



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. 10  
MAR 2018

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

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



## CONSEJO EDITORIAL

- Eric Alfaro - Clima  
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Avila - Ciencias Sociales / Antropología Social  
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura  
International Research Institute  
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología  
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos  
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas  
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación  
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutierrez - Hidrología de Superficie  
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Lilián Laborde - Legislación  
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología  
IHE Delft, Países Bajos
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas  
University of California Davis, USA
- Poliopro Martínez Austria - Ingeniería Hidráulica  
Universidad de las Américas Puebla, México
- Victor Pochat - Gestión Integrada  
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS  
Programa de las Naciones Unidas  
para el Medio Ambiente
- STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF**
- Editor en Jefe / Editor in Chief**  
Roberto Pizarro
- Editor Ejecutivo / Executive Editor**  
Miguel Doria  
UNESCO
- Editores Invitados / Guest Editors:**
- Poliopro Martínez Austria  
Cátedra UNESCO en Riesgos  
Hidrometeorológicos  
Universidad de las Américas Puebla
- Marta Paris  
Cátedra UNESCO Agua y Educación  
para el Desarrollo Sostenible  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral
- Asistente Editorial / Editorial Assistant**  
Cynthia Rivera  
UNESCO
- Diseño Gráfico / Graphic Design**  
Ser Gráficos
- Fotografía de Portada / Cover Design**  
Gabriel Soumis-Dugas  
UNESCO

## CONTENIDO / CONTENTS

- El caudal ambiental en el Manejo Integrado de las Cuencas:  
caso de estudio (Río Verde, Oaxaca, México)
- The environmental flow in the Integrated Management of  
Watersheds: case study (Río Verde, Oaxaca, Mexico) ..... 1
- González Villela, Rebeca; Sánchez Chávez, Javier;  
Bravo Inclán, Luis A.; Mijangos Carro, Marco**
- Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo  
humano, sinónimo de agua segura
- Rainwater collection systems for human consumption,  
safe water synonymous ..... 15
- Basán Nickisch, Mario; Sánchez, Luciano; Tosolini,  
Rubén; Tejerina Díaz, Fabián; Jordan, Patricia**
- Balance de agua en un acuífero como base  
para la gestión sostenible y seguridad hídrica
- Groundwater balance to support sustainable  
management and water security ..... 26
- D'Elia, Mónica; Paris, Marta; Pérez, Marcela**
- Aruba's Desalination's Knowledge and Experience:  
Conquering the sea toward desalination's sustainability
- Conocimiento y experiencia de la desalinización en Aruba:  
Conquista del mar hacia la sostenibilidad de la desalinización..... 39
- Marchena, Filomeno A.; Halman, Johannes I. M.**
- Origen de suelos depositados en la subcuenca del río  
Tapacalí, Madriz, Nicaragua mediante el uso de la técnica  
de isótopos estables de compuestos específicos
- Study of the origin of soils deposited in the Tapacalí river  
sub basin, Madriz, Nicaragua using the technique of stable  
isotope of specific compounds ..... 51
- Caballero Arbizu, Yader Santiago; de los Santos  
Villalobos, Sergio**
- Actualización hidrogeológica y disponibilidad  
del acuífero del valle de Sébaco, Nicaragua
- Hydrogeological update and availability of the Sébaco  
Valley aquifer in Nicaragua ..... 61
- Delgado Quezada, Valeria; Flores Meza, Yelba del Carmen**
- Análisis de los criterios para proteger la vida acuática:  
el río Sonora después del derrame minero de 2014
- Analysis of criteria to protect aquatic life:  
the Sonora river after the 2014 mining spill ..... 75
- Díaz Caravantes, Rolando E.; Duarte Tagles, Héctor;  
Pallanez Murrieta, Maribel; Moreno Vázquez, José Luis;  
Mejía Santellanes, Javier Alberto; Durazo Gálvez, Francisco**
- Caudales de conservación de los ecosistemas fluviales  
del río frío en Colombia, tramo Cajicá, Chía
- Conservation flows of river ecosystems  
of the frío river in Colombia, analysis section Cajica, Chia..... 88
- Agualimpia Dualiby, Yolima del Carmen; Castro Méndez,  
Carlos Enrique**
- El agua, el ingreso y la pobreza
- Water, income and poverty ..... 97
- Vargas Hidalgo, Alberto; Martínez Austria, Poliopro**
- El agua se abre paso con la cátedra Francisco de Albear
- Water gains access with the Francisco de Albear chair ..... 111
- Torres Hugues, Ronnie; Martínez Valdés, Yaset**
- Los conflictos y movimientos sociales por el agua en México,  
desde la perspectiva de la GIRH
- Conflicts and social movements on water in Mexico,  
from the IWRM perspective ..... 120
- Vargas Velázquez, Sergio**
- Líneas de ribera, riesgo hídrico y GIRH. Caso del río  
Quemquemtreu en el Bolsón, Provincia de Río Negro, Argentina
- Riparian lines, water risk and IMWR. Case of the river  
Quemquemtreu, Río Negro Province, Argentina ..... 134
- Nini, Martín; Lozeco, Cristóbal; Petri, Daniel**
- Escenarios hidrológicos fluctuantes en una región húmeda  
y su relación con la disponibilidad de agua
- Fluctuating hydrological scenarios in a humid region  
and its relation to water availability ..... 142
- Hämmerly, Rosana; Cristanchi, María A.; Cristina,  
Ignacio M.; Basán Nickisch, Mario y Valiente, Miguel**

---

**CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS**

**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

**JUAN CARLOS BERTONI**

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

**LUCILA CANDELA**

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

**MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO**

Instituto Internacional de Florida  
Florida International Institute

**MIGUEL DORIA**

Hidrólogo Regional, PHI-LAC, UNESCO. Ex officio  
Regional Hydrologist, IHP-LAC, UNESCO. Ex officio

**EVENS EMMANUEL**

Université Quisqueya, Haití  
University of Quisqueya, Haití

**BLANCA JIMÉNEZ**

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

**ALFONSO GUTIÉRREZ**

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

**WILL LOGAN**

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

**EDUARDO PLANOS**

Instituto de Meteorología, Cuba  
Meteorological Institute, Cuba

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

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

## EDITORIAL

Las Cátedras UNESCO relacionadas con el agua en América Latina y el Caribe desarrollan programas de investigación, docencia y difusión del conocimiento. Están integradas por especialistas de diversas nacionalidades, y su producción científica es especialmente útil para el desarrollo científico y la seguridad hídrica de la región. Asimismo, colaboran con una gran cantidad de universidades e institutos de la región y fuera de ella.

En este contexto, Aqua-LAC, la revista científica del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe ha promovido la publicación de este número especial de la revista, en el que se dan a conocer algunos de los resultados de las citadas Cátedras UNESCO.

La Revista Científica Aqua-LAC cubre un nicho entre las revistas académicas que integra de forma multidisciplinaria los resultados procedentes de la investigación científica y socioeconómica, los aspectos legales, y las tecnologías innovadoras, con una visión hacia la seguridad hídrica y la gestión integrada y apropiada de los recursos disponibles. Así, este número especial de la revista reúne trece artículos que abordan y desarrollan con rigurosidad científica, investigaciones realizadas por autores provenientes de Cátedras UNESCO e instituciones asociadas, de Argentina, Aruba, Cuba, Colombia, México y Nicaragua.

Los artículos de este número plasman resultados y aportes sobre el abastecimiento de agua a la población en condiciones de escasez y/o en escenarios de variabilidad climática; el conocimiento y experiencia en la desalinización del agua de mar; metodologías para la determinación de caudales ecológicos y ambientales y claves para su implementación; el conocimiento de sistemas acuíferos y cuantificaciones del balance hídrico. A la vez, señalan la importancia de promover las mejoras en la infraestructura y desarrollos tecnológicos que permiten acceder al saneamiento, el reconocimiento de los riesgos asociados a los recursos hídricos, su prevención y mitigación de daños y especialmente la necesidad de mejorar las condiciones de gobernanza del agua en Latinoamérica y el Caribe.

Este número de Aqua-LAC, con certeza, es sólo una muestra de la vitalidad y relevancia del trabajo de las Cátedras UNESCO relacionadas con el agua en América Latina y el Caribe, y revela la excelencia académica de la comunidad académica de la región, así como su convicción de abordar los retos que enfrenta la población.

En concordancia con la preocupación global sobre el estado de los recursos hídricos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la Agenda 2030, se espera que estas contribuciones desde el sector académico-científico, sirvan para impulsar nuevas investigaciones, motivar su aplicación y validación en otros ámbitos y que fortalezcan y enriquezcan la labor de los tomadores de decisión con propuestas para la gestión sostenible del agua bajo la premisa común de lograr la seguridad hídrica.

Marta Paris  
Cátedra UNESCO Agua y Educación para el Desarrollo Sostenible  
Universidad Nacional del Litoral (UNL)  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)

Poliopetro F. Martínez Austria  
Director de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos  
Universidad de las Américas Puebla

## EDITORIAL (ENGLISH)

The water related UNESCO Chairs in Latin America and the Caribbean develop research, teaching and knowledge dissemination programs. They are integrated by specialists of different nationalities, and their scientific production is especially useful for the scientific development and water security of the region. They also collaborate with a large number of universities and institutes in the region and beyond.

In this context, Aqua-LAC, the scientific journal of the UNESCO International Hydrological Program for Latin America and the Caribbean, has promoted the publication of this special issue of the journal, in which there is information about the results of the mentioned before UNESCO Chairs.

The Scientific Journal Aqua-LAC covers a niche among academic journals that integrates, in a multidisciplinary manner, the results from scientific and socio-economic research, legal aspects, and innovative technologies, with a vision towards water security and integrated and appropriate management of the available resources. Thus, this special issue of the journal contains thirteen articles that address and develop, with scientific rigor, researches carried out by authors from the UNESCO Chairs and associated institutions of Argentina, Aruba, Cuba, Colombia, Mexico and Nicaragua.

The articles in this issue reflect results and contributions on water supply for populations in scarcity conditions and/or in scenarios of climatic variability; the knowledge and experience in the desalination of seawater; methodologies for the determination of ecological and environmental flows and keys for their implementation; the knowledge of aquifer systems and quantification of water balance. At the same time, they point out the importance of promoting improvements in infrastructure and technological developments that allow access to sanitation, the recognition of the risks associated with water resources, their prevention and mitigation of damages, and especially the need to improve the governance of water resources in Latin America and the Caribbean.

This issue of Aqua-LAC, with certainty, is only a sample of the vitality and relevance of the work of the UNESCO Chairs related to water in Latin America and the Caribbean, and reveals the academic excellence of the academic community of the region, as well as its conviction to address the challenges the population face.

In accordance with the global concern about the state of water resources and the Sustainable Development Goals established in the 2030 Agenda, it is expected that these contributions from the academic-scientific sector, serve to promote new research, motivate its application and validation in other areas. Thus, it will strengthen and enrich the work of decision makers with proposals for sustainable water management under the common premise of achieving water security.

