0.74$), lo que nos indica que los suelos analizados muestran un alto contenido de arcilla, lo que concuerda con lo encontrado en el perfil sub-superficial de 30 – 60 cm. principalmente.

Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}), Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$), Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR). En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos de la Programación del Riego para la zona El Rosario, donde se aprecia el uso consuntivo del manzano y el número de riegos requeridos para cubrir esos requerimientos. Se puede observar además el NR, LR, PPe, y LT (lámina total), aplicadas durante el 2005 – 2008.

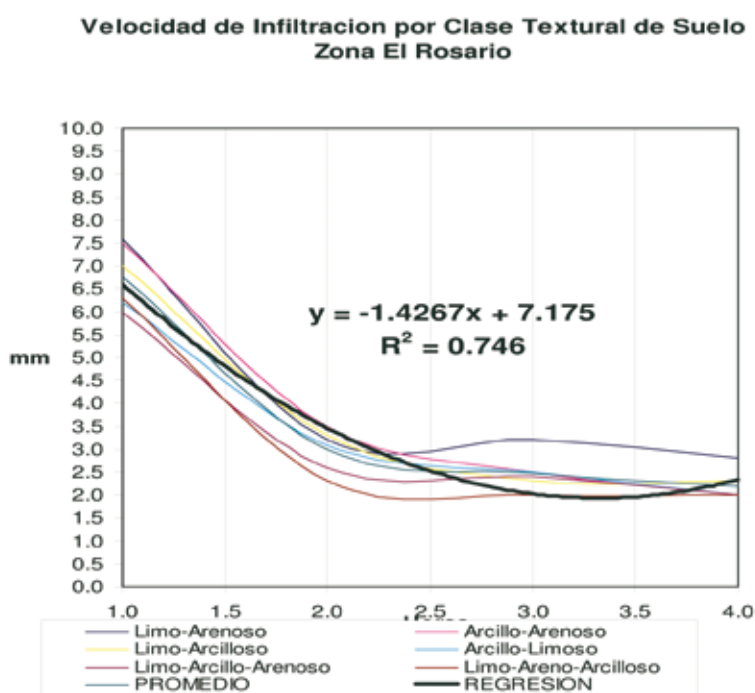


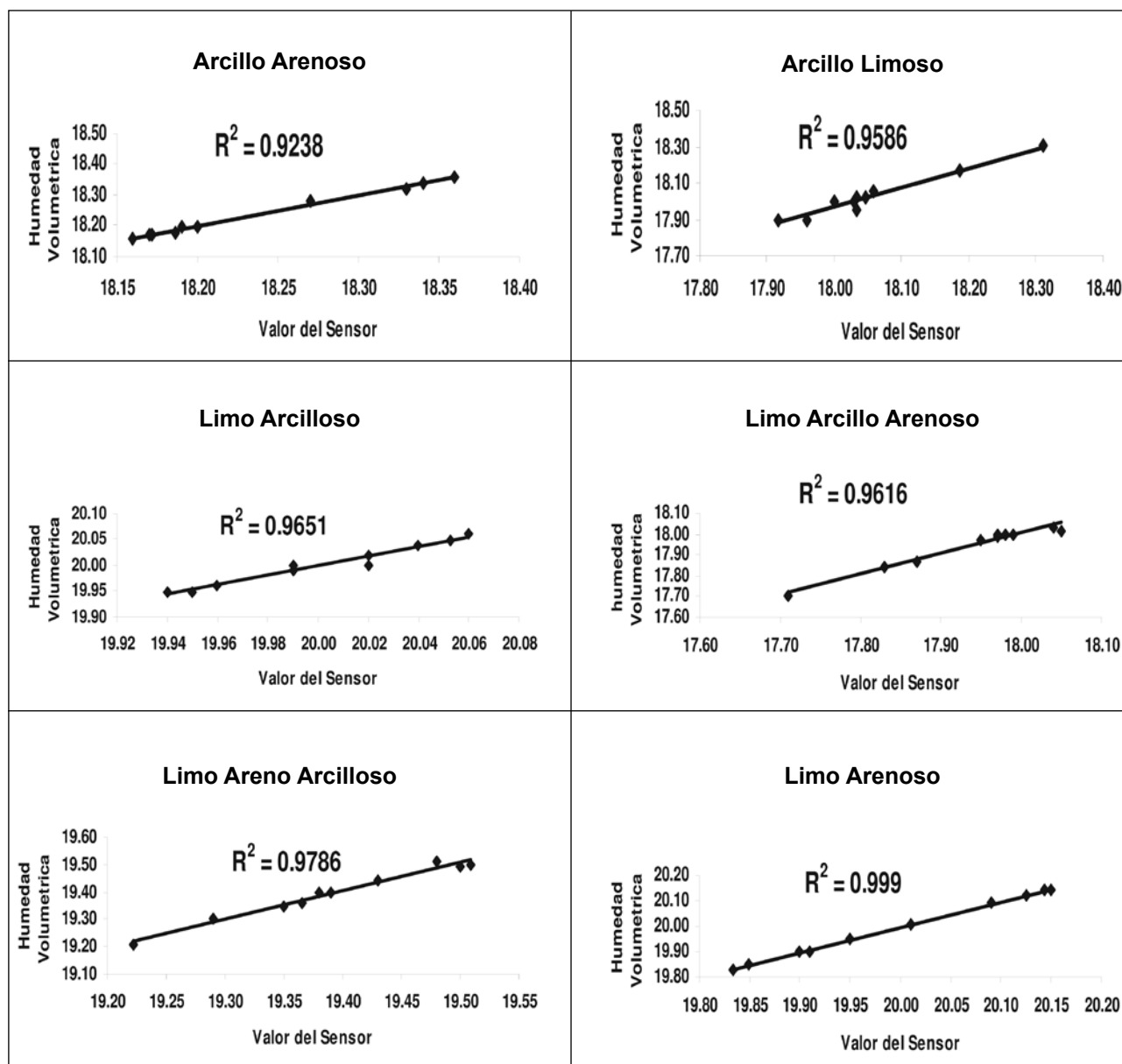
Figura 5. Valores promedio de la velocidad de infiltración expresado en mm/hora

Tabla 1. Programación del Riego para la zona El Rosario

Mes	RH/Mes(mm)	RH/Día (mm)	NR	FR (Días)	TR (h)
Enero	18.56	0.58	1	39.7	12
Febrero	30.52	1.04	1	21.5	12
Marzo	60.11	1.94	3	11.9	6
Abril	106.37	3.55	4	6.5	6
Mayo	168.08	5.42	7	4.3	6
Junio	208.31	6.79	9	3.4	6
Julio	181.94	3.47	5	6.7	6
Agosto	147.94	2.37	3	9.7	6
Septiembre	104.48	1.76	3	13.0	6
Octubre	69.24	2.17	3	10.7	6
Noviembre	41.28	1.29	2	17.6	6
Diciembre	19.27	0.60	1	38.4	12
TOTAL	1156.11		41		

El sensor utilizado por la sonda de capacitancia (FDR) muestra una buena respuesta a la humedad de suelo medida en forma volumétrica, observándose una excelente precisión. Al analizar la respuesta de los sensores dieléctricos de la sonda de capaci-

tancia FDR, a la variación de la humedad volumétrica del suelo, los coeficientes de correlación fueron levemente menores en aquellos suelos con mayor porcentaje de arcillas (figuras 6–11).



Figuras 6-11. Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes texturas encontradas en la zona

En la zona de estudio, se encontró que diferentes partes del suelo retienen diferentes cantidades de agua en la zona radicular, donde el análisis granulométrico promedio encontrados en la zona El Rosario, nos indica que existe un contenido alto de arcilla en el horizonte sub-superficial de 0-30 cm., lo que ocasiona una baja velocidad de infiltración influyendo directamente sobre la capacidad de retención de humedad.

En la figura 12 se puede observar la correlación entre CC y LR en la zona El Rosario, siendo la ecuación

lineal de ajuste $y = -1.07548 + 1.10681 \cdot LR$. Existe relación estadísticamente significativa entre CC y LR para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R² indica que el modelo explica un 98 % de la variabilidad en CC. El coeficiente de correlación es igual a 0.99, indicando una relación fuerte entre las variables.

En la figura 13 se representan las láminas totales (LT) de agua aplicadas durante los años 2005 al 2007 y en la que se puede apreciar el cálculo del uso consuntivo de agua para el manzano en la zona

El Rosario (1160 mm), la LR a aplicar en 41 riegos (948 mm) y la precipitación pluvial efectiva (212 mm) en el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 9,480 m³/ha., multiplicado por 570 ha. que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, nos dio un total de 5.4 Mm³, contra lo regado en los años: 2005 (9.8 Mm³), 2006 (9.4 Mm³) y 2007 (9 Mm³), lo que representa un ahorro promedio en el volumen de agua de 4 Mm³ (4.4 Mm³, 4 Mm³ y 3.5 Mm³ respectivamente). Al manejar eficientemente el agua de irrigación se obtuvieron ahorros significativos de agua de extracción. Los porcentajes de ahorro para la lámina total son 43 %, 48 % y 44 %, comparado con los años 2005, 2006 y 2007, como se observa en la figura 14.

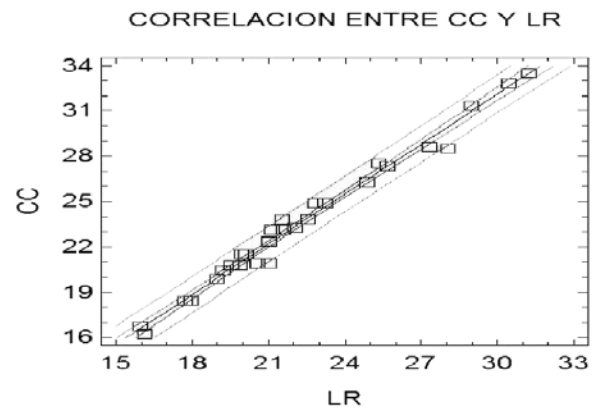


Figura 12. Correlación entre CC y LR durante los años 2005 – 2008

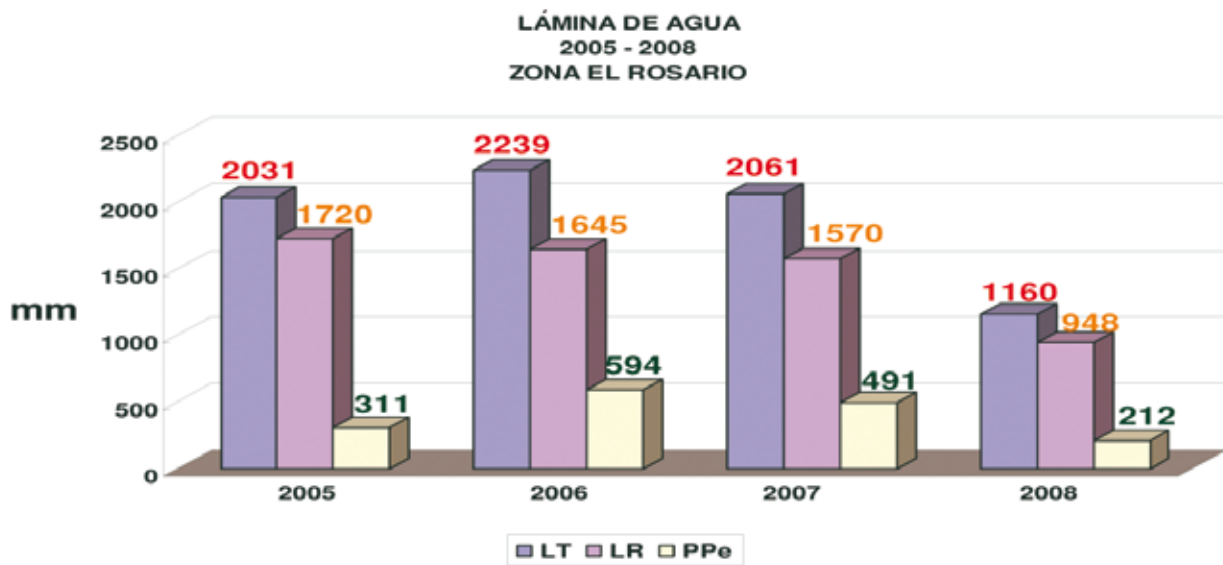


Figura 13. Láminas de agua aplicadas durante los años 2005 – 2008

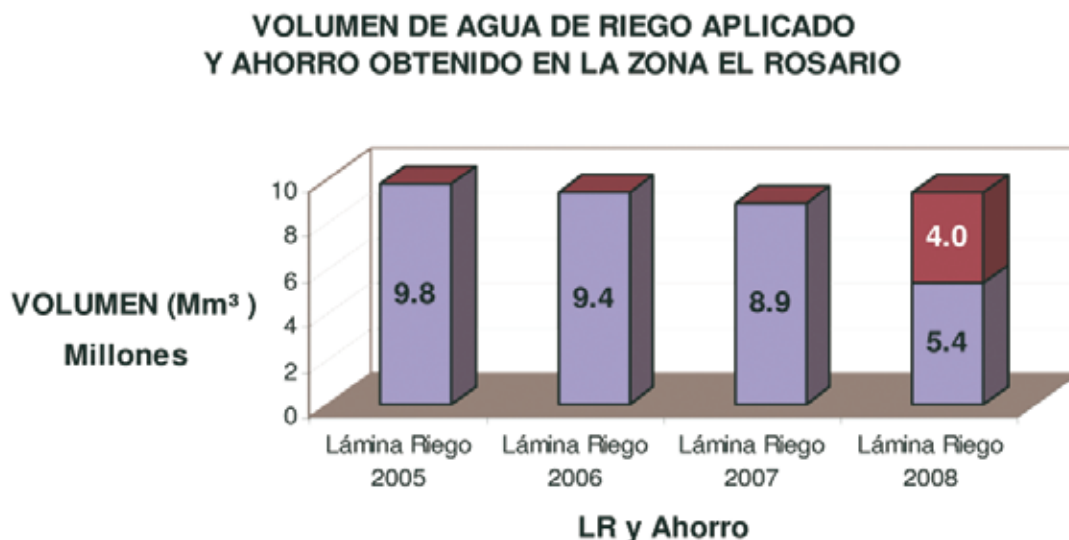


Figura 14. Volúmenes aplicados y ahorro obtenido durante los años 2005 – 2008

En la tabla 2 se observan las LR aplicadas durante los años 2005 – 2008. Lo que se regó en: mm., m³/

ha., m³/570 ha. y el excedente de m³ en 570 ha., lo que representa un ahorro promedio de 4 Mm³ anuales (45 %).