Marta Paris  
UNESCO Chair Water and Education  
on a Sustainable Development.  
Litoral National University (UNL)  
Faculty of Engineering and Water Sciences (FICH)

Poliopetro F. Martínez Austria  
Head of UNESCO Chair of Hydrometeorological Risks  
Americas Puebla University



## 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.

**Referencias Bibliográficas:** Artículo: Autor. Año. Título. Revista volumen: páginas.

Libro: Autor. Año. Título. Editorial, Ciudad, Estado o Provincia. Páginas. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Informe o memoria de Congreso: Autor. Año. Título. Institución organizadora o editorial en forma breve, Ciudad, Estado o Provincia. Páginas. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Capítulo de Libro: Autor. Año. Título del capítulo, páginas del capítulo. En Editor (ed.). Título. Editorial. Ciudad, Estado o Provincia.)

Tesis: Autor. Año. Título. Tipo de Tesis, Universidad, Ciudad, Estado o Provincia. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Informes y trabajos inéditos: Autor, año y ubicación de dicho trabajo. Páginas web: Título de la página, autor, organismo o institución editora. Lugar de origen del servidor, fecha de acceso a la información. Dirección electrónica, correo electrónico de contacto.

Nota: Si su artículo es en español, use los nombres oficiales de las ciudades en este idioma.

**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.

Este proceso se lleva a cabo a través de la metodología de pares ciegos o "double-blind review", en el que se mantiene el anonimato de los autores para los revisores al momento de corregir y se mantiene el anonimato de los revisores en todo momento, incluso después de la publicación.

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.

**Bibliographic References:** Article: Author. Year. Title. Magazine, Volume, Pages.

Book: Author. Year. Title. Editorial, City, State or Province. Pages. (If the city is little known internationally please mention country.)

Report or document of a Meeting: Author. Year. Title. Organizer institution or brief name of editorial. City, state or province. Pages. If the city is little known internationally please mention country.

Book chapter: Author. Year. Chapter title. "In Editor (ed.)" Title. Editorial. City, State of Province.

Thesis: Author. Year. Title. Type of thesis. University. City, State of Province. If the city is little known internationally please mention country.

Reports and unpublished documents: Author, year and location of the document.

Web page: Title of the page. Author. Editor institution or organization. Place of the server. Date of access to the information. Web address, contact email.

**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.

This process is made as a double-blind review, in which the anonymity of the authors is respected at the time of revision and the anonymity of the reviewers is held throughout the process and even after the publication.

A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundaments for not addressing comments by the reviewers.

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

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

## EL CAUDAL AMBIENTAL EN EL MANEJO INTEGRADO DE LAS CUENCAS: CASO DE ESTUDIO (RÍO VERDE, OAXACA, MÉXICO)

### THE ENVIRONMENTAL FLOW IN THE INTEGRATED MANAGEMENT OF WATERSHEDS: CASE STUDY (RÍO VERDE, OAXACA, MEXICO)

González Villela, Rebeca<sup>1</sup>; Sánchez Chávez, Javier; Bravo Inclán, Luis A.; Mijangos Carro, Marco

#### Resumen

La metodología holística DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) y otros cuatro métodos para cuantificar el caudal ecológico (Tennant Modificado para México, IHA, Multivariados y PHABSIM) fueron utilizados para el cálculo del caudal ambiental en el Río Verde (Oaxaca). Los resultados señalan valores similares para los caudales calculados con los diferentes métodos. Asimismo, se consideró la información biofísica (hidrología, hidrodinámica, geo-hidrología, topografía, vegetación terrestre y acuática, suelo, calidad del agua, ictiología, entomología y el manglar), así como la socioeconómica (desechos, riesgos, irrigación, tecnificación y temporalidad agrícola, actividades agrícolas e industriales, zonas de tránsito, área sembrada, costumbres, cultura, migración, empleo y turismo) del río, en relación con los caudales ambientales para la estación seca y húmeda, y para generar las medidas de manejo y mitigación de los impactos ambientales en el proyecto de presa "Paso de la Reina". Los caudales ecológicos recomendados en (m<sup>3</sup>/s) fueron: Caudales Extremos Bajos de 12.75 a 30.0; Caudales Bajos de 32.1 a 70.15; Caudales Altos de 150 a 260; Pulsos de Caudal Altos de 350 a 500; Pequeñas Inundaciones 548.52 a 1000 y Grandes Inundaciones de 3000 a 4000. Estrategia de caudales que cubren las características de frecuencia, duración, magnitud y periodicidad para mantener las condiciones hidráulicas, la geometría del canal, tipos de sedimentos en el sustrato, el balance de agua dulce y salada en la desembocadura, así como del agua subterránea, la distribución de los organismos terrestres y acuáticos a lo largo del río y las condiciones socioeconómicas relacionadas con los cambios de caudal. Se describen las consecuencias de la alteración parcial o total de los componentes del caudal ambiental y se generaron los escenarios en relación con cierta condición de estado ecológico para el río y las especies analizadas, así como las evaluaciones de impacto, medidas de mitigación y planes de manejo de la cuenca.

**Palabras clave:** manejo de cuencas, potamología, impacto ambiental.

#### Abstract

The holistic methodology DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) and four other ecological flow methods (Tennant Modified for Mexico, IHA, Multivariate Analysis and PHABSIM) were used to calculate the environmental flow in the Río Verde (Oaxaca). The results indicate similar values for the flows calculated with the different methods. The multidisciplinary integration of biophysical information (hydrology, hydrodynamics, geohydrology, topography, aquatic and terrestrial vegetation, soil, water quality, ichthyology, entomology, hydrophytes, mangrove) and socioeconomic information (waste, risks, irrigation, technification and temporality Agriculture, industrial and agricultural activities, transit areas, planted areas, customs, culture, migration, employment and tourism) of the Río Verde, in relation to the evaluation and projection of environmental flows (for the dry and wet season) as a measure of Management and mitigation of environmental impacts in the "Paso de la Reina" dam project were considered. The recommended ecological flows in (m<sup>3</sup> / s) were: Extreme Low Flows from 12.75 to 30.0; Small Flows from 32.1 to 70.15; High Flows from 150 to 260; High Flow Pulses from 350 to 500; Small Floods 548.52 to 1000 and Large Floods from 3000 to 4000. Flow strategy covering frequency characteristics, length of time to maintain hydraulic conditions, channel geometry, sediment types, water balance at the mouth, and distribution of terrestrial and aquatic organisms along the river. The consequences of partial or total alteration of the environmental flow components are described. Likewise, the multidisciplinary analysis generated the environmental flow scenarios, in relation to a certain condition of ecological status for the river and the analyzed species, as well as the impact assessments, mitigation measures and management plans of the Rio Verde basin.

**Key words:** catchment management, potamology, environmental impact.

1 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. rebeca\_gonzalez@tlaloc.imta.mx.



## 1. INTRODUCCIÓN

Acorde con el Inventario Nacional de la Calidad del Agua de USA, los ríos soportan múltiples usos, que incluyen el suministro de agua para consumo humano, la pesca, la recreación, la agricultura, así como la prevención y control de la corriente y la erosión, donde la sedimentación y el exceso de nutrientes son las causas más significativas de la degradación del hábitat para la vida silvestre en un 44% (Komar 1976; Fisher y Kumer 2000; Dyson et al. 2003). Con el tiempo los efectos acumulativos en los cambios del entorno dan como resultado variaciones significativas en los ríos, en los corredores fluviales y en los ecosistemas asociados, que se manifiestan en la degradación de la calidad del agua, en el decremento en la capacidad de almacenamiento, en la pérdida de hábitats para los peces y la vida silvestre y en el deterioro del valor recreacional y estético (Gustard, 1992; Arthington, 2000; FISRWG, 1998; Gafny et al., 2000; Jungwirth et al., 2000; Brown & King, 2003a).

El ambiente es tratado como un aspecto marginal, y en la actualidad es la clave para el manejo sostenible del agua. El ambiente representa un tipo especial de usuario del agua y en muchos aspectos constituye la parte central del manejo de los recursos acuáticos, puntos que se consideran como críticos para el desarrollo y salud de las poblaciones, la reducción de la pobreza, en la productividad agrícola, industrial y energética, y para el desarrollo sostenible de las comunidades aledañas a los ríos. Las estrategias ambientales deben de enlazar y balancear los intereses entre el manejo sostenible del recurso acuático, sustentabilidad ambiental y pobreza (Dyson et al., 2003; Arthington y Lloyd, 1998; Tharme, 2003; Lytle & Poff, 2004).

Para el manejo integrado de las cuencas se requiere un enfoque holístico consistente en la participación de muchas disciplinas, en donde cada especialista utiliza los métodos de su elección para desarrollar una relación caudal – ecosistema entendible, con la finalidad de generar un marco de conocimiento ambiental, social y económico general asociado al análisis del régimen de la frecuencia y duración de los diferentes flujos que son necesarios para mantener la estructura y función del río, aspectos que representan el fundamento para el manejo integrado de las cuencas (Bunn & Davies, 2000; Poff et al., 2009). En la metodología DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformation o Respuesta Aguas Abajo por las Transformaciones Impuestas al Caudal), desarrollada en Australia y África del Sur, un equipo multidisciplinario identifica las consecuencias de reducir las descargas naturales de los ríos con un tipo particular de característica o función biofísica (hidrológica, hidráulica, etc.), en términos de deterioro de la condición del sistema fluvial y se establecen ligas entre las consecuencias de tipo social (subsistencia de los usuarios), evaluadas a través de implicaciones ecológicas,

geomorfológicas y económicas compensación y mitigación (King et al. 2000; Brown y King 2003b,c; Bunn y Arthington 2002; Arthington et al. 2006).

La metodología DRIFT aborda todos los aspectos del sistema fluvial, a través de escenarios y proporciona a quienes toman decisiones, una serie de opciones de regímenes de caudal proyectados con los posibles cambios en la condición del río (Brown y King, 2003a). La metodología DRIFT considera cuatro módulos: 1) **Biofísico**. Estudios del ecosistema fluvial (físicoquímicos y biológicos) relacionados con el caudal, para predecir los cambios del ecosistema en respuesta a las variaciones del caudal; 2) **Socioeconómico**. Estudios sociales de los recursos del río, utilizados para la subsistencia de los usuarios, los perfiles de salud de la población y el estado de los recursos agropecuarios en relación con el caudal, para predecir las afectaciones con los cambios en el caudal (estimación de costos); 3) **Desarrollo de escenarios**. Para cada uno de los regímenes futuros de caudal se describen los cambios previstos en la condición del ecosistema fluvial, el impacto ambiental en relación con la subsistencia de la población y el régimen de propiedad; 4) **Economía**. Se calculan los costos de compensación de cada escenario para los usuarios. Una evaluación macro-económica de cada escenario, para describir sus implicaciones regionales más generales en cuanto a desarrollo industrial y agrícola, costo del agua para áreas urbanas y un proceso de partición pública, en el que las partes interesadas pueden expresar su nivel de aceptación de cada escenario (Brown y King, 2003a, 2003b y 2003c).

El enfoque holístico requiere de un equipo multidisciplinario (geógrafos, geólogos, hidrólogos, hidráulicos modeladores de la hidrodinámica, geomorfólogos fluviales, limnólogos, botánicos, ictiólogos, ecólogos de invertebrados acuáticos, más el conocimiento básico de sedimentología, plancton, herpetofauna, mamíferos dependientes del agua, vida silvestre terrestre y microbiología acuática, antropólogos y agrónomos, entre otros), para generar los estudios de la composición, estructura y función del río de interés, desarrollo y uso de escenarios, así como la capacidad predictiva de como el río puede cambiar si el régimen de caudales cambiara como lo señalan Reynolds (1993), Richter (2006) y Poff et al. (2009). La severidad de la respuesta a cualquier cambio puede deducirse del análisis de las variables evaluadas en el ecosistema, por lo tanto es necesario: a) generar los escenarios con los posibles cambios físicoquímicos y biológicos observados, y las proyecciones o predicciones de las variables del ecosistema que podrían responder a los cambios en el caudal (indicadores de cada disciplina), b) identificar los componentes o categorías del régimen de caudales preponderantes en el mantenimiento del ecosistema fluvial (caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones,

grandes inundaciones), c) describir como los cambios predichos pueden afectar las características de los usuarios de las comunidades rurales aledañas al río, d) analizar las comunidades que utilizan el río, para que los tomadores de decisiones puedan utilizar la información en la implementación de un caudal ambiental o caudal ecológico (King et al., 2000; Dyson et al., 2003; Dabos y Hirji, 2003; Richter et al., 2006; TNC, 2006; Poff et al., 2009). Posteriormente, se requiere de modestos programas de monitoreo para cuantificar los posibles cambios a través del análisis del estado del sistema a lo largo y ancho del río (indicadores). La utilización de mapas GIS cada 3 ó 5 años en relación al caudal del río para medir los cambios sedimentológicos, geomorfológicos o físicos del hábitat y la diversidad. Los caudales ambientales deben de ser considerados en combinación con otras medidas de mitigación complementaria, como la calidad del agua (García de Jalón, 1995; King & Brown, 2003; Dyson et al., 2003; Poff et al., 2009). Las metodologías holísticas son útiles en el análisis de la información biofísica, social y económica, por lo tanto son una herramienta que facilita la planeación y el ordenamiento territorial, así como la cuantificación del impacto ambiental y el manejo integrado de las cuencas (King et al., 2000; Tharme, 2003; King & Brown, 2006, González Villela & Banderas, 2015).

Se han realizado una serie de encuentros sobre Caudales Ambientales en Costa Rica, Argentina, Panamá, Colombia y México, así como congresos sobre agua y ambiente en donde el tema de caudales ambientales ha tenido un lugar destacado. Sin embargo, debe reconocerse que el proceso de implementación de estos conceptos es aún incipiente y su grado de desarrollo muy dispar entre los distintos países y aún dentro de ellos mismos. En Chile, son insuficientes las acciones vinculadas al monitoreo y solo se cuenta con información hidrológica. En Ecuador hay voluntad de abordar el tema, pero hasta el momento la definición del caudal ecológico se limita a una condición de tipo hidrológica. En Perú la normativa vigente no obliga a las hidroeléctricas a aplicar el caudal ambiental. Uruguay, Argentina, Ecuador, Brasil, Costa Rica, Chile, Perú y México han aplicado algún método de caudal ambiental. Argentina ha aplicado la metodología DRIFT en algunos ríos. En países en vía de desarrollo (Latinoamérica), la implementación de caudales ambientales ha sido limitada y en la mayoría de los casos no ha contribuido a aliviar la pobreza y a garantizar una mejor calidad de vida de los actores involucrados (Schreider et al., 2017).

En el presente estudio se aplican al río Verde (Oaxaca), la metodología holística DRIFT y otros cuatro métodos de cálculo del caudal ecológico, para: 1) la cuantificación y la determinación de las estrategias de los regímenes de caudal, 2) para generar los escenarios e indicadores de impacto en los módulos biofísico y socioeconómico, y 3) para proponer las medidas de mitigación y seguimiento

con los caudales propuestos en el proyecto hidráulico de usos múltiples Paso de la Reina del río Verde (Oaxaca). Estudio patrocinado por la Comisión Federal de Electricidad, con la finalidad de generar un manejo integrado de la cuenca y lograr mantener el equilibrio y la función del sistema fluvial con la operación de la presa "Paso de la Reina". El río actualmente mantiene condiciones semi-prisitinas.

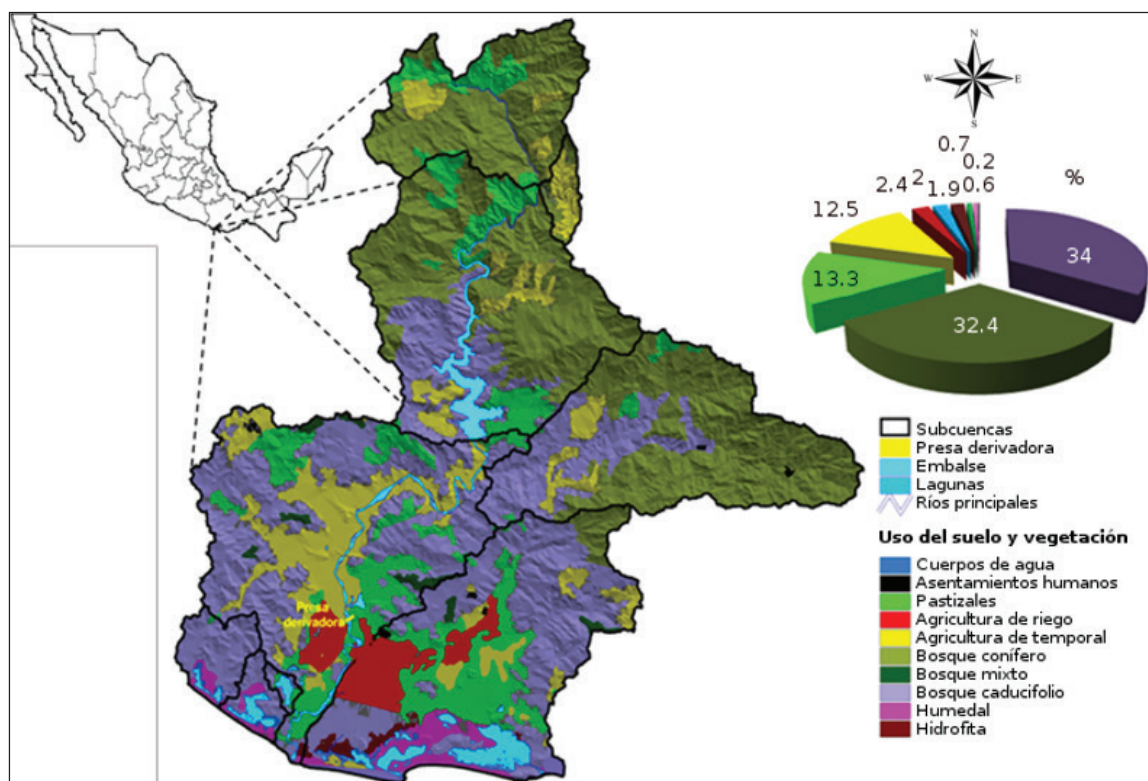
## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Verde se encuentra localizada al sureste de la República y al sur de la Región Hidrológica No. 20 (RH20) "Costa Chica Río Verde", en las coordenadas geográficas 16° 05' 36.61" N y 97° 47' 10" O, con una longitud de 600 km. El máximo de elevación en la cuenca es de 2600 m. El río nace al noroeste de la ciudad de Oaxaca con el nombre de Atoyacy descargar sus aguas en el Pacífico, tiene una superficie de 1,122.71 km<sup>2</sup> (CFE, 2008). La cuenca está caracterizada por tener climas secos en la parte alta. En la parte media y baja se presentan climas lluviosos con temperaturas semicálidas y cálidas (Figura 1). Los afluentes principales por la margen derecha del río son: Río Reyes, Sola de Vega, San Jacinto, Zonzotepec, Yolotepec Cuanana y Sordo; y los afluentes por la margen izquierda son: Tlacolula, Ejutla, Miahuatlán, Coatlán y Juquila. El río es susceptible a un proceso continuo de erosión/sedimentación ante el patrón de escurrimientos generados en la cuenca. En los primeros 20 km predominan las gravas sobre el cauce principal con arenas en las márgenes. Los primeros 10 km el río está confinado por la topografía lo que impiden que el río se mueva horizontalmente, una vez que el río deja la zona de montañas, el ancho del cauce y zona inundable empieza a crecer hacia aguas abajo, para tener un cauce anastomosado o trezado con dos o más canales. De este punto hasta la desembocadura, se mantiene el dominio de las arenas en el centro del cauce, con presencia de algunas gravas y material más fino hacia las márgenes. Con la presencia de la presa derivadora, la configuración del río hacia aguas abajo ha cambiado con el tiempo y ha pasado de ser un tramo recto a tramo con meandros, oscilando transversalmente. En la zona alta, el cauce está encañonado con un gasto de 1000 a los 1200 m<sup>3</sup>/s y los tramos de transición con 745 m<sup>3</sup>/s a 555.7 m<sup>3</sup>/s, con un caudal medio máximo de 462.6 m<sup>3</sup>/s en septiembre, un caudal medio mínimo de 26.0 m<sup>3</sup>/s en abril y un caudal máximo histórico de 7000 m<sup>3</sup>/s (junio de 1974). La vegetación dentro del Sistema Ambiental Regional (SAR) está constituida por bosque caducifolio (34%), bosque de coníferas (32.4%), pastizales (13.3%), agricultura de temporal (12.5%), agricultura de riego (2.4%), cuerpos de agua (2.0%), hidrofitas (1.9%), bosque mixto (0.7%), humedales (0.6%) y asentamientos humanos (0.2%). Las especies de peces colectadas pertenecen a 5 familias, Characidae, Mugilidae, Poeciliidae, Cichlidae y Gobidae, de las 8 especies



capturadas, sólo *Poeciliopsisgracilis*, puede ser considerada como introducida, por lo mismo el río se considera semi-prisitino. Las comunidades de macroinvertebrados están dominadas por acociles y caracoles diádomos (especies que a lo largo de su ciclo de vida migran de agua dulce a agua salada o viceversa). La diversidad natural de las diferentes zonas (humedales, corredor fluvial y estuarios) del Río Verde soportan una amplia variedad de flora y fauna (Ruíz et al., 2008). A lo largo del río

se conservan los caudales naturales. Sin embargo, una derivadora y un bordo de protección a ambos lados del río en la parte baja (24.20km), fueron construidos por CONAGUA en 1994 para ampliar las zonas agrícolas. Los estuarios soportan numerosas actividades que contribuyen a la economía de la región, como la agricultura, desarrollo urbano, turismo así como la pesca comercial y turística del Parque Nacional Laguna de Chacahua (Ruiz et al., 2010).