Tabla 2. Láminas de Riego y volúmenes aplicados durante los años 2005 – 2008

	mm	m ³ /ha	Mm ³ /570 ha	Volumen Excedente (Mm ³)
LR 2005	1,720	17,200	9.8	4.4
LR 2006	1,645	16,450	9.4	4.0
LR 2007	1,570	15,700	9.0	3.5
LR 2008	948	9,480	5.4	-----

En la figura 15 se representan el consumo de energía eléctrica en la zona El Rosario durante los años 2005 al 2008. El consumo fue de 27 pozos de extracción profunda en 41 riegos durante el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 5.4 Mm³, para las 570 ha. que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, nos dio un total de consumo de electricidad de 1.140,000 Kwh, contra el consumo en los años: 2005

(1.994.000), 2006 (1.938.000) y 2007 (1.966.000), lo que representa un ahorro en el consumo de electricidad de 826,000 Kwh. Durante el 2008 manejando eficientemente el agua de irrigación a través de una programación de riegos, se obtuvieron ahorros significativos de energía eléctrica para la extracción profunda del agua, el porcentaje de ahorro fue del 42 %, comparado con los años 2005, 2006 y 2007.

CONCLUSIONES

**ZONA EL ROSARIO
CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA
27 Pozos profundos para 570 ha.**

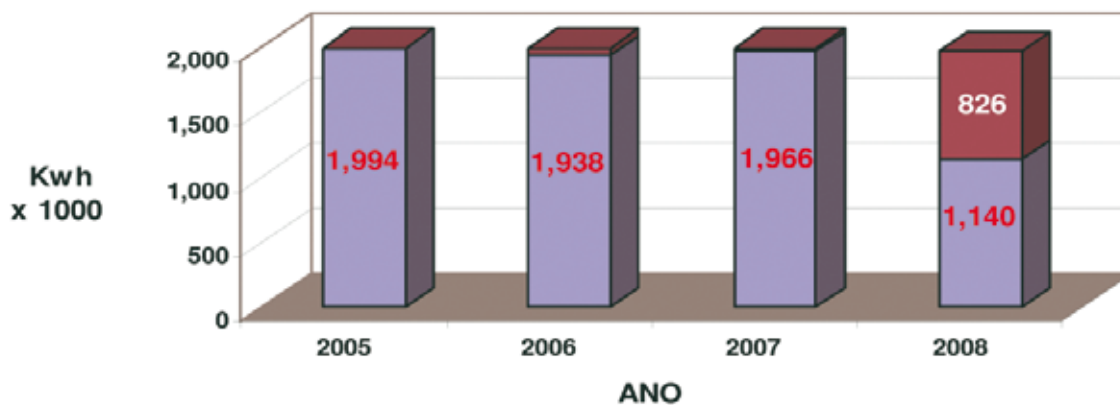


Figura 15. Consumo y ahorro de energía eléctrica durante los años 2005 – 2008

Se obtuvieron ahorros significativos en el volumen de agua de extracción profunda del 45 %, lo que representó 4 Mm³ en 570 hectáreas (7.000 m³/ha.) según se puede observar en las figuras 10 y 11, y en la tabla 2.

El ahorro de energía eléctrica para la extracción de agua con fines de riego fue del 42 %, lo que representó 826.000 Kwh en 27 pozos profundos según se muestra en la figura 12.

Esta técnica ofreció una serie de ventajas entre las que destacaron: facilidad de efectuar mediciones con rapidez en un mismo punto de forma continuada, así como también en varios puntos debido a su carácter

portable; determinar el perfil de humedad de un suelo a diferentes profundidades; alto grado de precisión de las mediciones; y ejerce un mínimo impacto sobre el suelo.

La relación lineal observada entre el valor entregado por el sensor de la sonda de capacitancia (FDR) y la humedad volumétrica en las distintas texturas de suelo es muy alta (figuras 3 - 8), lo que demuestra que el uso de esta tecnología simplifica de manera importante los métodos de medición de la humedad utilizados anteriormente, por lo que se debe incorporar esta metodología en la programación de riegos.

Asumiendo que existen 30.000 ha. de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero en el Estado de Chihuahua y que el ahorro de agua para riego es de 7.000 m³/ha., si esta metodología se adoptara, significaría un ahorro de 210 Mm³ para el acuífero.

Finalmente podemos concluir que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia (FDR) y el monitoreo del clima en tiempo real, nos indica que se trata de herramientas indispensables en la gestión y desarrollo sustentable de los ecosistemas agrícolas, permitiendo integrar la productividad y la conservación de los recursos hídricos y edáficos, además de reducir significativamente el consumo de energía eléctrica que es utilizada para la extracción profunda de agua para riego.

REFERENCIAS

- Avidan, A., 1994, *Cálculo de las necesidades de riego: Determinación del régimen de riego de los cultivos; Factores que influyen sobre el régimen de riego; La evapotranspiración de los cultivos*. Fascículos 1-3. CINADCO. Ministerio de Agricultura. Servicio de de Extensión Agrícola. Departamento de Riego y Suelos. Israel.
- Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames, 1993, *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa University Press. p. 392. USA.
- Campbell, J.E., 1990, *Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz*. Soil Science Society American Journal 54: 332-341.
- Campbell, J.E., 2002, *Salinity effects in capacitive soil moisture measurement transactions*. First International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance and Impedance, pp. 1-12. Paltin International Inc., Maryland, USA
- Chávez N. y M. Berzoza, 2003, *Manejo y operación de sistemas de riego presurizado*. Campo Experimental Delicias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Delicias, Chihuahua, México.
- Clark, G.A., C.D. Stanley, A.G. Smajstrla, y F.S. Zazueta, 1995, *Consideraciones para el diseño de la microirrigación para la producción de hortalizas. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas*. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.
- Davis, K.R., C.J. Phene, R.L. McCormick, R.B. Hutmancher, y D.W. Meek, 1985, *Trickle irrigation frequency and installation depth effects on tomatoes*. Third International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 986-902.
- Dasberg, S. y F.N. Dalton, 1985, *Time domain reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity*. Soil Science Society American Journal 49: 293-297.
- Doorembos J. y W.O. Pruitt, 1976, *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje, Manual n° 24. Roma, Italia.
- Fares A. y A.K. Alva, 2000, *Soil water components based on capacitance probes in sandy soil*. Soil Science Society American Journal 64: 311-318.
- Hartz, T.K., 1995, *Manejo del agua en la producción de hortalizas con riego por goteo*. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.
- Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani, 1991, *Programación del riego*. Manual Bilingüe. Universidad de Las Cruces, New México, U.S.A.
- Knight, R.J. y A.L. Endres, 1990, *A new concept in modeling the dielectric response of sandstones: Defining a wetted rock and bulk water system*, Geophysics 55: 586-594.
- Olhoeft, G.R., 1989, *Electrical properties of rocks*. Physical Properties of Rocks and Minerals. vol. II-2. New York: Hemisphere Pub. Corp.
- Or, D. y J.M. Wraith, 1999, *Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model*. Water Resources 35: 371-383.
- Ortiz, P., 2000, *Programación práctica del riego*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.
- Paltineanu I. C. y J. Starr, 1997, *Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration*. Soil Science Society American Journal 61: 1576
- Parra, R. y P. Ortiz, 2004, *Manejo del riego en manzano mediante déficit de riego controlado (DCR)*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.
- Phene, D.J., R.J. McCormick, J.M. Miyamoto, D.W. Meek, y K.R. Davis, 1985, *Evapotranspiration and crop coefficient trickle irrigated tomatoes*. Third. International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 923-831.
- Rincón, L. y Sáenz, J., 1996, *Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes de cultivo en lechuga iceberg con riego por goteo*. Actas del Congreso Ibérico. Murcia, España. pp. 193-202.
- Roth, C.H., M.A. Malicki y R. Plagge, 1992, *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR*. Journal of Soil Science 43: 1-13.

Sen, P.N., 1981, *Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks*. Geophysics 46: 1714-1720.

Topp, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan, 1980, *Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines*. Water Resources 16: 574-582.

Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller y E. Veldkamp, 1997, *Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin*. Water Resources 33: 1241-1249.

Zazueta, R. F. S., 1992, *Micro-Irrigación*. ICFA Internacional, Inc. Gainesville, Florida.,USA.

Anexo 1. Valores de capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona El Rosario

LOTE	(PS) (%)	(CC) (%)	(PMP) (%)	(HA) (%)	(DH) (%)	(Da) (gr/ cm ³)	(Hg) (%)	(Hv) (%)	(MR) (%)	(LR) (mm)	CLASE TEXTURAL
Pozo 3	42.00	22.35	13.30	9.05	4.52	1.31	13.87	18.17	17.83	21.02	Arcillo-arenoso
Pozo 2 A	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.30	13.99	18.19	18.47	21.61	Arcillo-arenoso
Pozo 2 B	37.50	19.90	11.84	8.06	4.03	1.33	13.40	17.82	15.87	19.00	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 4	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.27	15.30	19.44	18.47	21.11	Limo-arcilloso
Pozo 9	30.66	16.18	9.63	6.55	3.28	1.39	14.70	20.44	12.90	16.14	Limo-arenoso
Pozo 6	39.33	20.90	12.43	8.46	4.23	1.37	14.58	19.98	16.67	20.55	Limo-arenoso
Frentes 9	38.50	20.44	12.16	8.28	4.14	1.31	13.52	17.71	16.30	19.22	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 13	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.26	14.11	17.78	18.97	21.51	Arcillo-limoso
Pozo 8	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.30	15.18	19.74	19.84	23.21	Limo-arcilloso
Pozo 5	58.50	31.31	18.63	12.68	6.34	1.29	14.11	18.20	24.97	28.99	Arcillo-limoso
Frentes 5	51.58	27.55	16.39	11.16	5.58	1.28	13.87	17.76	21.97	25.31	Arcillo-limoso
Pozo 12	61.33	32.85	19.55	13.30	6.65	1.29	13.99	18.05	26.20	30.42	Arcillo-limoso
Pozo 7	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.28	14.11	18.06	19.84	22.85	Arcillo-limoso
Pozo 10	62.50	33.49	19.92	13.56	6.78	1.30	14.94	19.43	26.71	31.25	Arcillo-limoso
Pozo 11	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	13.99	18.33	16.59	19.56	Arcillo-limoso
Pozo 1	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.29	14.23	18.35	17.17	19.94	Arcillo-limoso
La Estación	39.40	20.93	12.46	8.48	4.24	1.40	14.82	20.75	16.69	21.03	Limo-arenoso
Mayo Verde	31.66	16.73	9.95	6.77	3.38	1.33	14.46	19.24	13.35	15.98	Limo-arenoso-arcilloso
Frentes MV	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.34	14.35	19.22	14.69	17.71	Limo-arenoso-arcilloso
Laterales MV	51.16	27.32	16.26	11.07	5.53	1.31	13.29	17.40	21.79	25.70	Limo-arcillo-arenoso
Presa	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.30	13.64	17.73	17.17	20.09	Limo-arcillo-arenoso
Compuerta	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.32	13.52	17.85	18.97	22.54	Limo-arcillo-arenoso
Cuchilla	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.33	15.42	20.52	16.59	19.86	Limo-arcilloso
CH-P	43.64	23.24	13.83	9.41	4.70	1.32	13.87	18.31	18.54	22.02	Arcillo-limoso
Vivero	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.36	14.35	19.51	14.69	17.98	Limo-arenoso-arcilloso
Corrales	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	15.55	20.37	16.59	19.56	Limo-arcilloso
Páramo Alto	30.83	16.28	9.68	6.59	3.30	1.38	14.58	20.13	12.98	16.12	Limo-arenoso
Páramo Bajo	53.33	28.50	16.96	11.54	5.77	1.37	14.70	20.14	22.73	28.03	Limo-arenoso
Crucifijo	53.50	28.60	17.01	11.58	5.79	1.33	14.11	18.76	22.81	27.30	Arcillo-limoso
Escapulario	49.20	26.26	15.62	10.63	5.32	1.32	13.87	18.31	20.94	24.88	Arcillo-limoso
PROMEDIO	43.74	23.29	13.86	9.43	4.72	1.32	14.28	18.86		22.18	