**Figura 1.** Hidrología, uso del suelo y vegetación para la cuenca del río Verde, Oax. (escala 1:250,000 - Serie III, INEGI, imágenes Landsat ETM 2000 y 2002, respaldada con trabajo de campo 2002, 2003 y 2004; modificada de CFE, 2008).

### 3. MÉTODOS

Los registros hidrométricos de 46 años (1960 – 2006) de flujos naturales para el cálculo de los caudales ecológicos dentro del SAR fueron obtenidos de las estaciones hidrométricas: El Carrizo (20021) y Paso de la Reina (20017) del río Verde (Oaxaca), controladas por la Comisión Federal de Electricidad y por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), respectivamente. La información geográfica digital de la hidrología, topografía, uso de la tierra, tipo de vegetación y suelo de la cuenca se obtuvo a través de imágenes de alta resolución supervisadas (QuickBird y LANDSAT ETM). Los análisis hidrológicos históricos de siete estaciones hidrométricas aplicando el criterio del World Meteorological Organization (OOM, 2015) y del software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS V-4 2008). La disponibilidad de agua subterránea a través de análisis isotópicos de  $^1\text{H}_2$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ , usando el Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW 2015), el espectrómetro de masas para

deuterio y el  $^{18}\text{O}$ , el enriquecimiento electrolítico y el conteo de centelleo líquido para la cuantificación del tritio ambiental del agua de los piezómetros de la cuenca. Los modelos hidráulicos a través de imágenes LANDSAT, los métodos y los softwares de Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS V-4.0 2008), Hydrologic Modeling System (HEC-HMS V-4.0 2008) y FLO-2D (2009). La calidad del agua incluyó el análisis de  $\text{O}_2$  (mg/L), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), turbidez (NTU), alcalinidad (mg/L), pH, salinidad (mg/L), conductividad ( $\mu\text{S}$ ) a través de una sonda multiparámetro YSI – 600. Los registros en campo y la contaminación difusa a través de las técnicas de laboratorio (APHA 2005) y las metodologías de Qual2K model V 2.07 (Ávila et al., 2014), la ecuación USLE (1986), ArcView Generalized Watershed Loading Function y el Canadian Water Quality Index (CCME WQ 2001). Los estudios de peces, macroinvertebrados y la ecología de la vegetación acuática y terrestre a través de la

preferencia de hábitat, simulación del hábitat y análisis multivariados (Análisis de Agrupación y Componentes Principales). La participación del panel de expertos (hidrólogos, hidrodinámicos, geólogos, geógrafos, limnólogos, zoólogos, ictiólogos, botánicos de vegetación acuática, terrestre y manglar de diversas instituciones) utilizando modelos conceptuales para los módulos biofísicos y socioeconómico para relacionar las categorías de caudales a la morfología del canal, a la hidráulica, zona de inundación y estado ecológico del sistema ripario. El módulo socioeconómico fue desarrollado por agrónomos, sociólogos y antropólogos utilizando entrevistas directas y estandarizadas a los agricultores, granjeros y propietarios en relación con los requerimientos de agua proporcionada por la CONAGUA, la información estadística del uso del suelo y características edáficas utilizando el World Soil Resource Reference-WSRR methodology (FAOUN 2014), y para cada disciplina una lista de aspectos de estudio e indicadores de impacto generados para la evaluación del sistema. El cálculo de los caudales ecológicos por el Método de Tennant Modificado (García et al., 1999), Hidroperiodo (IHA, Indicadores de la Alteración Hidrológica; TNC, 2006), Preferencia de Hábitat (multivariados;

González-Villela, 2007) y Simulación del Hábitat (PHABSIM, Physical Habitat Simulation System basado en el análisis de la velocidad de la corriente, profundidad, nivel de la superficie libre del agua y tipo de vegetación a través de un modelo unidimensional utilizando la ecuación de Manning; Hardy et al., 1997). Los métodos se seleccionaron considerando que los métodos hidrológicos son fáciles y rápidos de aplicar y pueden ser utilizados en las fases tempranas del manejo integral y adaptativo de las cuencas. Los análisis del hábitat y simulación del hábitat aunque difieren unos de otros por los objetivos de estudio y la forma en que se obtiene la información de las variables involucradas, son útiles por el enfoque, las escalas de aproximación y la información que proporcionan a diferentes niveles. La metodología DRIFT aborda los aspectos biofísicos y socioeconómicos del sistema fluvial, a través de escenarios y proporciona a quienes toman decisiones, una serie de opciones de regímenes de caudal proyectados con los posibles cambios en la condición del río (Ruiz et al., 2010; González Villela & Banderas, 2015). La Tabla 1, señala los atributos y variables relevantes para el análisis de los indicadores de impacto ambiental evaluados por cada disciplina que la metodología DRIFT requiere.

**Tabla 1.** Atributos en cada módulo y disciplina para la evaluación del impacto en el caudal ecológico del río Verde (Oaxaca)

<b>MÓDULO BIOFÍSICO</b>
<p><b>Información geográfica espacial digital</b> - Topografía, tipo de suelo, hidrología, pendiente, vegetación.</p> <p><b>Hidrología</b> - Caudal medio mensual, caudal medio diario, caudal mínimo y máximo diario, evaporación.</p> <p><b>Hidrodinámica</b> - Características del caudal, dimensión del canal, forma, perfiles y patrones, conectividad con la zona de inundación, cuantificación del ensanchamiento y/o deposición, erosión lateral del canal, modificación de los bancos de aluviones, generación de meandros.</p> <p><b>Calidad del agua</b> - Fisicoquímicos (O<sub>2</sub>, pH, SDT, SST, temperatura, aceites, conductividad, metales, salinidad, turbidez, materia orgánica, etc.), toxicidad, coliformes.</p> <p><b>Caudales ecológicos</b> - Grupo de caudales (6). Alteración en la frecuencia, duración, magnitud, periodicidad y tasas de recambio, tamaño y forma del río, niveles de la superficie libre del agua, duración anual de los caudales, descargas totales anuales y mensuales, alteración hidrológica, regulación del caudal, volumen para el mantenimiento del ecosistema, balance óptimo en el régimen de caudal, preferencia del hábitat (peces y macroinvertebrados), simulación del hábitat (peces y macroinvertebrados).</p> <p><b>Peces y macroinvertebrados</b> - Decrecimiento en la diversidad, hábitats, especies nativas, especies indicadoras, incremento de especies amenazadas o en peligro, incremento en la pérdida de especies, generación de barreras para la migración, desarrollo de especies exóticas, generación de puntos estrechos o poco profundos, fragmentación del hábitat acuático, cambio de hábitat de las especies acuáticas, deposición de descargas hipolimnéticas, alteración en la cantidad de agua estacional que requiere la comunidad de peces.</p> <p><b>Vegetación de la ribera, hidrófitas y bosque de galería</b> - Tipo de comunidad, distribución sobre la ribera, cubierta vegetal y dosel, dinámica de la comunidad y sucesión, reproducción, ciclos de vida, conectividad, pérdida de zonas con dosel o cubierta vegetal, usos de la tierra que generan impactos sobre el corredor fluvial, pérdida de vegetación de distintas comunidades, fragmentación de corredores de vegetación silvestre, reducción de hábitats de vegetación silvestre, plantas utilizadas por la población, suministros de agua, deposición de desechos, cantidad de agua estacional que requiere la vegetación para su conservación, nivel de la superficie libre del agua estacional que requiere para su conservación.</p> <p><b>Aguas Subterráneas</b> - Almacenamiento de agua del acuífero, balance de agua. Calidad del agua</p> <p><b>Manglares</b> - Estructura y función de la comunidad.</p>
<b>MÓDULO SOCIO-ECONÓMICO</b>
<p><b>Usos del suelo</b> - Desechos por agricultura, agricultura de riego, de temporal, de goteo y tecnificado; actividades agropecuarias, zonas de tránsito, superficie sembrada, riesgos agrícolas, temporalidad de las cosechas, tipos de irrigación, tecnificación de las cosechas, zonas de tránsito, actividades industriales, superficie sembrada, costumbres, cultura, migración, empleo.</p>



Las causas y efectos relativos entre los factores de estrés y los indicadores clave, cambios temporales en el uso de la tierra y tipos de cubierta vegetal con la presencia de factores antrópicos en el área de la Cuenca del Río Verde (Oaxaca), fueron evaluados utilizando los sistemas de información geográfica (GIS), así como la información obtenida de otras disciplinas a través del análisis de: 1) indicadores de impacto sugerida por cada disciplina, 2) estado

actual del indicador, 3) tendencias y escenarios con los cambios de caudal, 4) evaluación del impacto a través de la ecuación (1), y 5) medidas de mitigación para cada indicador y disciplina, acorde con la metodología sugerida por Bojórquez (1989), Bojórquez-Tapia (2005), Cloquell-Ballester al., (2007) como se indica en la Tabla 2. Atributos directamente relacionados con los enlistados en la Tabla 1.

**Tabla 2.** Ejemplo de Matriz de datos (caudal ecológico) para la evaluación de los indicadores de impacto (tendencia, pre-impacto, post-impacto acorde con la ecuación 1, y estrategias de mitigación para cada atributo en cada disciplina

Componentes	T	Pre-impacto	Post-impacto	N	I	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MO	IMPAC	ESTRATEGIA MITIGACIÓN
C. extremos bajos	↓	Naturales	Desaparecen	-	12	1	2	4	4	4	4	4	4	4	-68	Caudal ecológico
C. bajos	↓	Naturales	Alteración / frecuencia periodicidad y magnitud	-	2	2	2	4	2	2	2	2	4	2	-30	Caudal ecológico
C. altos	↓	Naturales	Alteración en secas	-	3	2	2	4	3	2	3	3	3	2	-35	Caudal ecológico
Pulsos de caudal alto	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
Pequeñas inundaciones	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico
Grandes inundaciones	↓	Naturales	Ligera alteración	-	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	-18	Caudal ecológico

$$IA = \pm (3I+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC) \quad (1)$$

Donde:

IA	Impacto Ambiental.
N	Naturaleza.- Benéfica o perjudicial (±).
I	Intensidad.- Grado de incidencia (máximo valor 12).
EX	Extensión.- radio de 10 km = parcial. Extenso = para una o varias comunidades (SAR). Crítico = todo el Sistema Ambiental Regional.
MO	Momento. Plazo de manifestación del efecto.
PE	Persistencia. <1 año = fugaz; 1 y 10 años = temporal; más de 10 años = permanente.
RV	Reversibilidad.- Posibilidad de reconstrucción.
SI	Sinergia.- Reforzamiento de efectos simples.
AC	Acumulación.- Incremento progresivo.
EF	Efecto.- Directo-primario, indirecto-secundario.
PR	Periodicidad.- Intermitente o discreto, periódico o estacional.
MC	Recuperabilidad (+); Irrecuperabilidad (-).

Los impactos fueron marcados en mapas de la región de estudio utilizando una escala de severidad de la respuesta con valores que pueden estar dentro del rango de 13 a 76. Esta evaluación de impactos fue obtenida con la formula (1) y puede indicar el abatimiento del estado de salud del ecosistema fluvial cuando el resultado es alto, en relación con la escala de color y símbolos en el mapa del área de la cuenca (azul = muy buena condición del sistema, ☆; verde

= buen estado-▲; amarillo = aceptable-🌟; naranja = deficiente-± y rojo = mala condición-X). Los impactos pueden ser positivos o negativos en relación con la definición de cada elemento de la ecuación (1) y Tabla3. Cada impacto fue emitido por cada experto a través de una evaluación "atributo por atributo", tomando en consideración la consistencia en las evaluaciones (desviación estándar evaluada por cada experto) y consenso (grado de acuerdo entre los interesados) en

forma similar a la metodología multicriterio utilizada por Bojórquez-Tapia et al. (2005) y metodología DRIFT señalada por Brown y King (2003a, 2003b y 2003c). Los ajustes finales fueron trasladados a valores numéricos (evaluación efectuada por los expertos) para facilitar la significancia de las evaluaciones.

**Tabla 3.** Condición del sistema fluvial a través de la evaluación del impacto (ecuación 1)

Estado del Sistema	Color Asociado	Símbolos	Valor Numérico del Impacto	Signo
Muy buena	Azul	☆	13 - 26	+ , -
Buena	Verde	🌲	27- 39	+ , -
Aceptable	Amarillo	📌	40 - 52	+ , -
Deficiente	Naranja	±	53 - 65	+ , -
Mala	Rojo	X	66 - 76	+ , -

Las evaluaciones de impacto en el área de estudio se efectuó considerando varios segmentos, con base en los cambios en la estructura del río en el plano longitudinal por el cambio en el ancho y profundidad río abajo debido al incremento del área de drenaje y descargas, de la siguiente forma: 1) área que será inundada por la presa, caracterizado por presentar altas pendientes cortadas a tajo en forma de V dentro del valle, con presencia de rápidos y cascadas; 2) segmento de la Presa de Cambio de Régimen (PCR), caracterizado por presentar pendientes empinadas, alta erosión de sedimentos por las altas pendientes en el área de la cuenca y la influencia de la precipitación; 3) de la PCR a la derivadora (Ricardo Flores Magon, RFM) o zona de transferencia que recibe material erosionado, caracterizado por una zona de inundación amplia y patrones meándricos en el canal del río; 4) de la derivadora (RFM) a la desembocadura del río, con poca elevación, meandros y un valle plano con una zona de deposición como proceso dominante; 5) La laguna de Chacahua ubicada a cinco km de la desembocadura en la margen izquierda; 6) Las lagunas del Espejo y Minuyua ubicadas a 1.47 km de la margen derecha del río; y 7) La confluencia del Río La Leche - Río Verde en la parte alta, y considerado solamente por algunas disciplinas (Figura 2).

#### 4. RESULTADOS

El valor del caudal ambiental para años secos y húmedos se efectuó utilizando los diferentes rangos de caudales proporcionadas por la aplicación de las cuatro metodologías mencionadas, con el propósito de obtener márgenes de operación o de manejo de la presa cuando las condiciones ambientales generen años secos (valor más bajo del rango en el grupo de caudales) y los años húmedos (o valor más alto para

cada grupo de caudales, Tabla4); valores de caudal que se obtienen de forma diferente según sea el método utilizado.

**Tabla 4.** Caudales ambientales calculados a través del Método de Tennant Modificado, IHA, Preferencia de Hábitat y Simulación del Hábitat y los rangos de caudal para el manejo de la presa en años secos y húmedos

Grupo	Caudal (m³/s)	Duración y época
C. Extremos Bajos	12.75 – 30.0	15 días en abril.
Caudales Bajos	32.1-70.15	Noviembre - mayo.
Caudales Altos	48.15 - 260	Junio - octubre (alternar Pulsos de C. Altos)
Pulsos de Caudal Altos	350 – 500	Julio y agosto (5 – 15) los 1ros., días de septiembre
Pequeñas Inundaciones	548.52 – 1000	Durante septiembre
Grandes Inundaciones	3000 – 4000	1ros. días de septiembre (3ero. o 5to. día).

El propuesto esquema para los caudales ambientales es producto de la información generada por los cuatro métodos de caudal ecológico aplicados (Tennant, IHA, de Habitat y PHABSIM), que constituyen parte de la información del módulo biofísico (hidrología, topografía, uso de la tierra, tipo de vegetación y suelo, clima, hidrometría agua subterránea, hidráulica, calidad del agua, contaminación difusa, estudios de peces, macroinvertebrados y la ecología de la vegetación acuática y terrestre), y socioeconómico (uso del suelo y características edáficas, población, industria, cultura, religión, ocupación, migración, costumbres, desempleo, agricultura) que requiere la metodología DRIFT, para generar los caudales ambientales consistentes con la aplicación de los análisis multidisciplinarios efectuados en relación con el comportamiento natural hidrológico e hidrodinámico del Río Verde, la conservación del agua subterránea de la cuenca, la conectividad de la zona de inundación (Lagunas Laválo, Chacahua, El Espejo y Minuyua), la calidad del agua, la disponibilidad de agua para la vegetación del corredor fluvial (bosque de galería e hidrofitas), los humedales, estuarios, comunidades de peces, macroinvertebrados y manglar, como lo señalaron los resultados de: 1) el modelo hidrológico proyectado con una descarga mínima instantánea promedio 7.4 m³/s, en abril y una descarga máxima instantánea promedio de 4065 m³/s en octubre, que es coincidente con los requerimientos de caudal ambiental calculados en el río, 2) los requerimientos hidrológicos del río (Tabla 4), que generarán las condiciones para mantener la calidad y la cantidad de los acuíferos en el área de la Cuenca (balance



con el régimen de caudales naturales actuales, los aportes de la lluvia, las actividades de irrigación, bombeo, evaporación y flujo base), 3) concordancia con el modelo hidrodinámico proyectado y las descargas de retorno, formativas, de máxima ribera, de inundación para diferentes años y diferentes segmentos del río en relación con los sistemas asociados (Lagunas) como se muestra en la Tabla 5 (Ruiz et al 2010), 4) los hábitats de las comunidades de peces y macroinvertebrados saludables como lo muestran los estudios multivariados de preferencia de hábitat y simulación del Hábitat (IFIM-PHABSIM), y 5) la conservación de las condiciones de humedad necesarias para el mantenimiento de las comunidades de flora y fauna en el cauce del río, corredor fluvial, manglar y bosque de galería a través de los picos de caudal alto, y pequeñas y grandes inundaciones proyectadas, y 6) el balance de salinidad en la desembocadura del río.

**Tabla 5.** Requerimientos hidrológicos de caudales para mantener las condiciones morfométricas y sedimentológicas del cauce

Evento	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Avenidas ordinarias que inundan	400 – 900
Gasto formativo	1000
Gasto formativo 1.4	900
Gasto formativo 2.0	1006.85
Gasto formativo 5.0	1406.11
Gasto de retorno 1 a 4 años	2112.87
Gastos a nivel de rivera máxima (P Reina)	900
Gastos a nivel de rivera máxima (Derivadora)	500
Gastos a nivel de rivera máxima (Desembocadura)	1000
Gastos de alimentación para la Laguna El Espejo	1000 – 1100
Gastos de alimentación para la Laguna Laválo	350
Gasto medio de desborde (Desembocadura)	455.8
Gasto medio de desborde (Huichicata)	1694.6
Avenidas por ciclones	400 – 3334
Gastos máximos de desborde-bordo de protección	4065

Como parte de la metodología DRIFT, se evalúan los impactos y se proponen las medidas de mitigación del área de la Cuenca del Río Verde (topografía, suelo, distribución de la vegetación, uso de la tierra, hidrología, hidrodinámica, agua subterránea, calidad del agua, contaminación difusa, caudales ambientales, comunidades de flora y fauna acuática y terrestre del cauce y del corredor fluvial) para los

diferentes segmentos del río, a través de la información generada previamente por cada disciplina en las matrices de datos (indicador, condición, tendencia, impacto y medidas de mitigación; Tabla 2), y para cada atributo de cada módulo señalado en la Tabla 1, como a continuación se describe (Figura 2).

## MODULO BIOFÍSCO

### 1er. y 2do. Segmento (Presa y PCR)

**Impactos.** En los caudales naturales y biodiversidad. Conversión del segmento de lotico a léntico±.

**Mitigación.** Aplicar medidas de compensación para las áreas de inundación en relación con la conservación de la biodiversidad. Generación de invernaderos rurales de especies nativas de plantas. Estudios de investigación de las comunidades de flora y fauna. Manejo de las especies nativas de peses y alternativas.

### 3er. Segmento (PCR-Derivadora - 27.780 km)

**Impactos.** Los Caudales Extremos Bajos de 12.75 a 30 m<sup>3</sup>/s serán modificados. Los caudales medios mensuales y diarios naturales observarán un incremento en la época de secas y un decremento en la temporada de lluvias. Alteración en la frecuencia, magnitud y periodicidad de los caudales. Se alterará la calidad del agua en los primeros metros posteriores a la cortina de la PCR (O<sub>2</sub>, temperatura y SST). 537 ejemplares de 8 especies, pertenecientes a 5 familias en la parte alta del río, y un total de 760 ejemplares de 17 familias para la parte baja señalan a la derivadora como una barrera para la migración de especies.

**Mitigación.** Conservación de los caudales ambientales en este tramo para mantener las características morfométricas y sedimentológicas del cauce. Protección de las márgenes del río contra la erosión a través de enrocamientos. Las hidrofítas, la vegetación acuática y ripariase mantendrán con los actuales usos de la tierra (agricultura y pastoreo), así como la conectividad. Recuperación del corredor fluvial con prácticas agropecuarias adecuadas. Por el contrario se observará una interacción benéfica en la parte baja del río en la época de secas del agua subterránea debido al incremento del caudal con la operación de la presa.

### 4to. Derivadora – Desembocadura (21.780 Km)

**Impactos.** Incremento pequeño en el almacenamiento de agua en los acuíferos debido a la influencia favorable del incremento del caudal extremo bajo en la época de secas (75m<sup>3</sup>/s). Las prácticas agropecuarias ejercerán el mayor impacto sobre las hidrofítas. Generación de barreras para la migración de especies río arriba.

**Mitigación.** Caudales ambientales proyectados para mantener las condiciones fisicoquímicas favorables para el desarrollo de las especies acuáticas animales

y vegetales, así como el balance de salinidad entre el mar y el río manteniendo la comunidad de manglar en la desembocadura. Construcción de canales comunicativos en la derivadora para favorecer a las especies migratorias de Macroinvertebrados (*Macrobrachium sp.*) y de peces *Agonostomus Monticola*, *Awaous transandeanus*, *Centropomus sp.*, *Oerochromis mossambicus*, *Dormitator latrifons*, *Astyanax aeneus*, *Sicydium multipunctatum*, *Gobiomorus maculatus*, *Poecilia sphenops*, *Pomadasys bayanus* y *Mugil curema*. Los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m<sup>3</sup>/s en este segmento pueden ser recuperados utilizando la derivadora.