EL CONSUMO HÍDRICO DE LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA AURÍFERA EN LA CUENCA DEL RÍO JÁCHAL, PROVINCIA DE SAN JUAN, ARGENTINA

WATER USE IN AGRICULTURAL CROPS AND GOLD MINING IN THE JÁCHAL RIVER BASIN. SAN JUAN PROVINCE, ARGENTINA

Omar Miranda¹, Mario Liotta², Alfredo Olguin³ & Alejandro Degiorgis⁴

Resumen

En este trabajo se cuantificó el impacto de la minería aurífera en la disponibilidad de agua para riego en el valle de Jáchal, provincia de San Juan, Argentina. A partir del consumo hídrico de dos concesiones mineras sobre la cuenca del río Jáchal, Veladero (en explotación) y Lama (en etapa de estudio de impacto ambiental), se calculó el uso consuntivo de agua y el efecto regulador del embalse Cuesta del Viento. Suponiendo que los dos yacimientos mineros extraigan el volumen de agua máximo necesario para su funcionamiento en forma constante durante todo el año, se verificará una disminución de 4.47% en el caudal del río Jáchal, equivalente al agua que habría que entregar para regar una superficie de 728 ha de cultivos según el patrón actual de uso de suelo agrícola. Teniendo en cuenta el área en producción agrícola, la capacidad de distribución de la red de riego y la oferta hídrica promedio del río Jáchal, esto no generará déficit hídrico en los cultivos. Si bien en un año con bajas precipitaciones en cabecera de cuenca se puede contar con la reserva del dique Cuesta del Viento, en casos en los que el ciclo hidrológico seco se extendiese por más de cuatro años se debería tener en cuenta medidas para asegurar la provisión de agua para los cultivos de Jáchal.

Palabras clave: minería aurífera, consumo de agua, agricultura

Abstract

This paper quantifies the impact of gold mining on water availability for irrigation in the Jáchal valley, Province of San Juan, Argentina. From the water consumption of two mining deposits on the Jáchal river, Veladero (currently working on) and Lama (under the Environmental Impact Study), we calculated the consumptive use of water and the regulatory effect of the Cuesta del Viento dam. Assuming that the two mining sites consume the maximum annual water flow, there was a decrease in the flow of the river Jáchal of 4.47%, equivalent to the water to be delivered to irrigate an area of 728 hectares of crops under the current pattern of use of agricultural land. Given the current occupation of agricultural land, the distribution capacity of irrigation canals and the river Jáchal average water supply, this does not create water shortage in the crop. While in years with low precipitation in the Cordillera farmers can use water of reservoir dam Cuesta del Viento, in cases where the dry hydrological cycle is more than for years will be needed to ensure the provision of water for crops Jáchal valley.

Keywords: gold mining, water consumption, agriculture

INTRODUCCION

El incremento mundial en las inversiones para expandir la minería aurífera ha sido facilitado por el aumento del precio internacional de oro, la mejora en las economías de escala del transporte marítimo y el desarrollo de técnicas de molienda de rocas a cielo abierto (Mudd, 2007a). Argentina no fue ajena a este proceso y, luego de una serie de reformas en el marco regulatorio e institucional nacional ocurridas en la década de los '90 (Moori Koenig & Bianco, 2003), en los últimos años comenzó la extracción de oro en tres grandes explotaciones auríferas a cielo abierto (Bajo la Alumbraera, Cerro Vanguardia y Veladero, en las provincias de Catamarca, Santa Cruz y San Juan,

respectivamente). En el año 2007 se extrajeron 42 t de oro de 24 kt en el país por valor de \$ 462 millones (INDEC, 2009), ubicándose Argentina como el tercer productor aurífero del continente americano.

La escala en la que se aplican las nuevas técnicas de extracción de oro impacta en las inmediaciones de los yacimientos, afectando el paisaje y el equilibrio de los ecosistemas (McMahon & Remy, 2003). El deterioro del ambiente en los alrededores de la explotación se produce, principalmente, por la excavación de diques de cola, el residuo de la molienda de rocas y las emisiones de polvo y CO₂ (Mudd, 2007b; Kumah, 2006; Moreno & Neretnieks, 2006). También se puede generar conflictos con otras acti-

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-EEA San Juan. Calle 11 y Vidart, Villa Aberastain, Pocito (5427), San Juan, Argentina. (omiranda@sanjuan.inta.gov.ar)

² (maliotta@sanjuan.inta.gov.ar)

³ (aolguin@sanjuan.inta.gov.ar)

⁴ (adegiorgis@sanjuan.inta.gov.ar)

Artículo enviado el 20 de setiembre de 2009

Artículo aceptado el 21 de enero de 2010

vidades económicas por la competencia en el uso de determinados insumos, ya que durante la extracción del mineral y su procesamiento se hace un consumo intensivo de energía y agua (Mudd, 2007a, 2007b), además de productos potencialmente contaminantes como el cianuro (Logsdon et al. 2001; Korte & Coulston, 1995).

Cuando los yacimientos mineros a cielo abierto se ubican en zonas áridas, la competencia por el uso del agua se da principalmente con la agricultura irrigada. Las nuevas concesiones para uso minero, en el contexto de inelasticidad de oferta hídrica que caracteriza a gran parte de los territorios áridos de Argentina (Miranda, 2008), compiten con la disponibilidad de agua para riego agrícola, lo cual genera un antagonismo entre estas dos actividades. Este es el problema que da origen al presente trabajo, en el cual se va a cuantificar el efecto en la disponibilidad hídrica de dos concesiones mineras auríferas ubicadas en las altas cumbres andinas. Una de ellas, Veladero, está en producción en la actualidad y se alimenta con agua del río Las Taguas. La otra, Lama, si bien aún no comenzó a extraer minerales, también se va a proveer del mismo cauce. El río Las Taguas es afluente del río Jáchal, único abastecedor de agua del valle irrigado del mismo nombre, principal zona agrícola ubicada al norte de la provincia de San Juan.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de las concesiones mineras Veladero y Lama está ubicada del lado este de la frontera entre la IV Región de Chile y la provincia argentina de San Juan. Lama forma parte del yacimiento de oro binacional Pascua-Lama localizado en el límite de las altas cumbres andinas entre Chile y Argentina, extendiéndose a unos cuatro kilómetros al norte del emprendimiento minero Veladero (Miranda & Degiorgis, 2006). Las concesiones se ubican al oeste del Valle del Cura, en un terreno montañoso con alturas que varían entre 3900 msnm y 5200 msnm (Groeber, 1932). Las temperaturas medias mensuales llegan a 10°C en los meses de verano, con máximas de 25°C; durante los meses de invierno, las temperaturas medias mensuales descienden a -15°C, con máximas de 5°C (UNSJ, 2002). La humedad relativa promedio anual es de 30% (BEMSA, 2004). Las precipitaciones son en forma de nieve y se concentran en los meses de mayo a septiembre, con una media anual de 150mm (Salvioli, 2007); aunque no necesariamente la cantidad de nieve caída influye en el derrame del río aguas abajo, ya que la temperatura del aire en cordillera durante la época de derretimiento nivelo tiene un efecto directo en el volumen escurrido (Heinscheimer, 1948).

Los territorios en los que se ubican los yacimientos no tienen aptitud de uso agrícola (INA, 1998). Con respecto a las actividades pecuarias, la superficie con mallines o vegas que existe en el área de los

emplazamientos es pequeña y no hay registros de actividad ganadera comercial ni de subsistencia (Miranda & Degiorgis, 2006).

El río Las Taguas es la principal fuente de agua y vía de drenaje de la escorrentía superficial de los emprendimientos mineros Veladero y Pascua-Lama, fluyendo hacia el norte hasta unirse con el río Valle del Cura para formar el río La Palca, tributario a su vez del Jáchal. El río La Palca aporta el 70% de los derrames del Jáchal y el río Blanco el 30% restante (Salvioli, 2007); a su vez, el río Las Taguas aporta el 50% de los caudales del río La Palca y río Valle del Cura el otro 50% (UNSJ, 2002; APN, 2008). En esta distribución porcentual de caudales en la cuenca interesa conocer el impacto del consumo de agua por la gran minería en el río Jáchal, el cual tiene el segundo volumen más importante de la provincia de San Juan y forma parte del Sistema Desaguadero.

El punto de desvío para el suministro de agua en el yacimiento Lama será una galería de infiltración en el río Las Taguas, con un uso consuntivo máximo de 350 L/s (BEMSA, 2004). El otro emprendimiento minero que está sobre esta corriente es Veladero, el cual utiliza un máximo de 110 L/s de agua del mismo cauce (Departamento de Minería, 2003). Esto indica que el consumo máximo de agua del río Las Taguas de ambos yacimientos mineros será 460 L/s. Como ocurre en todos las cuencas de zona, el caudal de este río es inestable a lo largo del año (Jones, 2006), con repentinas variaciones de volumen de hasta cinco veces (WMCL, 2006). El mayor caudal anual se produce en octubre y el máximo valor medido fue 4200 L/s y el mínimo 419 l/s, mientras que los caudales estivales se encuentran en el rango de 1000-2000 L/s (Fernández et al. 2006).

Al sudeste de las concesiones mineras se localiza el valle agrícola de Jáchal. Tiene un clima árido tipo desértico con valores medios de 141 mm de precipitación anual, 54 % de humedad relativa y 16.5 °C de temperatura media anual (SMN, 2007), los valores extremos varían entre los 71 mm y 128 mm anuales de precipitaciones y temperaturas estivales con máximos absolutos de 40 °C (Cornejo & Silva, 2000). Estas condiciones generan un déficit hídrico que no permite el cultivo comercial de especies agrícolas sin riego.

El valle tiene 21746 ha con derecho a riego (Departamento de Hidráulica, 2007) y la distribución del agua se organiza en tres cuencas. Dos son pequeñas y tienen escasa superficie cultivada: cuenca Huaco-La Ciénaga y cuenca Agua Negra, con 1651 ha y 1673 ha con derecho a riego, respectivamente (Miranda & Degiorgis, 2006). La otra cuenca es la de Jáchal, tiene 18422 ha con derecho a riego y utiliza recursos hídricos del río homónimo (Departamento de Hidráulica, 2007).