**5to y 6to. Segmento (Desembocadura y Lagunas)**

Los caudales ecológicos mantendrán las condiciones hidrológicas de las lagunas, y el balance de agua dulce y salada entre el río y el mar.

**MODULO SOCIOECONÓMICO**

**3ro. 4to.5to. y 6to Segmento**

**Impactos.** Incremento de los desechos de la agricultura y subutilización de la agricultura de riego. Para la agricultura de temporal y para la agroindustria con una tendencia a permanecer como actualmente se encuentra (concesión de agua). Alteración del corredor fluvial y de la calidad del agua del río por las prácticas agropecuarias.

**Mitigación.** Se sugiere la formación de un corredor fluvial o protección de ribera, prácticas de manejo agropecuario adecuadas para el control de la contaminación, el funcionamiento de la planta de tratamiento para la procesadora de limón y la implementación de la agricultura orgánica para la conservación del ambiente. Transformación al riego tecnificado. Abatimiento en la agricultura de temporal por la agricultura de riego.

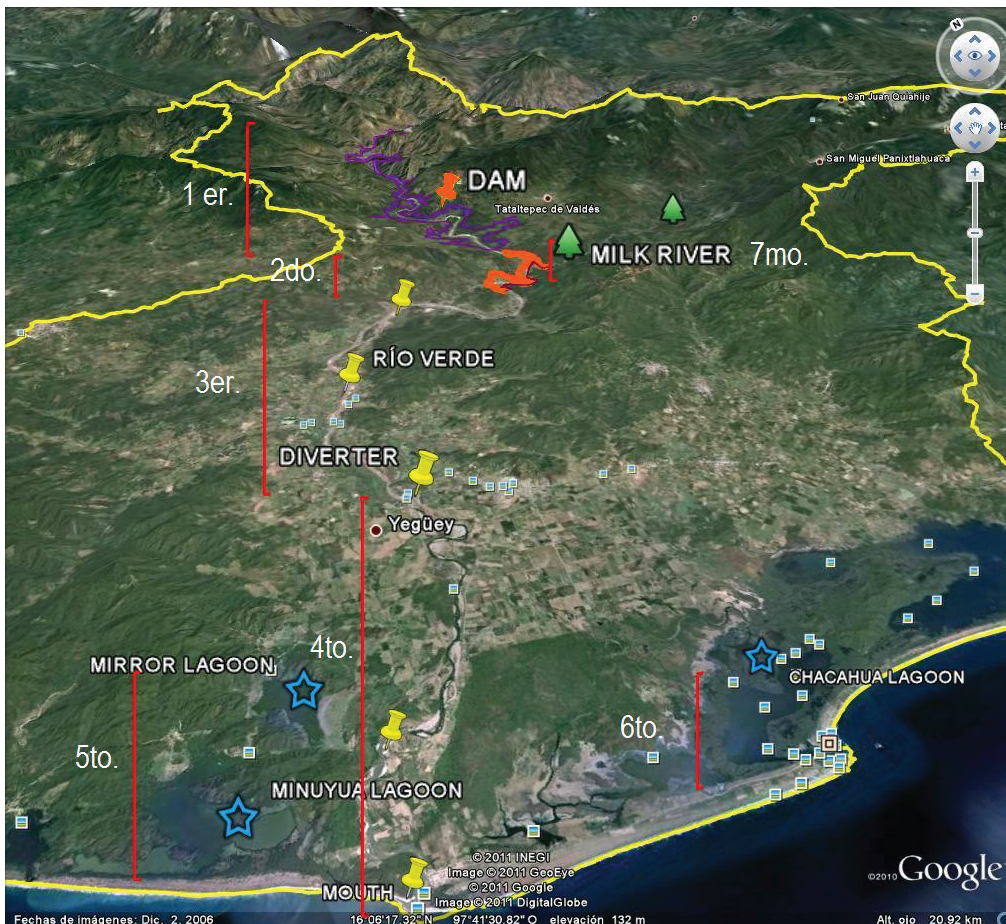


Figura 2. Cuenca y segmentos del río evaluados para la determinación de los caudales ambientales, identificación de impactos y medidas de mitigación en el Río Verde (Oax.).

**5. DISCUSIÓN**

El régimen de caudales ambientales obtenido a través de las cinco metodologías (Tennant Modificado, IHA, Multivariados, PHABSIM y DRIFT) para el río Verde (Oaxaca), señalaron los flujos, escenarios e impactos para mantener las condiciones hidráulicas, la geometría del canal, tipos de sedimentos en el

sustrato, el balance de agua dulce y salada en la desembocadura, así como del agua subterránea, las condiciones socioeconómicas relacionadas con los cambios de caudal para cada grupo de caudales de la estación húmeda y de estiaje (años secos y lluviosos), la distribución de los organismos



terrestres y acuáticos a lo largo del río acordes con la conservación del hábitat de especies de peces y macroinvertebrados (nivel de la superficie libre del agua, profundidad, velocidad, cubierta vegetal, pozas, charcas, remansos, rápidos) como a continuación se señala: **Caudales extremos bajos:** Por un periodo de 15 días en la época de secas (abril) de 12.75 a 30 m<sup>3</sup>/s (mínimo recomendable), para mantener un hábitat a nivel de sobrevivencia a corto plazo para la mayoría de las formas de vida acuáticas. Para que el ancho del cauce a nivel de la superficie libre del agua, la profundidad y las velocidades de la corriente no se reduzcan significativamente por mucho tiempo y para que el hábitat acuático no se degrade, como ha sido observado por Tennant (1976), Boulton (1999), Hardy (1997), en otros ecosistemas. **Caudales bajos:** O mínimos óptimos para la época de secas entre 32.1 y 70.15 m<sup>3</sup>/s, durante noviembre y mayo. Para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuáticas porque el ancho de la superficie libre del agua, la profundidad y la velocidad serán generalmente satisfactorias. Para que las temperaturas del agua no resulten limitantes para el desarrollo de la vida acuática en la mayoría de los segmentos del río. Para que la vida de los invertebrados no se convierta en un factor limitante en la producción pesquera. Y para que se mantengan los niveles de agua, oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua como ha sido observado en otros ecosistemas (Richter et al. 1996; Arthington et al. 2006; TNC 2006). Los estudios de preferencia de hábitat (análisis multivariado) y simulación del hábitat (IFIM-PHABSIM) para los macroinvertebrados y peces señala que las especies favorecidas con estos caudales en la parte alta del río serían *Cichlasoma trimaculatum*, *Astyanax aeneus*, *Poecilia sphenops*. **Caudales altos:** Entre 48.15 y 260 m<sup>3</sup>/s, durante la época de lluvias (septiembre) con una variación que simule la magnitud del hidropereodo para la zona de estudio. Estos caudales propiciarán la distribución de las comunidades de plantas en las charcas, planicie de inundación y humedales. Asimismo, se liberará de desechos y se propiciará el aireamiento de los sedimentos de los canales y zonas de desove. Se incrementará el acceso a los hábitats específicos para la reproducción, crianza y refugio de depredadores. Se generarán espacios para el desove y la migración. Se generarán las condiciones para cubrir las estrategias de las historias de vida y los mecanismos de comportamiento específico para cada especie (Tennant 1976; FISRWG 1998; Bunn y Arthington 2002). Las especies favorecidas con estos caudales serían *Agonostomus monticola* y *Sicydium multipunctatum*, *Awaous transandeanus*, *Astyanax aeneus*, asociados a sitios profundos, con alta concentración de oxígeno y temperaturas más elevadas. **Pulsos de caudal altos:** En época de lluvias de 350 a 500 m<sup>3</sup>/s, para la preservación de la ribera. Para generar los caudales que conservarán la forma física del cauce, incluyendo los rabiones y pozas, así como de los canales laterales del río.

Para remover sedimentos de arena, grava y rocas. Para prevenir la invasión de vegetación de la ribera dentro del canal. Para restaurar la calidad del agua después de los periodos de caudales bajos, así como de contaminantes y basura. Y para mantener las condiciones de funcionalidad de los estuarios en forma coincidente con Gustard (1992), Brown y King (2003a), Dyson et al. (2003). **Pequeñas inundaciones:** De 548.52 a 1000 m<sup>3</sup>/s, al menos cada 2 años durante septiembre para la conservación de la morfología del río, la conectividad con los humedales, canales laterales, zona de inundación, limpieza y balance de sales en la zona costera (Dabos y Hirji 2003; TNC 2006). **Grandes inundaciones:** De 3,000 a 4,000 m<sup>3</sup>/s, por 3 días cada 10 años para la conservación de los ecosistemas asociados (lagunas Lávalo y Chacahua).

Los caudales ambientales no son una descripción suficiente del estado de salud de los ríos por sí solos. Los caudales ambientales deberían ser considerados en combinación con otras medidas de mitigación complementaria, tales como: evaluación de la calidad del agua en combinación con las pertinentes medidas de manejo y conservación de la cuenca (Macleod et al., 1995; Maddock, 1999; Poff et al., 2009).

La magnitud, frecuencia, duración, periodicidad de los caudales ecológicos que proporcionaron los diferentes métodos fueron similares y pueden ser utilizados para establecer un rango de caudales que ayuden a generar las estrategias de manejo para años secos y húmedos, acorde con el criterio del tomador de decisiones. Asimismo, puede corroborarse la utilidad de los métodos empleados independientemente de su complejidad.

Las medidas de mitigación que la metodología DRIFT exige, se estructuraron considerando las características del caudal natural y la posibilidad de alteración del hábitat con el manejo de la presa. Por lo tanto, se sugiere aplicar medidas de conservación de los caudales ecológicos en este tramo para mantener las características morfométricas y sedimentológicas del cauce cuando la presa comience a operar, para la protección de las márgenes del río contra la erosión a través de enrrocamientos. La compensación de especies de flora y fauna para las áreas de inundación de la zona de la presa en relación con la conservación de la biodiversidad (invernaderos rurales de especies nativas de plantas). Estudios de investigación de las comunidades de flora y fauna. El manejo de las especies nativas de peces, vegetación acuática y terrestre, así como la conectividad con los humedales. Recuperación del corredor fluvial con prácticas agropecuarias adecuadas. Mantener los caudales ecológicos recomendados para conservar el balance de salinidad entre el mar y el río, así como la comunidad de manglar en la desembocadura. Construcción de canales comunicativos en la derivadora para favorecer a las especies migratorias de macroinvertebrados (*Macrobrachium* sp.)

y de peces *Agonostomus monticola*, *Awaous transandeanus*, *Centropomus* sp., *Oerochromis mossambicus*, *Dormitator latrifons*, *Astyanax aeneus*, *Sicydium multipunctatum*, *Gobiomorus maculatus*, *Poecilia sphenops*, *Pomadasys bayanus* y *Mugil curema*. Recuperación de los caudales extremos bajos de 12.75 a 30 m<sup>3</sup>/s utilizando la derivadora. Prácticas de manejo agropecuario adecuadas para el control de la contaminación, la implementación de la agricultura orgánica para la conservación del ambiente, y la transformación al riego tecnificado,

Debe de considerarse que las presas alteran la magnitud y frecuencia de los caudales, resultando en el abatimiento de la capacidad de transporte de los sedimentos y deben de ser monitoreados constantemente para el manejo propio del río. La retención de los sedimentos y la alteración de los caudales naturales río abajo causan la pérdida y acumulación de sedimentos en la base del canal, modificando los hábitats para las diferentes especies de plantas y animales acuáticos (Komar 1976; Richter et al. 1997; Lytle y Poff 2004). Por lo tanto, se sugiere el monitoreo constate para el manejo de los sedimentos en el río como ha sido señalado por Poff et al. (1997), Arthington et al. (2006) y Richter et al. (2006) en otros ecosistemas.

La aplicación de la metodología DRIFT al Río Verde (Oaxaca), representa el uso de la técnica multicriterio como auxiliar inherente en la toma de decisiones, en los estudios multidisciplinarios a través del análisis de los módulos biofísico, social y económico en las evaluaciones del Caudal Ambiental. También esta metodología toma en consideración los beneficios y costos sociales del cambio en las condiciones del río, particularmente de los usuarios (o población en riesgo) de los recursos del río (King et al, 2000; Brown y King, 2003). Sin embargo, esta metodología no provee un caudal ambiental recomendado, más bien, genera objetivos basados científicamente en las consecuencias de los cambios de caudal para un rango de posibilidades (Poff et al., 2009). Esto permite a los tomadores de decisiones generar las estrategias para el uso racional del agua. La metodología DRIFT, es esencialmente una metodología para el manejo de los datos y para la elaboración de un plan estructurado en base a la información biofísica generada (Dyson et al., 2003; TNC, 2006). Los objetivos de manejo de la metodología DRIFT incluye el abatimiento de las pérdidas de hábitat naturales, la reducción de impactos generados por las fuentes puntuales y no puntuales de contaminantes, asegurar las fuentes de agua y mejorar la eficiencia del uso del agua protegiendo los humedales, zonas de almacenamiento y la recarga de las aguas subterráneas en forma coincidente con la metodología de la evaluación ambiental, donde el proceso integrativo de identificación y evaluación del módulo biofísico, social y otros efectos relevantes del desarrollo anteriores a las evaluaciones de impacto

son utilizados para la toma de decisiones (Arthington, 2006; Poff et al., 2009).

La alteración del régimen de caudales en los ríos siempre mantendrá una condición de impacto potencialmente severa. Estos impactos pueden frecuentemente ser mitigados a través del diseño de los caudales ambientales o caudales de compensación a través de la sustitución de recursos o programas de desarrollo de las comunidades (King & Brown 2006). Acorde con De Smedt (2010), es necesario elaborar iniciativas específicas en relación con las herramientas de evaluación de los Caudales Ambientales e incluir la colaboración cercana de investigadores y tomadores de decisiones para las evaluaciones de los impactos ambientales en forma satisfactoria y para la apropiada combinación de las herramientas científicas involucradas. Iniciativas que deben incluir el dialogo entre las comunidades en la fase de formulación de objetivos ambientales. La colaboración entre los investigadores y los tomadores de decisiones involucra un enfoque que puede ser considerado de frontera al conectar la ciencia y la política en el marco del desarrollo sustentable operacional.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Eduardo Soto Galera de la Escuela de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional por su participación en la recolecta, identificación y evaluación ictiológica en el tramo de estudio del Río Verde (Oaxaca). A la Comisión Federal de Electricidad por el patrocinio del estudio de la cuenca del Río Verde, y en particular a los Biólogos Rosa Dina Yerandi y Octavio Sandoval de la CFE, por el apoyo y seguimiento efectuados durante las campañas de muestreo realizadas al Río Verde en Oaxaca. Al equipo de investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jorge Brena, Marco Mijangos y Werner Wruck por la información geográfica digital, a Juan F. Gómez por el análisis hidrológico de la cuenca, a José Alfredo González y Joselina Espinosa por el modelo hidrodinámico del Río Verde, a Miguel A. Mejía por los análisis de aguas subterráneas del área de estudio, a Dolores Olvera and Marcia Yáñez por los estudios sociales, e información agropecuaria de la zona. A Javier Sánchez Chávez, Luis A. Inclán por los muestreos de las variables fisicoquímicas y calidad del agua en el Río Verde. A Jorge Izurieta y María Gómez por la ayuda en algunos cálculos del caudal ecológico. A Pedro Ramírez del Instituto de Biología de la (UNAM) por los estudios de vegetación de galería de bosque y de hidrofítas del río Verde.

## 7. REFERENCIAS

APHA (American Pollution Health Association). 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Ed. Washington DC, USA.



- Arthington, A.H., & R. Lloyd.(1998). *Logan river trial of the guiding block methodology for assessing environmental flow requirements*. Workshop Report. Centre for Catchment and In-stream Research and Development Natural Resources. Brisbane, Australia.
- Arthington, A.H., Brizga, S.O., Choy, S.C., Kennard, M.J., Mackay, S.J., McCosker, R.O., Ruffini, J.L. & Zalucki, J.M. 2000. *Environmental flow Requirements of the Brisbane River Downstream of Wivenhoe Dam*. South East Queensland Water Corporation, and Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University: Brisbane, Australia.
- Arthington, A., Bunn, S., Poff, L. & Naiman, R.J. 2006. "The Challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems". *Ecological Applications*, 16(4): 1311-1318.
- Ávila A.M.A., Rivera J.V., & Amaya, C.A., 2014. Calibración del modelo Qual2K V2.07 en la evaluación del impacto de cargas orgánicas en el río Frío, Santander, Colombia. Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)."Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity" July 22 - 24, 2014 Guayaquil, Ecuador.
- Bojórquez, L.A. 1989. "Methodology for Prediction of Ecological Impacts Under Real Conditions in Mexico". *Environmental Management*, 13, pp. 545-551.
- Bojórquez-Tapia, L.A., Sánchez-Colón, S. & Flores, A. 2005. "Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis". *Environmental Management* 36(3): 469-481
- Boulton, A. J. 1999. "An overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis". *Freshwater Biology* 41: 469-479.
- Brown, C. & King, J. 2003a. "Environmental Flows: Concepts and Methods". En: *Water Resource and Environment Technical Note 1*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D.C.
- Brown, C. & King, J. 2003b. "Environmental Flows: Case Studies". En: *Water Resources and Environment*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- Brown, C. & King, J. 2003c. "Environmental Flows: Flood Flows". En: *Water Resources and Environment*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington, D.C.
- Bunn, S.E. & Davies, P.M. 2000. "Biological processes in running waters and their implications for the assessment of ecological integrity". *Hydrobiologia* 422/423: 61-70.
- Bunn, S.E. y Arthington, A.H. 2002. "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity". *Environmental Management*, 30(4): 492-507.
- CCME WATER, 2001. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. User's Manual. Canadian Council of Ministers of the Environment. USA.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad. 2008. *Estudios Hidrológicos, Hidrogeoquímicos, Fluviales, Hidrodinámica Lagunar-Costera, Manejo de Cuenca y Distrito de Riego, Caudal Ecológico, Calidad del Agua Superficial y Contaminación difusa de las Lagunas de Chacahua del Sistema Ambiental Regional del Proyecto de Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (Periodo de Muestreo Julio a Diciembre, 2008)*. Convenio de Colaboración CFE-IMTA:SC-CPH-13. México.
- Cloquell-Ballester, V.A., Monterde-Díaz, R., Cloquell-Ballester, V.A. & Santamarina-Siurana, M.C. 2007. "Systematic comparative and sensitivity analyses of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments". *Environmental Impact Assessment Review* 27, 62-83
- Dabos, R. & Hirji, R. 2003. *Water Resources and Environment Technical Note C.1. Environmental Flows: Concept and Methods*. Series Editions. The World Bank, Washington, D.C.
- Dyson, M., Berckamp, G. & Scanlon, J. 2003. *Flow*. Editorial IUCN, UK, p. 125.
- Fisher, S. y H. Kummer. 2000. "Effects of residual flow and habitat fragmentation on distribution and movement of bullhead (*Cottus gobio* L.) in an alpine stream". *Hydrobiologia* 422/423, 305-317.
- FISRWG, (Federal Interagency Stream Restoration Working Group). 1998. *Stream corridor restoration principles, processes, and practices*. USA government.
- FAOUN (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2014. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. FAO publications. Italy.
- River FLO-2D. 2009. *Two Dimensional Finite Element River Dynamics Model, Manual*. FLO-2D. FLO-2D Software, Inc. Nutrioso. USA
- Gafny, S., Goren, M. & Gasith, A. 2000. "Habitat condition and fish assemblage structure in a coastal mediterranean stream (Yarqon, Israel) receiving domestic effluent". *Hydrobiologia* 422/423, pp. 319-330.
- García de Jalón, D. 1995. *Management of physical habitat for fish stocks. In the ecological basis for river management*. (Eds) D. M. Harper y J. D. Ferguson. John Wiley&Sons, Chichester: 363-374.