Aguas arriba del área cultivada hay dos represas. El dique Cuesta del Viento que tiene como función regular caudales y generar energía hidroeléctrica y el

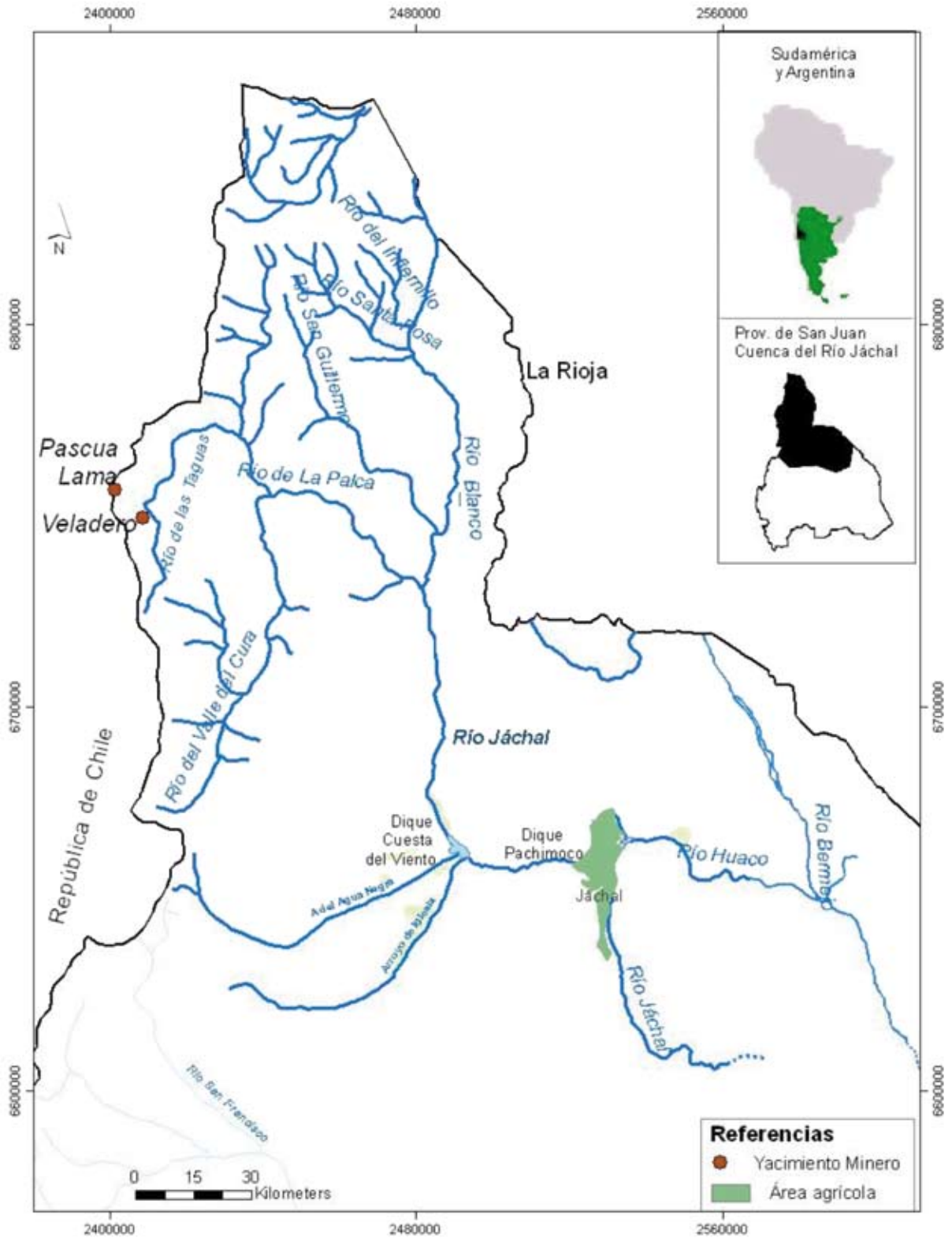


Figura 1. Provincia de San Juan. Cuenca del río Jáchal y concesiones mineras Veladero y Lama

dique derivador de riego de Pachimoco. Este último tiene una toma principal para riego de 12 m³/s de capacidad (UNSJ, 2002) que se divide en dos canales, (a) el Canal Norte que abastece 11070 ha de las localidades de Pampa Vieja, Pampa del Chañar, Villa Mercedes y Entre Ríos con un coeficiente de entrega de 0.8 L/s-ha y una capacidad de 9 m³/s; y (b) el Canal Sur que riega 4280 ha de las localidades de El Rincón, San Rafael, El Fuerte y Cruz de Piedra con un coeficiente de entrega de 0,65 L/s-ha y una capacidad de 3.1 m³/s (Departamento de Hidráulica, 2009). También hay tomas directas sobre el río Jáchal para regar los territorios Niquivil Viejo, Mogna, Tucunuco y El Coyón. La superficie con derecho de riego a partir de estas tomas es 3071 ha.

La calidad del agua de riego está influenciada por la salinidad del río Jáchal, con valores de 1500 mg/L a 3000 mg/L en el agua superficial y de 1200 mg/L a 4100 mg/L en la subterránea, con un contenido de boro de hasta 6 mg/L (Lohn & García, 1983). Esto en principio limita el abanico de especies que se pueden cultivar, siendo afectada también la productividad de aquellas tolerantes a salinidad y boro (Richards, 1954).

La superficie total con derecho a riego en el valle de Jáchal excede la capacidad de entrega de los ríos que lo alimentan (SANINDTEC, 1951; CFI, 1962), estimándose que sólo se podrían llegar a regar efectivamente hasta 13000 ha con sistemas tradicionales (SANINDTEC, 1952). A modo de ejemplo, se menciona que en el año en el año 1930 habían 22198 ha con derecho de riego de las cuales estaban cultivadas 11787 ha (Aubone, 1934), mientras que en la actualidad de las 21746 ha con derecho de riego del valle solo se encuentran cultivadas 7418 ha (Departamento de Hidráulica, 2007). Se destaca el cultivo de olivo con 2083 ha plantadas, representando el 28.1 % del área total en producción. En segundo lugar se ubican las pasturas, con 1584 ha (21.4 %) y, en tercer término, el cultivo de cebolla, con 1123 ha (15.1 %) (Ibíd., 2008).

MATERIALES Y METODO

Se hizo una estimación de las necesidades hídricas totales para uso agrícola en base a las series de datos climatológicos disponibles, superficie cultivada por especie en el valle irrigado de Jáchal durante el ciclo 2007-2008, calidad del agua de riego del río y coeficientes de cultivo (*kc*).

La estimación de la evapotranspiración de referencia (*ET_o*) en función de la evaporación en bandeja se basó en la relación siguiente (Doorenbos & Pruitt, 1976):

$$ET_o = E_{tan} \times kp \quad [1]$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día).

E_{tan} = evaporación de Tanque tipo "A" (mm/día).

kp = coeficiente del Tanque.

La *E_{tan}* corresponde al período 1947-1982 (SMN, 2007) y las medidas de evaporación medidas en Jáchal se incluyen en el Anexo. El *kp* fue 0.70 para todos los meses y su determinación se basó en los tabulados de FAO (Allen et al. 1998) a partir de valores medios de 40% a 70% de humedad relativa y 175 km/día de velocidad del viento. Los valores mensuales de *ET_o* obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 1: Jáchal, evapotranspiración de referencia (*ET_o*) en mm/mes, promedio período 1947-1982

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
<i>ET_o</i> (mm/mes)	169	130	118	83	67	56
MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<i>ET_o</i> (mm/mes)	76	80	97	132	154	174

Las necesidades netas de riego se calcularon mediante la siguiente relación (Jensen et al. 1990):

$$NN = (ET_o \times kc) - Pe \quad [2]$$

Donde:

NN = necesidades netas de riego en mm/mes

kc = coeficiente de cultivo

ET_o = evapotranspiración de referencia

Pe = precipitación efectiva

El *kc* es un factor que expresa la capacidad de los vegetales para extraer agua del suelo en las distintas etapas fisiológicas del cultivo (Allen et al. 1998). Es un factor específico que permite conocer la evapotranspiración real de un cultivo en una situación determinada a partir de la *ET_o*. Los valores utilizados para los cultivos de Jáchal se incluyen en el Anexo.

Una vez determinadas las necesidades hídricas totales, para conocer los volúmenes mensuales y anuales de agua consumida se afectó la necesidad neta de riego por la eficiencia de uso del agua. Esta última se origina en las pérdidas por conducción y aplicación de agua de riego, quedando la siguiente expresión (Doorenbos & Pruitt, 1976):

$$EU = \frac{EAP \times EC}{100} \quad [3]$$

Donde:

EU = eficiencia de uso de agua de riego

EAP = eficiencia de aplicación

EC = eficiencia de conducción.

Se utilizaron valores de eficiencia de conducción de 85% y de aplicación de 50%. Estos fueron obtenidos de manera empírica en el valle del Tulum, provincia de San Juan, para el mismo sistema tradicional de riego gravitacional que predomina en Jáchal, con pendiente y escurrimiento al pie (Castro, 1990). De esta manera, la eficiencia de uso del agua de riego utilizada en este trabajo es de 43%.

A continuación, se determinó el requerimiento de lixiviación para lavar el contenido de sales de las aguas del río Jáchal y evitar fitotoxicidad en los cultivos. Esto se logra agregando un porcentaje de agua superior al que cubre las necesidades netas del cultivo. Las características de los suelos que predominan en la zona permiten el lavado de sales, lo cual ha sido demostrado en estudios anteriores (Castro et al. 1984). El valor medio de conductividad eléctrica del río Jáchal en las cercanías de la toma de Pachimoco es de $1850 \mu\text{S cm}^{-1}$ (CIPCAMI, 2006) y la conductividad eléctrica del extracto de saturación para obtener una reducción del rendimiento no superior al 10 % se adopta en $2700 \mu\text{S cm}^{-1}$. Siguiendo a Bernstein & Francois (1973), la lámina requerida para el lavado de las sales se calculó con la expresión:

$$LR = \frac{CE_i}{(5CE_w - CE_i)} = \frac{1800}{(5 \times 2700 - 1800)} = 15 = 15\% \quad [4]$$

Donde:

LR = requerimiento de lixiviación.

CE_i = conductividad eléctrica del agua de riego ($\mu\text{S cm}^{-1}$)

CE_w = conductividad eléctrica del extracto de saturación para una reducción de rendimientos $\leq 10\%$.

Como se consideró una eficiencia de uso del agua del 43 %, la cual cubre los requerimientos de lixiviación, no es necesario incrementar la dotación de riego para mantener un balance de sales adecuado. En consecuencia, la expresión para determinar los volúmenes de riego mensuales es (Doorenbos & Pruitt, 1976):

$$VB = \frac{\left[\left(\frac{NN}{EU \times 0.01} \right) \times A \right]}{10000} \quad [5]$$

Donde:

VB = necesidades totales mensuales o anuales (Hm^3)

NN = necesidades de riego netas (mm/mes)

EU = eficiencia de uso (%)

A = superficie por cultivo o grupo de cultivos (ha)

RESULTADOS

En la Tabla 2 se presenta el cálculo del volumen mensual y anual de agua de riego requerido por los cultivos de Jáchal, de acuerdo al área en producción en el ciclo agronómico 2006-2007.

La demanda hídrica para riego con la actual superficie cultivada es 147.68 Hm^3 anuales, mientras que el consumo de agua de los emprendimientos Veladero y Lama será de 14.5 Hm^3 anuales, lo cual totaliza un uso consuntivo conjunto de 162.18 Hm^3 anuales. El volumen de agua consumido por las concesiones mineras equivale al agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas anuales de 728 ha en plena producción según el patrón de cultivos actual y el procedimiento de cálculo utilizado.

La serie histórica anual de caudales del río Jáchal medida en el período 1921-1998 a la altura de Pachimoco tiene un volumen promedio de 324.55 Hm^3 , con un mínimo de 117 Hm^3 y un máximo de 1137 Hm^3 (Departamento de Hidráulica, 2009). Entonces, con el uso consuntivo máximo de agua de los dos emprendimientos mineros habrá una disminución del 4.47% del caudal anual promedio del río.

Si se consideran las necesidades hídricas del mes con mayor evapotranspiración (diciembre), con 26.6 Hm^3 y la capacidad mensual actual de distribución de la red de riego (32.1 Hm^3) (Departamento de Hidráulica, 2009), la superficie máxima que se podría regar cubriendo la demanda hídrica de los cultivos es 8022 ha, con un consumo de 159.7 Hm^3 . En este sentido, la capacidad de la red de riego para los meses de mayor demanda hídrica se constituye en la principal limitante para la expansión del área cultivada.

Teniendo en cuenta el régimen aluvional del río Jáchal, se analizaron los caudales mínimos de la serie histórica para conocer la probabilidad de ocurrencia de caudales inferiores a las necesidades anuales de agua calculadas para regar los cultivos del valle de Jáchal en el ciclo agronómico 2006-2007. Los cuatro años con déficit hídrico ocurrieron de manera secuencial durante el cuatrienio 1968-1972, con un volumen promedio medido de 135 Hm^3 . El dique Cuesta del Viento, ubicado aguas arriba de la toma de riego de Pachimoco, tiene una capacidad de almacenaje de 180 Hm^3 (UNSJ, 2002). Analizando la situación más crítica, es decir que se repita el período con el derrame mínimo histórico del río Jáchal, el embalse complementaría la demanda para satisfacer las necesidades de riego durante cuatro años sin que se vea afectada la capacidad operativa del dique.

Tabla 2. Valles irrigados de Jáchal: superficie cultivada y volumen de agua requerido mensual y anual (en Hm³), ciclo agronómico 2006-2007

Cultivo	Área	Volumen mensual (Hm ³)												Total anual (Hm ³)
	(ha)	E	F	M	A	M	Ju	JI	A	S	O	N	D	
Olivo	2082	6.31	4.85	4.35	3.02	2.37	1.90	2.59	2.75	3.47	4.87	5.76	6.47	48.71
Pasturas	1584	6.86	5.03	3.96	2.45	0.00	0.00	0.00	0.59	2.03	4.00	5.58	6.90	37.41
Cebolla	1122	3.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	1.67	2.02	2.77	4.43	4.98	21.05
Frutales	519	2.04	1.57	1.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	1.12	1.78	8.93
Cereales de verano	385	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.98	1.33	1.43	4.57
Cereales de invierno	344	0.00	0.00	0.44	0.49	0.50	0.46	0.63	0.60	0.59	0.00	0.00	0.00	3.18
Forestales	269	0.96	0.65	0.52	0.17	0.14	0.12	0.16	0.19	0.35	0.69	0.85	0.98	4.87
Ajo	82	0.00	0.00	0.05	0.07	0.06	0.06	0.10	0.14	0.22	0.34	0.18	0.00	1.03
Vid	67	0.25	0.19	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.17	0.21	0.29	1.15
Tomate	67	0.24	0.18	0.15	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.12	0.18	0.23	0.53
Otros cultivos de verano	61	0.22	0.16	0.13	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.17	0.21	0.48
Otras semillas	60	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.06	0.09	0.11	0.15	0.24	0.10	0.64
Otros cultivos de invierno	23	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10
Semilla de cebolla	15	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.21
Aromáticas	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Otros	729	3.16	2.32	1.82	1.13	0.00	0.00	0.00	0.27	0.94	1.84	2.57	3.18	14.81
TOTAL	7418	25.11	14.96	12.92	7.93	3.13	2.59	4.77	6.35	10.44	16.80	22.68	26.58	147.68

Tabla 3: Efecto de regulación del embalse Cuesta del Viento durante el ciclo de sequía máxima del río Jáchal (con 5% de probabilidad de ocurrencia del evento).

Año	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³
1	180.00	120.5	300.50	147.68	152.82
2	152.82	120.5	273.32	147.68	125.64
3	125.64	120.5	246.14	147.68	98.46
4	98.46	120.5	218.96	147.68	71.28
5	71.28	120.5	191.78	147.68	44.1

(1) Agua en el embalse proveniente del ciclo anterior. (2) Caudal mínimo anual promedio del río Jáchal, descontado el uso consuntivo de 14.5 Hm³ de las concesiones mineras Veladero y Lama. (3) Agua disponible para riego en el ciclo hidrológico anual. (4) Demanda máxima anual para regar los cultivos del valle de Jáchal. (5) Balance hídrico anual.

Por último, hay que considerar que la superficie total con derecho a riego agrícola de Jáchal demandaría una cantidad anual de agua de 433.16 Hm³, volumen que, aún considerando el efecto regulador de la represa Cuesta del Viento, no puede ser cubierto con el módulo histórico promedio del río Jáchal ni tampoco haciendo uso combinado del agua superficial y del acuífero subterráneo (Guimaraes & Furlotti, 1989).

CONCLUSIONES

Suponiendo que los dos yacimientos mineros extraen el caudal de agua máximo necesario para su funcionamiento en forma constante durante todo el año, se verificará una disminución de 4.47 % en el cauce del río Jáchal, equivalente al agua que habría que entregar para regar una superficie de 728 ha de cultivos según el patrón de uso de suelo agrícola actual. Teniendo en cuenta la ocupación de tierra en producción agrícola, la capacidad de distribución de la red de riego y la oferta hídrica promedio del río Jáchal, esto no generará déficit hídrico en los cultivos.

Como la principal restricción para la agricultura de valle es la capacidad de captación y conducción de agua de la red de riego, se puede afirmar que a mediano plazo no habrá cambios en la superficie cultivada en Jáchal, concluyéndose que el uso conjunto del agua para minería y agricultura puede ser cubierto en años normales por el derrame anual del río Jáchal. Si el análisis se realizara para el mes de diciembre, que con 27.81 Hm³ es el de mayor uso consuntivo considerando la demanda de agua para riego y para minería, tampoco habría déficit hídrico para riego ya que el promedio de caudales de la serie para este mes es de 41.8 Hm³.

Si bien en un año con bajas precipitaciones en cordillera se puede contar con la reserva del dique Cuesta del Viento, en caso que el ciclo hidrológico seco se extendiese por más de cuatro años se debería tener en cuenta medidas para asegurar la provisión de agua para los cultivos de Jáchal.

REFERENCIAS

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration. Guideline for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, 301 pp.

APN, 2008: *Plan de Manejo del Parque Nacional San Guillermo y Propuesta de Manejo de la Reserva de Biosfera San Guillermo*. Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires, 167pp.

Aubone, G.R., 1934: *Censo Agrícola. Estadísticas e informaciones de la provincia de San Juan*. Buenos Aires, 128pp.

BEMSA, 2004: "Descripción del proyecto". En: *Proyecto Pascua Lama. Texto ordenado del informe de impacto ambiental*. Volumen III, Sección 3.0. Knight Piésold Consulting, Barrick Exploraciones Mineras SA (BEMSA). San Juan, 189pp.

Bernstein, L.; Francois, L.E., 1973: "Leaching requirement studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage water". *Soil Science Society of America Journal* 37, 931-943

Castro, T. S., 1990: *Evaporación real de la vid*. Informe de Plan de Trabajo N° 7251. INTA, EEA San Juan (inédito).

Castro, T.S.; Gil, P.N.; Bocelli, J.A., 1984: *La salinidad de los suelos de Jáchal*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA San Juan. San Juan, sin paginar.

CFI, 1962: *Recursos hidráulicos superficiales*. Volumen 1. Serie Evaluación de los Recursos Naturales de Argentina, Tomo IV. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, 459pp.

CIPCAMI, 2006: *Estudio de líneas de base ambiental Jáchal, Iglesia, Calingasta. Caracterización de aguas naturales. Plan de Muestreo 2004 – 2005*.

- Secretaría de Estado de Minería. Provincia de San Juan, sin paginar.
- Cornejo, R.; Silva, S., 2000: *Características climáticas de Jáchal*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA San Juan. San Juan, 13pp.
- Departamento de Hidráulica, 2009: *Aforo de ríos. Cuenca del río Jáchal y del río Blanco*. Gobierno de la Provincia de San Juan. San Juan, 2pp.
- Departamento de Hidráulica, 2007: *Relevamiento agrícola en la provincia de San Juan. Ciclo 2006-2007*. Gobierno de la Provincia de San Juan. San Juan, 39pp
- Departamento de Minería, 2003: *Proyecto Veladero*. Subsecretaría de Minería. Provincia de San Juan, sin paginar.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O., 1976: *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudios FAO: Riego y Drenaje, 24. Roma, 194 pp.
- Fernández, H.; Menna, Z.; Orellano, J., 2006: *Impacto Hidrológico Proyectos "Veladero" y "Pascua Lama"*. San Juan, Argentina. Instituto de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. San Juan, 39pp.
- Guimaraes, R.; Furlotti, R., 1989: *Evaluación de la cuenca subterránea de los valles de Jáchal y Huaco. Año 1989*. Informe Técnico 121. Centro Regional de Agua Subterránea. San Juan, 11pp y anexos.
- Groeber, P., 1932: "Descripción geográfica de la alta cordillera de Rodeo y Jáchal". *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos*, tomo IV, 9-18.
- Heinsheimer, G., 1948: "On the relation of precipitation accumulation and melting of snow to the Stream flow in the San Juan River (Argentina)". *Asamblea General de la Association Internationale d'Hydrologie Scientifique*. Tomo II. Oslo, 101-108.
- INDEC, 2009: *Estadísticas sobre minerales y rocas de aplicación*. Base de datos electrónica. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos <<http://www.indec.mecon.ar/>>
- INA, 1998: *Mapa hidrogeológico de la provincial de San Juan*. Un mapa en una hoja, escala 1:500.000. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Instituto Nacional del Agua. Buenos Aires.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D.; Allen, R.G., 1990: *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manual N° 70*. American Society of Civil Engineers. New Cork, 332 pp.
- Jones, M. 2006: "Modelo hidrológico de la Cuenca del río de las Taguas Superior". En: *Proyecto Pascua Lama. Texto ordenado del informe de impacto ambiental*. Volumen X, apéndice TO41-1. Knight Piésold Consulting. San Juan, 46pp.
- Korte, F.; Coulston, F., 1995: "From Single-Substance Evaluation to Ecological Process Concept: The Dilemma of Processing Gold with Cyanide". *Ecotoxicology and Environmental Safety* 32, 96-101.
- Kumah, A., 2006: "Sustainability and gold mining in the developing world". *Journal of Cleaner Production* 14, 315-326.
- Logsdon, M.J.; Hagelstein, K.; Mudder, T.I., 2001: *El manejo del cianuro en la extracción de oro*. The International Council on Metals and the Environment. Ontario, 47pp.
- Lohn, P.; García, E., 1983: *Análisis e interpretación preliminar de la información química e hidrológica obtenida por la provincia en la cuenca del río Jáchal*. Documento D-57. Centro Regional de Agua Subterránea. San Juan, 92pp y anexos.
- McMahon, G.; Remy, F., 2003: "Principales observaciones y recomendaciones: una síntesis de los estudios de caso". En: *Grandes minas y la comunidad* (McMahon, G.; Remy, F., editores). Banco Mundial, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo y Alfaomega Colombiana S.A. Bogotá, 1-38.
- Miranda, O., 2008: "Factores que inciden en la elección de tecnología para riego en la agricultura argentina". En: *IV Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Agronomía. Mendoza, 5 y 6 de diciembre, 11pp.
- Miranda, O.; Degiorgis, A., 2006: Dictamen Técnico del Informe de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Pascua Lama (Barrick Exploraciones Argentinas SA/Exploraciones Mineras Argentinas SA). INTA EEA San Juan, San Juan. 44pp y anexos.
- Moori Koenig, V.; Bianco, C., 2003: Industria Minera. Estudio 1.EG.33.6. Préstamo BID 925/OC-AR. Oficina de la CEPAL-ONU. Buenos Aires, 139 pp.
- Morábito, J.A.; Salatino, S.; Mirabile, C., 1999: "El riego del olivo". En: *4to Simposio Internacional de Olivicultura*. Arauco 99, Mendoza. 29 pp.
- Moreno, L.; Neretnieks, I., 2006: "Long-term environmental impact of tailing deposits". *Hydrometallurgy* 83, 176-183.
- Mudd, G.M., 2007a: "Gold mining in Australia: linking historical trends and environmental an resource sustainability". *Environmental Science & Policy* 10, 629-644.
- Mudd, G.M., 2007b: Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability?. *Resources Policy* 32, 42-56.
- Salvioli, G., 2007: "Hidrometeorología". En: *Diversidad Biológica y Cultural de los Altos Andes Centrales de Argentina. Línea de Base de la Reserva de Biosfera San Guillermo, San Juan*. (Martínez Carretero, E., Ed). Editorial Fundación Universidad Nacional de San Juan. Impreso en Inca Editorial y Talleres Gráficos, Cooperativa de Trabajo Ltda. Mendoza, 63-111.

SANINDTEC, 1951: *Estudios del río Jáchal*. Informe 5, Tomo II. Agua y Energía Eléctrica. Buenos Aires, 179pp.

SANINDTEC, 1950: *Estudios del río Jáchal*. Informe 2. Agua y Energía Eléctrica. Buenos Aires, 147pp.

SMN, 2007: *Estación Meteorológica 305 (Jáchal): evaporación (1947-1982), precipitaciones (1961-2006) y temperaturas máximas y mínimas (1961-2006)*. Ministerio de Defensa, Secretaría de Planeamiento, Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires, documento electrónico.

UNSJ, 2002: *Análisis de los impactos sociales, culturales y ambientales de la minería*. Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería, Instituto de Investigaciones Hidráulicas. San Juan, 166pp.

Richards, L.A., 1954: *Saline and Alkali Soils. Agricultural Handbook N° 60*. United States Department of Agriculture. Washington, 160 pp.

WMCL, 2006: Lama-Veladero. Línea base hidrológica e hidroquímica distrital. En: *Proyecto Pascua Lama. Texto ordenado del informe de impacto ambiental*. Volumen VII, apéndice TO 2.31-2. Knight Piésold Consulting, Water Managements Consulting Ltda. San Juan, 53pp.

Anexo 1: Jáchal. Valores de las principales variables climáticas utilizadas para calcular las necesidades hídricas de los cultivos de Jáchal. Fuente: elaboración propia según SMN (2007) y Cornejo & Silva (2000)

Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temp. media (°C)	24.3	22.8	20.4	15.3	12.9	9.0	8.8	10.3	13.2	17.2	20.2	23.0
Temp. máxima media (°C)	31.3	29.7	27.2	23.4	20.2	17.4	17.4	19.1	21.7	25.7	28.6	31.3
Temp. mínima media (°C)	17	16	14	8.1	3.8	0.1	0.0	1.4	4.4	8.8	12.0	16.0
Humedad relativa (%)	51	56	61	64	61	60	55	54	53	47	42	46
Evaporación Tanque "A" (mm/día)	7.8	6.6	5.4	4.0	3.1	2.7	3.5	3.7	4.6	6.1	7.4	8.0
Velocidad viento (km/d)	118	101	81	69	60	70	90	80	96	128	130	143
Precipitación (mm)	38.7	39.4	20.5	8.6	1.5	1.6	1.3	5.7	2.2	3.0	4.4	13.9
Días con precipitación (N°)	5.0	5.3	3.2	3.3	2.3	2.0	2.4	2.5	2.3	1.5	3.0	3.9

Anexo 2: Coeficientes de cultivo utilizados

CULTIVOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Olivo (1)	0.77	0.77	0.76	0.75	0.73	0.70	0.70	0.71	0.74	0.76	0.77	0.77
Pasturas (2)	1.10	1.05	0.91	0.80				0.20	0.57	0.82	0.98	1.08
Cebolla (3)	0.90						0.60	0.80	0.80	0.80	1.10	1.10
Frutales (3)	1.00	1.00	0.95	0.35						0.40	0.60	0.85
Cereales de verano (2)	0.72								0.55	0.83	0.96	0.92
Cereales de invierno (2)			0.47	0.73	0.93	1.02	1.03	0.94	0.76			
Forestales (2)	0.90	0.80	0.70	0.33	0.33	0.33	0.33	0.37	0.57	0.83	0.88	0.90
Ajo (3)			0.20	0.42	0.48	0.53	0.66	0.9	1.19	1.33	0.60	
Vid (4)	0.95	0.92	0.66	0.25					0.5	0.82	0.88	1.05
Tomate (2)	0.9	0.89	0.8	0.67					0.37	0.60	0.76	0.86
Otros cultivos de verano (2)	0.9	0.89	0.8	0.67					0.37	0.6	0.76	0.86
Otras semillas (3)				0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	0.80	0.80	1.10	0.40
Otros cultivos de invierno (2)			0.18	0.35	0.48	0.52	0.46	0.35	0.2	0.08		
Semilla de cebolla (3)				0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	0.80	0.80	1.10	0.40
Aromáticas (2)				0.18	0.35	0.48	0.52	0.46	0.35	0.20	0.08	
Otros (2)	1.10	1.10	0.90	0.80				0.20	0.60	0.80	1.00	1.10

Fuentes: (1) Morábito et al. 1999; (2) Doorenbos & Pruitt, 1976; (3) Allen et al. 1998; (4) Castro, 1990.

**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN PROMEDIO RECIBIDO POR EL HUMEDAL
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO BLANCO (BAJO PAPALOAPAN; VERACRUZ),
A TRAVÉS DEL CÁLCULO DE UN BALANCE DE AGUAS**

**ASSESSMENT OF THE AVERAGE VOLUME RECEIVED BY THE WETLANDS OF THE BLANCO RIVER
SUB-BASIN (LOWER PAPALOAPAN, VERACRUZ), BY CALCULATING A WATER BALANCE**

Enrique A. Sánchez Camacho¹

Resumen

El presente escrito forma parte de un trabajo de mayor amplitud y alcance denominado “*Inventario, delimitación, caracterización y uso sustentable de los humedales de la cuenca del Río Papaloapan*”, elaborado en la Subcoordinación de Gestión Integrada del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en convenio con el Instituto de Ecología A.C., cuyo objetivo fue establecer una clasificación para los humedales de la cuenca del río Papaloapan (Veracruz, México); lo que aquí se muestra corresponde esencialmente al subproyecto de aguas superficiales, en cálculo, medición y resultados.

Se exponen los resultados cuantitativos alcanzados para la estimación del volumen de agua que recibe el humedal ubicado a la salida de la subcuenca del río Blanco –dicha subcuenca forma parte de la cuenca del río Papaloapan–; así como la manera en que estos fueron obtenidos y verificados a través de mediciones *in situ*. Sobre la información adicional que proviene de otros subproyectos pertenecientes al trabajo señalado al principio de este resumen, solo se emplean los resultados.

El humedal a la salida de la cuenca del río Blanco está asociado a la laguna de Alvarado misma que es costera, la comunidad arbórea dominante en la zona son los manglares. Otro rasgo característico importante en la zona de estudio son los pastizales inducidos a favor de la ganadería por la gente del lugar.

El volumen estimado se obtuvo a través del cálculo del balance de aguas de superficie y subterráneas, con el registro histórico disponible existente y con información hidrogeológica respectivamente. El cálculo del balance de aguas está sustentado en la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (Comisión Nacional del Agua 2000), toda vez que ahí se establecen las condiciones en cuanto a información y forma que ha de cumplir un balance de aguas, a fin de considerársele adecuado. Por razones de espacio, para la parte de aguas subterráneas solo se señalan los resultados obtenidos –igualmente fue otro de los subproyectos del trabajo señalado al principio de este escrito – para la zona de estudio.

Una segunda parte del presente trabajo corresponde a los aforos realizados en el punto de salida de la subcuenca del río Blanco, mismos que corroboraron con un margen aceptable de error los resultados de los balances de aguas superficiales y subterráneas.

Dichos resultados muestran en primera instancia una aceptable vinculación espacial; dado que los resultados del cálculo del balance se efectúan a una escala de 1:50,000, en tanto los aforos que verificaron los resultados del balance en términos generales podemos aceptar pertenecen a una escala de 1:100, toda vez que éstos últimos se realizaron en dos secciones transversales en el río que distan entre sí del orden de los 200 metros.

Asimismo nuestros cálculos en la parte baja comparados con los aforos realizados en la misma zona, establecen con una nitidez y certeza confiables, que el agua superficial contribuye al volumen que recibe el humedal en términos de porcentaje con el 39% en época de estiaje, y con el 67% en época de lluvia; los porcentajes complementarios son aportados en cada época por el agua subterránea.

El establecimiento de estas cantidades, permite establecer un vínculo numérico entre dichos resultados, y las condiciones que actualmente se observan en el humedal en cuanto a volumen de agua se refiere. Por tanto temas como ‘el desarrollo sustentable’, ‘caudal ecológico’ o ‘gestión integrada’ tienen indefectiblemente como elemento subyacente el tema aquí presentado: cuánto requiere una parte concreta de un ecosistema. El otro componente del tema es de qué calidad.

Palabras clave: balance de aguas superficiales, humedales, desarrollo sustentable, gestión integrada del agua.

Abstract

This writing is part of a work of greater breadth and scope called “*inventory, delineation, characterization and sustainable use of wetlands in the basin of the Rio Papaloapan*” prepared in the Subcoordinación de Gestión Integrada del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), in agreement with the Instituto de Ecología AC, whose goal was to establish a classification for wetlands Papaloapan River (Veracruz, Mexico), as shown here is essentially the sub-surface

¹ Enrique A. Sánchez Camacho, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, esanchez@tlaloc.imta.mx., Subcoordinación de Gestión Integrada del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnahuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos - CP 62550 MÉXICO.

Artículo enviado el 24 de febrero de 2010

Artículo aceptado el 17 de marzo de 2010

water, in calculus, measurement and results.

Presents the quantitative results obtained for estimating the volume of water that the wetland located to get out of the Blanco River sub basin that is part of the Papaloapan river basin as well as how these were obtained and verified through in situ measurements. On additional information that comes from other sub-projects pertaining to the work mentioned at the beginning of this summary, only use the results. The wetland at the outlet of the Blanco River basin is associated to Alvarado lagoon itself is coastal community dominant tree in the area are the mangroves. Another important feature in the study area are driven to pasture for livestock by locals.

The estimated volume was obtained by calculating the balance of surface and groundwater, the existing historical record available and hydrogeological information respectively. The water balance calculation methodology is supported by the Mexican Official Standard NOM-011-CNA-2000 (Comisión Nacional del Agua 2000), since there are set conditions in terms of information and how it has to fulfill a water balance, so regarded appropriate. For reasons of space, to the groundwater only say the results-also was another subproject of work outlined earlier in this letter - to the study area.

A second part of this work relates to the gauging performed at the point of exit from the Blanco River sub-basin, corroborating them with an acceptable margin of error the outcome of the balance sheets of surface water and groundwater.

These results show acceptable primarily a spatial relationship, since the results of the calculation of the balance sheet are carried out at a scale of 1:50,000, while the aphorisms that verified the results of the overall balance we can accept belong to a scale of 1:100, whenever the latter were made in two cross sections in the river, distant from each other in the order of 200 meters.

Also our calculations in the lower compared with discharge measurements made in the same area, provide clarity and certainty with reliable surface water contributes to the volume that receives the wetland in terms of percentage with 39% in times of drought, and with 67% in the rainy season, the additional percentage in every age are contributed by ground water.

The establishment of these quantities, numerical provides a link between these results and the conditions currently observed in the wetland in terms of volume of water is concerned. So issues like 'sustainable development', 'ecological flow' or 'integrated water management' are invariably as an underlying theme presented here: the requires a specific part of an ecosystem. The other component of the matter is that quality.

Key words: balance of surface water, wetlands, sustainable development, integrated water management.

INTRODUCCIÓN

El principio de la modificación del concepto de la gestión del recurso agua – al menos en la teoría- ocurre tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, que tuvo lugar en Estocolmo del 5 al 16 de junio del año 1972.

En el punto 6 de la declaración señala "*Hemos llegado a un momento en la historia en que debemos orientar nuestros actos en todo el mundo atendiendo con mayor cuidado a las consecuencias que puedan tener para el medio...*", y en su principio 2 establece: "*Los recursos naturales de la Tierra, incluidos el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna, y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras mediante una cuidadosa planificación u ordenación...*" (UNESCO 1972).

Posteriormente sucedieron otros encuentros mundiales –que por diversas razones son mucho más citados en la literatura del tema que este primero- por citar solo dos de ellos:

- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, Mar del Plata. Evaluación y usos de los recursos hídricos en 1977
- Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente, Dublín en enero de 1992

En los documentos generados en esas y otras reuniones mundiales que les sucedieron a las antes

citadas, estaba contenida en diferentes palabras, la inquietud de que el modelo de gestión dominante, esto es, que solo satisface las necesidades de nuestra especie –y por cierto no la considera en su totalidad- muestra debilidades que provocan y explican el desequilibrio cada vez más evidente que ocurre en el ambiente y genera tal modelo; lo que nos lleva a la conclusión lógica de que es necesario modificar el modelo si pretendemos seguir obteniendo beneficios del ambiente.

Los temas de desarrollo sustentable, caudal ecológico y gestión integrada, han intentado de algún modo ser la punta de ariete para este propósito, sin embargo en términos generales los trabajos al respecto dejan de lado el aspecto de cuánta agua requiere el ambiente y ello inevitablemente margina al ambiente de cualquier beneficio en los resultados que puedan alcanzarse en tales temas. Reza un refrán popular de lógica pragmática innegable: "lo que no puedes contar, no lo puedes administrar".

Aunque es cierto que estos temas han evolucionado desde 1972 hasta nuestros días, la práctica recurrente es que los trabajos apegados a la línea de ingeniería transiten por la revisión del incremento en el espacio temporal de los usos consuntivos –agricultura, uso doméstico, uso municipal y uso industrial- y el no consuntivo –generación de hidroelectricidad-, proponiendo mejoras en la operación de la infraestructura o en la propia infraestructura que se utiliza para satisfacer la demanda de estos usos (Mitchell

to agregar la variable correspondiente a la ecuación de balance hídrico.

El lugar elegido como caso de estudio, es la parte baja de la cuenca del río Papaloapan, en específico en la salida de la subcuenca del río Blanco, que es uno de sus tributarios a la vez que alimentador de la zona lagunar de Alvarado, sitio donde se encuentra uno de los mayores humedales costeros de la república mexicana.

METODOLOGÍA

En la República Mexicana el cálculo del balance hídrico se encuentra regido por Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (Comisión Nacional del Agua 2000), en dicha norma se establecen las condiciones en cuanto a información, forma y metodología que debe cumplir un balance de aguas apropiado.

$$\boxed{\text{Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica}} = \boxed{\text{Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo}} - \boxed{\text{Volumen anual actual comprometido aguas abajo}}$$

La ecuación en forma escrita con la que se calcula la disponibilidad de acuerdo a la norma antes citada, tal como se encuentra en su publicación oficial (Diario Oficial de la Federación 2002), es la siguiente:

$$\boxed{\text{Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo}} = \boxed{\text{Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba}} - \boxed{\text{Volumen medio anual de escurrimiento natural}}$$

$$- \boxed{\text{Volumen anual de retornos}} + \boxed{\text{Volumen anual de importaciones}} - \boxed{\text{Volumen anual de exportaciones}} - \boxed{\text{Volumen anual de extracción de agua superficial}}$$

Como en el caso anterior –forma en que aparece publicada en forma oficial (Diario Oficial de la Federación 2002)- se cita la ecuación para el cálculo del primer sumando del lado derecho de la igualdad de la ecuación 1, en seguida:

Es necesario señalar que esta variable es la que nos interesa conocer –volumen medio de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo-, y la cual finalmente es comparada con los aforos realizados a la salida de la subcuenca del río Blanco, objeto del presente escrito.

Como información adicional, es pertinente señalar que ambas expresiones y el documento completo de la NOM-011-CNA-2000, es posible consultarlo en el sitio: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-011-CNA.pdf>

Para efectuar este cálculo por subcuenca se presentan dos casos en el cálculo del volumen medio anual de escurrimiento natural de la cuenca, ello tie-

ne que ver con la información disponible de registros hidroclimatológicos:

- Si se dispone de registro hidrométrico se emplea el método directo que describe la ecuación 2, o bien
- No se dispone del registro hidrométrico, se emplea un método indirecto para el cálculo de tal escurrimiento utilizando el registro de precipitación, y alguna metodología dentro de la literatura acerca del tema.

Para ambos casos es necesaria la delimitación de los parteaguas de las subcuencas, misma que se realizó con los vértices que definen cada una de las doce subcuencas que conforman la cuenca del río Papaloapan (Diario Oficial de la Federación 2005), el mejoramiento de tales polígonos se realizó con el apoyo de la topografía y la hidrografía a escala de 1:50,000 de INEGI en la plataforma ArcView v9.1.

Asimismo se realizó la recopilación, revisión y procesamiento de los registros disponibles de hidrometría y de precipitación, así como la ubicación geoespacial de las estaciones en que se registran, ello con

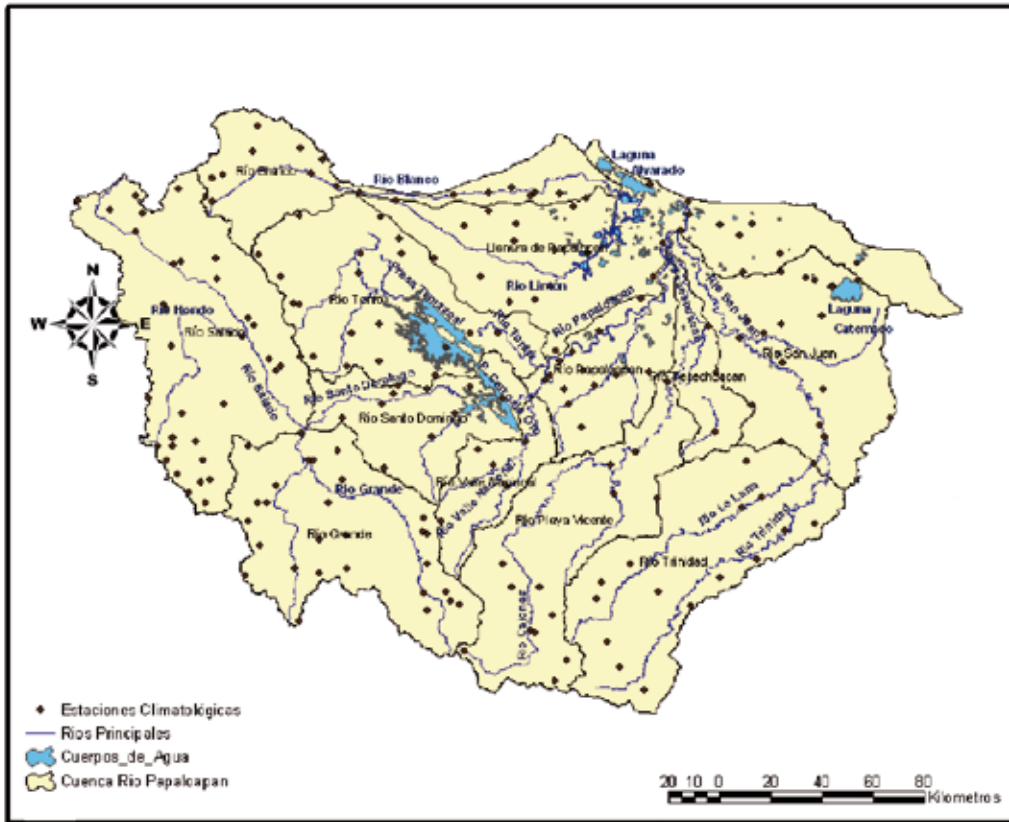


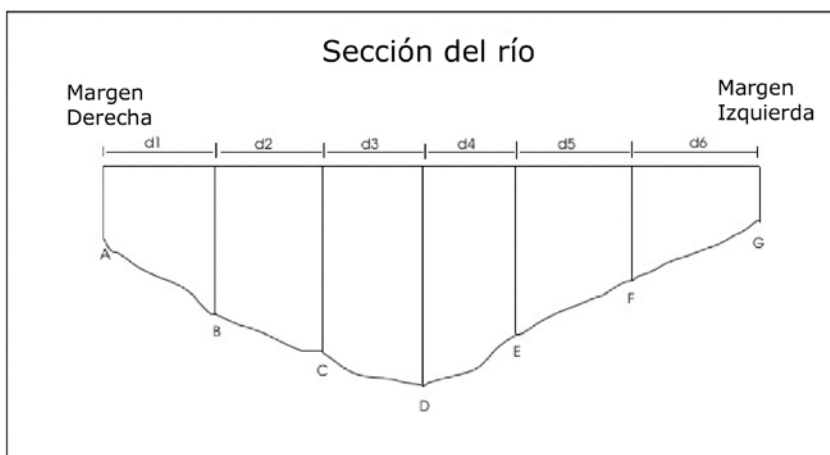
Figura 3. Estaciones Climatológicas en la cuenca del río Papaloapan. Cuenca Río Papaloapan Estaciones climatológicas.

Elaborado con información descrita en este apartado, en plataforma ArcView v 9.1

cialmente. Por tanto para el escurrimiento se establece una frontera temporal bien definida por el periodo de lluvias.

Esto implica que el volumen llovido anualmente tiene poca variación en tiempo y espacio, y la capacidad del suelo para retener la humedad que se infiltrará

para pasar a ser agua subterránea, tiene también tendencia que puede considerarse estable -, que por los resultados obtenidos aquí parece ser válida la aseveración-. Como información adicional, el subproyecto de Percepción Remota detectó un incremento en la variación del uso del suelo en la parte intermedia y alta de la cuenca del río Papaloapan, lo



Mediciones de distancias en la sección transversal	
Tramos	Dist (m)
Tramo A-B	12.80
Tramo B - C	10.39
Tramo C - D	17.77
Tramo D - E	17.00
Tramo E - F	16.00
Tramo F - G	13.00
Total	86.96

Figura 4. Ejemplo de una sección transversal levantada en zona de estudio, salida de subcuenca del río Blanco

Elaborado con información propia. La profundidad máxima en este caso fue de 4.6 m en el punto D.

que de mantenerse en el futuro inmediato modificará este patrón.

El cálculo del balance de aguas superficiales para la cuenca del río Blanco se realizó a nivel mensual, lo que permite un comparativo con las dos campañas de medición realizadas en la salida de la subcuenca del río Blanco, una en pleno estiaje (abril 2008) y la segunda poco después de terminada la época de lluvia (noviembre de 2008).

La tabla 1 muestra los valores promedio de volumen para cada mes, obtenidos con el cálculo de la disponibilidad para la subcuenca del río Blanco; la última columna muestra dichos valores transformados a caudal instantáneo.

El valor estimado de agua subterránea fue obtenido de estudios geohidrológicos y corroboraciones con mediciones en campo en niveles de pozos y norias en la zona de estudio.

Tabla 1. Valores de escurrimiento calculado aguas abajo en la subcuenca del río Blanco

Mes	Vol hm ³ promedio	Q (m ³ /s) superficial
Enero	110.61	41.30
Febrero	83.38	34.47
Marzo	75.05	28.02
Abril	88.41	34.10
Mayo	99.93	37.31
Junio	193.44	74.63
Julio	291.62	108.88
Agosto	309.99	115.74
Septiembre	377.92	145.80
Octubre	324.59	121.19
Noviembre	172.98	66.74
Diciembre	162.94	60.83

Intercomunicación de agua subterránea en la cuenca del río Papaloapan

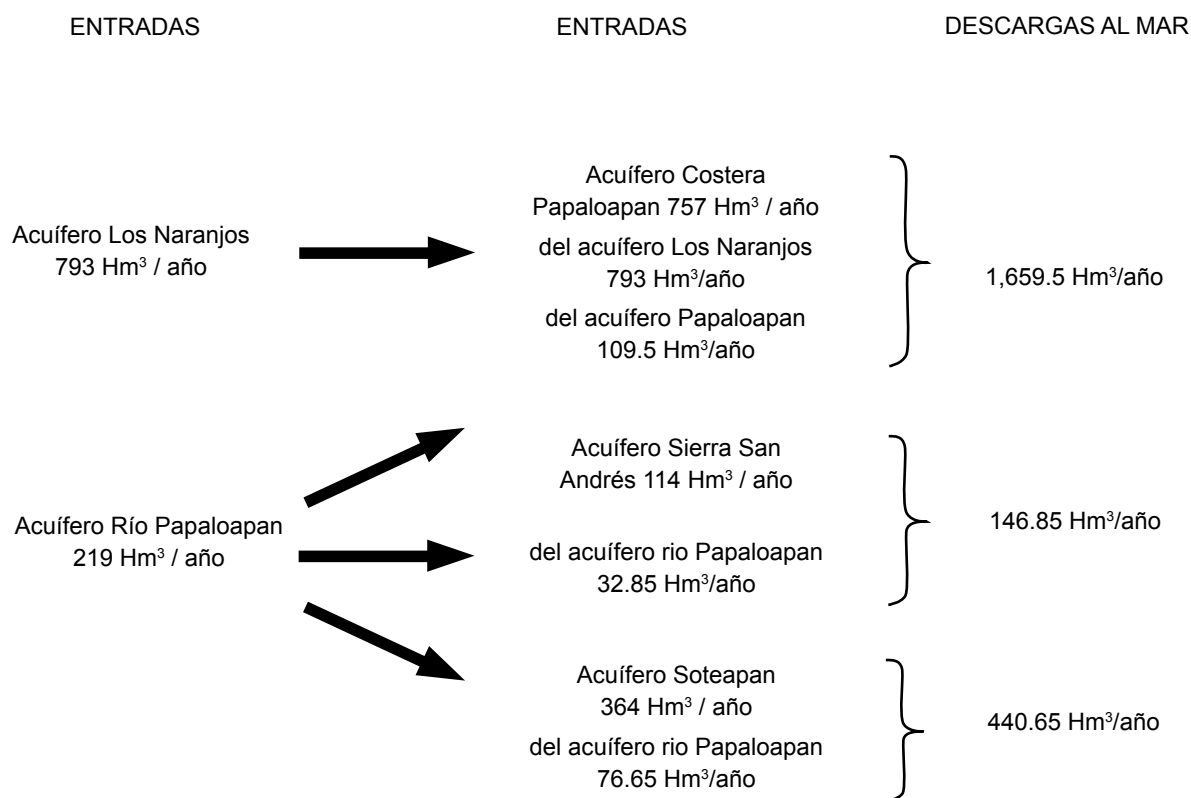


Figura 5. Intercomunicación de los acuíferos en la cuenca del río Papaloapan

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2008

El balance de aguas subterráneas señala para la zona que nos interesa, misma que se encuentra sobre el acuífero denominado Costera Papaloapan, recibe agua de los acuíferos Los Naranjos un volumen de 793 hm³/año y del acuífero Río Papaloapan 109.5 hm³/año, que sumados a sus 757 hm³/año, tiene entonces un volumen de 1659.5 Mm³/año (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2008). Este

último volumen anual transformado en caudal instantáneo es el valor de 52.62 m³/s, mismo que debe ser aproximadamente el volumen aportado al humedal de la salida de la subcuenca del río Blanco de manera casi constante.

La figura 7 muestra en forma gráfica los promedios mensuales históricos calculados en la zona de la subcuenca del río Blanco; la descripción es: la línea

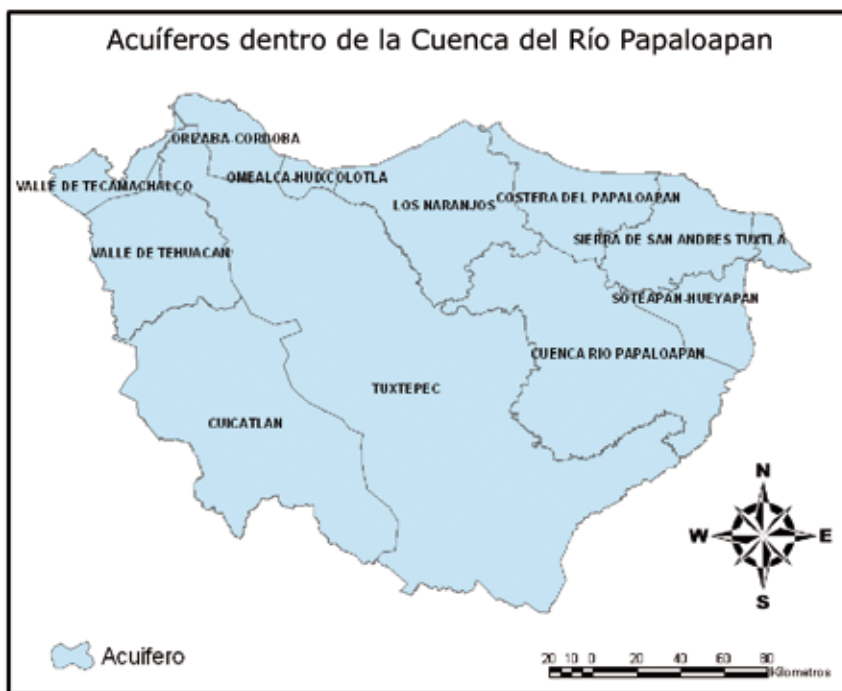


Figura 6. Distribución de acuíferos en la cuenca del río Papaloapan
Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2008.

constante con símbolos de rombo corresponde al caudal del agua subterránea, la línea con símbolo de cuadrado indica la variación del caudal de agua superficial. Y la línea con el símbolo de triángulos indica la variación promedio del caudal con la suma de los dos anteriores valores para cada mes. En tanto los círculos que aparecen en los meses de abril y noviembre, corresponden a los valores aforados en los meses ya antes señalados.

En la tabla 2 se muestran los resultados en forma numérica; como es visible dichos resultados son satisfactorios obsérvese la diferencia entre lo que fue calculado y lo medido en el punto de salida de la

subcuenca del río Blanco en la última columna de la derecha de esta tabla.

A fin de establecer con claridad el cercanía de ambos resultados, es preciso señalar que tanto el cálculo del escurrimiento de agua superficial y de agua subterránea, fueron obtenidos de manera absolutamente independiente; y al momento de la realización de los aforos no se disponía aun de los resultados de los cálculos. De ahí que al tener una diferencia máxima del 5.2% (ver tabla 2, última columna) entre lo calculado y lo aforado, consideramos que es un buen resultado.

Tabla 2. Comparación de caudales calculados contra aforados

Mes	Ab promedio histórico calculado superficial (m ³ /s)	Caudal promedio histórico calculado subterráneo (m ³ /s)	Suma de caudales superf. y subter. (m ³ /s)	Caudal promedio aforado. (m ³ /s)	Diferencia entre Suma de caudales y Caudal promedio aforado
Abril	34.10	52.62	86.72	87.24	0.6 %
Nov	66.74	52.62	119.36	113.11	5.2%

Composición de caudal en parte baja subcuenca río Blanco

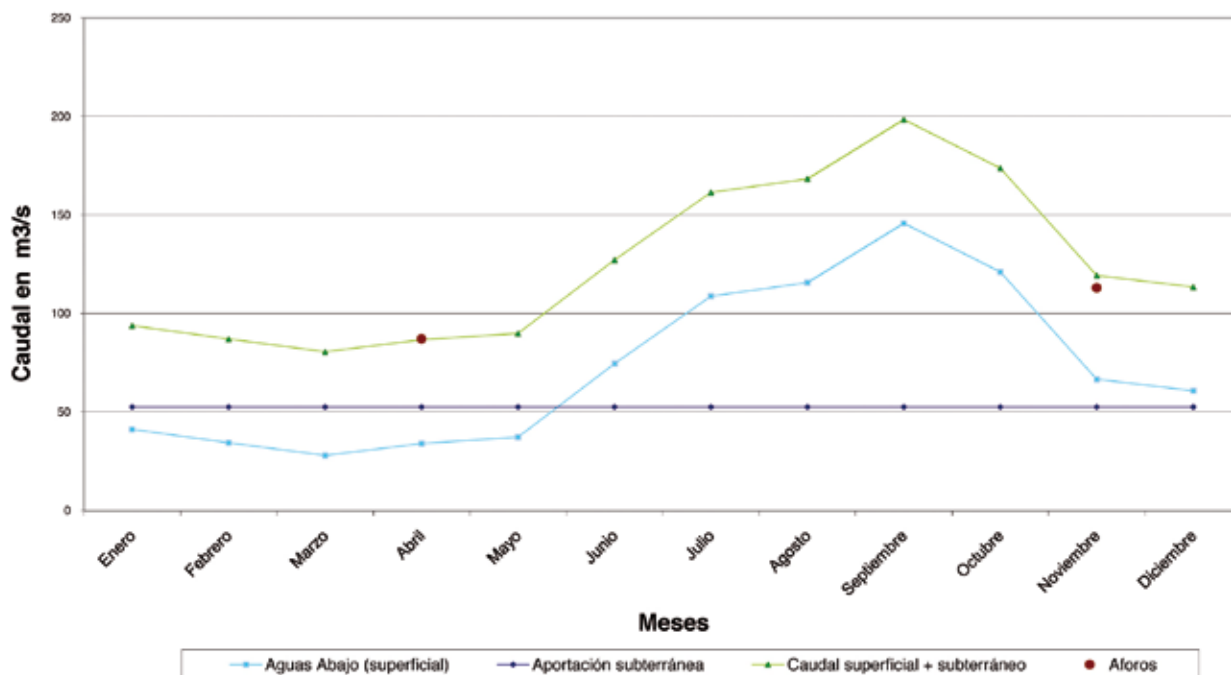


Figura 7. Resultados en la salida de la subcuenca del río Blanco

CONCLUSIONES

En primer lugar que este caso mostrado y sus resultados, logran vincular resultados de diferente escala espacial; dado que los resultados del cálculo de escurrimiento se efectúan en el mejor de los casos a una escala de 1:50,000, en tanto los aforos en términos generales podemos aceptar pertenecen a una escala de 1:100. En segundo término, dada la estructura de la ecuación del cálculo del volumen promedio de escurrimiento es válido su resultado para el término de aguas abajo y lo que puede aforarse en la salida de la subcuenca.

Asimismo, a través de la estadística y con las condicionantes pertinentes, nuestros cálculos en la parte baja comparados con los aforos realizados en la misma zona (véase tabla 2 y figura 7), establecen con una nitidez y certeza confiables, que el agua superficial contribuye con el humedal en términos de porcentaje del 39% en época de estiaje (campaña del mes de abril) a 67% en época de lluvia (campaña del mes de noviembre); los porcentajes complementarios son aportados en cada época por el agua subterránea.

Para obtener un resultado más preciso en la salida de la subcuenca del río Blanco, es necesario validar esta metodología para los otros meses del año con las correspondientes mediciones en el sitio, aunque es pertinente señalar que existe el inconveniente de que durante el periodo de lluvias esa zona se inunda, dadas características de planicie que tiene, y el cauce que tiene un ancho de alrededor de 90 metros

se diluye en esa planicie que se convierte en una laguna.

Con una curva con puntos para cada mes durante todo el año, haría factible la certeza de la variabilidad en el caudal en ese punto, y con ello tener la posibilidad de ese valor cuantitativo expresado en una curva vincularlo a las características de la biota existente. Este ejercicio repetido en la parte media y en la parte alta de la subcuenca, es decir, medir en la parte media y alta -de ser posible- y repetir el cálculo del escurrimiento utilizando el punto de aforo como punto de control para el cálculo del término A_b , nos daría una segunda dimensión de cómo se mueve el agua a lo largo del cauce principal de la subcuenca, lo cual aportaría más información para decidir que actividades es pertinente mantener y cuales corregir.

La última circunstancia nos llevaría finalmente a tener certidumbre de que acciones en concreto se pueden tomar, en el aspecto de conservación del sitio ello sin olvidar que parte del recurso es imprescindible para nuestra comodidad, sustento y desarrollo.

REFERENCIAS

Aparicio F. 2001. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México D.F. 303 p
 Castro, L., Y. Carvajal & E. Monsalve. 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Vol 10, No 2, julio - diciembre de 2006

- <http://ingenieriayuniversidad.javeriana.edu.co/lyU-Vol10N2CaudalAmbiental.htm>. 07/08/2009
- Comisión Nacional del Agua. 2000. NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, México, 20 p
- Diario Oficial de la Federación. 2002. 17 de Abril de 2002
- Diario Oficial de la Federación. 2005. 26 de Agosto de 2005.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006a. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006b. Extractor Rápido de Información Climatológica III
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2008. Inventario, delimitación, caracterización y uso sustentable de los humedales de la cuenca del Río Papaloapan CP0744.4. Subproyecto: III. Evaluación Geohidrológica de la cuenca del Papaloapan. México. 503 p
- Kotler, H. & G. Caire. 2009. Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales –Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México, 380 p.
- Kuylenskierna, J.L., G. Björklund & P. Najlis. 1997. Sustainable water future with global implications: everyone's responsibility. *Natural Resources* Vol 21 No.3 pp 181-190, 1997. Elsevier Science Ltd
- Mitchell, T.E. 1994. Applying Sustainable Development, *Civil Engineering—ASCE* Vol. 64, No. 12, December 1994, pp. 62-64
- Muñoz R. & A. Ritter. 2005. Hidrología Agroforestal. Ediciones Mundi-Prensa. España. 348 p
- Tiffer S.R. Caudales Ambientales: comentarios para su Aplicación en la Protección de la Biodiversidad Acuática y los Ríos en Costa Rica. Taller Internacional. Estimación del caudal de compensación (ambiental) en sistemas regulados por proyectos hidroeléctricos. 5 y 6 de junio de 2007, San José, Costa Rica. UNESCO y Plan Hidrológico Internacional. http://www.grupoice.com/esp/temas/eventos/tall_internac/pdf/dia2/10cau_amb_ice.pdf. 20/10/2009
- UNESCO 1972, Hitos del Agua.
- Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. http://www.unesco.org/water/wwap/milestones/index_es.shtml#top . 03/11/2009.
- Universidad Autónoma Metropolitana. 2009. Repensar la cuenca: La Gestión de los ciclos del agua en el Valle de México, Informe mayo 2009. http://www.consejosdecuenca.org.mx/modules.php?name=Web_Links&l_op=viewlink&cid=6&min=0&orderby=titleA&show=10. 11/11/2009.
- Venegas F. & R. Rojas. 2009. Teoría y Práctica del ordenamiento y manejo sustentable del territorio: Tijuana-Rosarito-Tecate- Baja California, México. *Información Tecnológica* Vol 20(3), pp 73-89, 2009.
- Yetter J. 2004. Hydrology and Geochemistry of freshwater wetlands on the Gulf Coast of Veracruz, Mexico, Thesis for the degree of Master of Science in Earth Sciences, University of Waterloo. 168 p

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación en algunas de las actividades efectuadas para la realización de este trabajo a la ingeniera M. Eugenia Maya M.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

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

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

Formato

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

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

Texto

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

Referencias

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

Figuras y Tablas

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

Las figuras, ilustraciones y fotografías digitales deben ser enviadas en forma separada, debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con una breve descripción.

Las tablas deben ser enviadas por separado, enumeradas y con un título, que aparecerá en la parte superior de la misma. Deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas, preferiblemente no debiendo exceder un máximo del 50% del tamaño de la página. NOTA: Las tablas deben utilizar el Sistema Internacional de unidades

Remisión de Trabajos

Los autores deberán enviar sus trabajos en solamente en formato electrónico a aqualac@unesco.org.uy.

Derechos de autor

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la Revista.

NOTA: Descargue las instrucciones en versión extendida en www.unesco.org.uy/phi/aqualac

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Aqua-LAC journal is a multidisciplinary publication that will contain articles, technical notes and water resources reviews, as much in a scientific as in an economic and social dimension.

The articles must be the result of an original research, dully designed and containing **title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, conclusions, acknowledgments (optional), and bibliographic references**. The manuscripts presented will be originals in Spanish or English, on subjects related to the areas of the journal. Will be written with Arial font size 10 pt, with single spacing, 2 cm margins, and with a length between 8 and 15 pages including tables and illustrations.

Format

First page: will include the title in Spanish and English, that should be concise reflecting the content of the document, the authors names and their affiliation (name to their belonging institution, telephone, fax and e-mail). If scientific names appear in the title, this should be written according with those in ITIS (Integrated Taxonomic Information System, <http://www.itis.usda.gov/>) if they are available.

Abstract: the articles must include a representative abstract, in the language of the paper and in the other official language of the journal. Also, 3-6 key words in both languages will be requested, separated by commas to allow finding the manuscript in the international databases including the journal.

Text

Shall be consistent with the type of journal, following the standard format presented in the template provided in the Aqua-LAC web-page.

References

References that appear in the text should be presented in the Bibliographic References section in alphabetical and chronological order. Only works cited in the text should appear in the References section and viceversa.

Tables and Figures

Figures, drawings and digital photos are preferable in GPS or TIFF, 300 DPI (colour) and 1200 DPI (black and white).

The figures, illustrations and digital photos should be sent separately, properly identified with a number that should be consistent with the way they are mentioned in the manuscript and a short description.

The tables should be sent separately, numbered and with a title that will be shown on its upper part. In the text the tables should be cited with a rising numeration order according to its description, preferably not exceeding a maximum of 50% of the size of the page.

NOTE: The tables should use the International Units System.

Submission of manuscript

Manuscripts must be submitted only in electronic format to aqualac@unesco.org.uy.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree for the author's rights to be transferred to the Journal.

NOTE: Download the extended instructions from www.unesco.org.uy/phi/aqualac

UNESCO

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

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

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 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