- García, R.E., González-Villela, R., Martínez Austria, P., Athala, M. & Soldán, A.P. 1999. *Guía de Aplicación de los Métodos de Cálculo de Caudales de Reserva Ecológicos en México*. IMTA-CNA. México.
- González-Villela, R. 2007. Cálculo de caudales para la conservación del hábitat en ríos regulados por presas. En: *Bases Teóricas y Prácticas del Manejo Limnológico de las Presas Mexicanas: Hacia un Manejo Sustentable del Agua*. (Ed). Arredondo, F. J. L. Editorial. AGT.
- González-Villela R., A. Banderas Tarabay. 2015. Metodologías para el Cálculo de Caudales Ecológicos y Ambientales en Ríos Regulados por Presas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Gustard, A. 1992. "Analysis of River Regimes". (Eds). Calow and Petts. *The Rivers Handbook*, Vol. I. John Wiley & Sons.
- Hardy, T.B., S. Williamson, T.J. Waddle. 1997. *The theory and application of the physical habitat simulation system (PHABSIM)*. Midcontinental Ecological Science Center. United States Geological Survey. Biological Resources Division. Fort Collins, CO. USA.
- HEC-RAS River Analysis System. 2008. *Hydraulic Reference Manual*. Versión 4.0. marzo de 2008.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 1981. Digetenal.
- Jungwirth, M., Muhar, S. & Schmutz, S. 2000. "Fundamentals of fish ecological integrity and their relation to the extended serial discontinuity concept". *Hydrobiologia* 422/423, 85-97.
- King, J.M., Thorne R.E. & De Villiers M.S. 2000. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission: Pretoria, South Africa
- King, J. & Brown, C. 2006. "Environmental Flows": Striking the balance between development and resource protection. *Ecology and Society* 11(2): 26 – 47.
- Komar, P.D. 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall: 429p.
- Lytle, D.H. y N.L. Poff. 2004. "Adaptation to natural flow regime". *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.
- Maddock, I. 1999. "The importance of physical habitat assessment to evaluating river health". *Freshwater Biology*, 46: 807-819.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial) 2012. Índice normalizado de precipitación. Guía de Usuario. OMM-No 1090. ISBN 978-92-63-31090-3. Disponible en: [http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm\\_wmo\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_es.html).
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Trestegard, K.L., Richey, B.D., Sparks, R.E. & Stromberg, J.C. 1997. "The natural flow regime". *BioScience* 47: 769-784.
- Poff, N.L., Richey, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.D., Freeman, M.C., Henricksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O'Keefe, J.H., Olden J.D., Rogers, K., Thorne R.E. & Warner, A. 2009. "The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards". *Freshwater Biology*.
- Reynolds, C. S. 1993. "The ecosystem approach to water management. The main features of the ecosystems concept". *Journal Aquatic Ecosystem Health*, 2:3-8.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. & Braun, D.P. 1996. "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems". *Conservation Biology*, 10(4): 1163-1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V. & Braun, D.P. 1997. "How much water does a river need?" *Freshwater Biology* 37, pp. 231-249.
- Richter, B.D., Warner, A.T., Menyery, J.L. & Lutz, K. 2006. "A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations". *River Research and Applications*, 22: 297-318.
- Ruiz, L.A. 2009. "Studies of hydrology, hydro-geochemistry, river, coastal lagoon hydrodynamic, catchment management, irrigation district, environmental flows, water quality, diffuse contamination of Chacahua lagoons of the environmental regional system of the multiple hydraulic use Paso de la Reina Oaxaca (sampling period of April – December, 2009)". "Estudios hidrológicos, hidro-geoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar costera, manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chacahua del sistema ambiental regional del proyecto de aprovechamiento hidráulico de usos múltiples, Paso de la Reina Oaxaca (periodo de muestreo abril a diciembre, 2009)". Proyecto TC-0957.3. Convenio IMTA-CFE. Mexico.
- Schreider, M., Paris, M. Rodríguez, E. y Indij, D., 2017. *Diagnóstico del grado de desarrollo del enfoque de caudales ambientales en países de Latinoamérica*. Informe Final. RALCEA, BID, CODIA, European Commission y Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación del Gobierno de España. Argentina.
- Tennant, D.L. 1976. *Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources*. US Fish and Wild Life Service, Montana. USA.



Tharme R. E. 2003. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers". *River Research and Applications* 19. 397 – 441.

TNC, The Nature Conservancy. 2006. Ecological limits of hydrologic alteration. Integrating environmental flows with regional water management. *Sustainable Waters Program*. Boletín: 1 – 4.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1986. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release NO. 55 (2nd edition). U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

VSMOW2 - IAEA NUCLEUS - International Atomic Energy Agency. 2015. Disponible en la WEB: [https://nucleus.iaea.org/rpst/referenceproducts/referencematerials/Stable\\_Isotopes/2H18O-water-samples/VSMOW2.htm](https://nucleus.iaea.org/rpst/referenceproducts/referencematerials/Stable_Isotopes/2H18O-water-samples/VSMOW2.htm). Consultado el 18 de abril de 2013. Um ad qui odisitatem expliti untusa digenditasit

## SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA PARA CONSUMO HUMANO, SINÓNIMO DE AGUA SEGURA

### RAINWATER COLLECTION SYSTEMS FOR HUMAN CONSUMPTION, SAFE WATER SYNONYMOUS

Basán Nickisch, Mario<sup>1</sup>; Sánchez, Luciano<sup>2</sup>; Tosolini, Rubén<sup>3</sup>; Tejerina Díaz, Fabián<sup>4</sup>; Jordan, Patricia<sup>5</sup>

#### Resumen

En el norte de la Provincia de Santa Fe, Argentina, el agua subterránea presenta condicionantes por exceso de sales y/o elementos tóxicos para el consumo humano y el riego de huertas, por lo que se considera estratégico la utilización del agua de lluvia como seguridad hídrica para satisfacer la demanda de la dieta de las familias.

Para ello el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la República Argentina investiga generando, adaptando, validando y transfiriendo alternativas de Sistemas de Captación y Aprovechamiento de agua de Lluvia (SCALL) utilizando tecnologías apropiadas y apropiables.

El objetivo prioritario es dar respuesta a la demanda de agua para consumo humano y de autoconsumo teniendo en cuenta la calidad físico-química y microbiológica garantizando que el agua sea segura, libre de gérmenes patógenos y que no contenga elementos tóxicos.

La metodología consistió en analizar la cantidad anual de milímetros de precipitación mediante estudios probabilísticos con períodos de retorno pequeños, que el agua no presente pH bajo debido a la influencia de elementos industriales locales ni elementos tóxicos producto de la volatilidad en la aplicación de agroquímicos.

La superficie de los techos necesaria, la demanda, el dimensionamiento de las canaletas, cañerías de bajada, almacenamiento, y los mecanismos de tratamiento constituyen el protocolo básico para estos sistemas.

Como resultado de este proceso se disponen de alternativas de diseño y de tratamiento que permiten garantizar agua segura según los usos planificados. Actualmente en la región se han concretado sistemas con las tecnologías desarrolladas por INTA, articulando con diversas instituciones nacionales, provinciales y locales.

**Palabras clave:** Agua segura para consumo humano, agua de lluvia, riego de huertas, tecnología apropiada.

#### Abstract

In the north of the Province of Santa Fe, Argentina, groundwater presents limitations due to excess salts and / or toxic elements for human consumption and irrigation of orchards, for which it is considered strategic the use of harvested rainwater as a security measure in order to meet the demand for the families' diet.

To this end, the National Institute of Agricultural Technology (INTA) of the Argentine Republic investigates generating, adapting, validating and transferring rainwater harvesting and utilization systems (SCALL) by using appropriate technologies.

The priority objective is to respond to the demand for human consumption and self-consumption while taking into account the physico-chemical and microbiological that characterizes safe drinking water.

The methodology consisted in analyzing the annual precipitation data by probabilistic studies with low return periods that the water does not present low pH due to the influence of local industrial elements or toxic elements due to the volatility in the application of agrochemicals.

The required roof surface, demand, sizing of gutters, downspouts, storage and treatment mechanisms are the main components of these systems.

As a result of this process, design and treatment alternatives are available to ensure safe water according to planned uses. Currently in the region, systems have been implemented with technologies developed by INTA in collaboration with various national, regional and local institutions.

**Keywords:** Safe water for human consumption, rain water, irrigation of orchards, appropriate technology.

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. basannickisch.mario@inta.gob.ar.

<sup>2</sup> sanchez.luciano@inta.gob.ar

<sup>3</sup> tosolini.ruben@inta.gob.ar

<sup>4</sup> tejerina.fabian@inta.gob.ar

<sup>5</sup> jordan.patricia@inta.gob.ar

## 1. INTRODUCCIÓN

En regiones donde el agua subterránea no es químicamente apta de forma directa para el consumo humano es válido analizar la posibilidad del aprovechamiento de las precipitaciones para dicho uso.

Históricamente, varios lugares de Argentina se han abastecido con las precipitaciones, existiendo la cultura del aprovechamiento del agua de lluvia, no solo para el consumo humano, sino también para usos múltiples.

Los aljibes tradicionales se basan en el aprovechamiento del agua de lluvia que se capta de los techos, conduciéndola por canaletas con cañerías que terminan en un depósito central. En pocos casos existe un paso previo en donde el agua sucia inicial se desvía y/o pasa por un decantador de sedimentos.

Algunos de los problemas de estos sistemas consisten en que:

- Son contruidos sin el diseño apropiado ni las normas constructivas adecuadas y se ocupan materiales de baja calidad.
- Las áreas de captación no tienen las dimensiones acordes a las precipitaciones del lugar ni al volumen que se requiere captar. Sus materiales son inadecuados para poder captar el agua de lluvia de manera eficiente.
- Las canaletas y bajadas no tienen el tamaño necesario para conducir toda el agua captada por los techos hacia los depósitos.
- Entre la superficie de captación (los techos) y el depósito no hay mecanismos que garanticen el filtrado de los materiales que pudieran existir al momento de las lluvias (material vegetal, insectos, sedimentos, etc.) lo que pone en riesgo la calidad del agua almacenada.

Los depósitos de almacenamiento no disponen de cierre superior hermético, ni de mecanismos de bombeo estancos para extraer el agua, tampoco mecanismos de rebalse que prevean el no ingreso de alimañas, roedores, insectos, etc., ni mecanismos de tratamiento bacteriológico del agua para considerarla segura para el consumo humano.

Una parte importante de estos sistemas son los depósitos, los cuales pueden ser de mampostería, ferrocemento, placas de cemento, plástico. Su aplicación dependerá del análisis de cada lugar referido a la inversión inicial, capacidad constructiva local, acceso a los materiales, vida útil, aceptación por parte de los usuarios. Se recomienda realizar la evaluación de riesgos de movimientos sísmicos y la presencia de arcillas expansivas en el perfil del suelo.

El INTA dispone de experiencias con estas diferentes tecnologías y se investiga el comportamiento de estos materiales en los ambientes donde se concretan, analizando ventajas y desventajas (Basán Nickisch, 2012a).

La ubicación de los depósitos no es un dato menor, ya que deben estar lo más alejados posible de los potenciales focos de contaminación, como son letrinas, pozos sépticos, criaderos de animales, depósitos de basuras y de las raíces de árboles cercanos.

Los depósitos deben diseñarse acorde a la demanda, es decir, que su tamaño dependerá del número de integrantes que se van a abastecer y/o de la producción a la que se destine, por ejemplo riego hortícola o abrevado de animales de granja.

Las dimensiones de los techos, canaletas y bajadas deben tener en cuenta las precipitaciones del lugar, el volumen anual que precipita y su distribución en el tiempo, así como su análisis probabilístico. El tamaño del aljibe dependerá de la distribución mensual de las precipitaciones en el año y de la demanda que se piensa abastecer. De esa manera se garantiza el llenado anual del depósito.

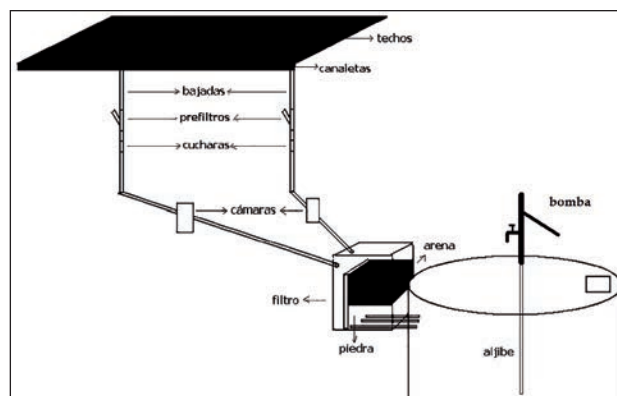
Como objetivo principal del presente trabajo se planteó *dar respuesta a la demanda de agua para consumo y uso humano con el agua de lluvia*.

Y como objetivo específico se planteó que el agua sea segura, es decir, libre de gérmenes patógenos que puedan enfermar a la población, que no contenga elementos tóxicos propios del ambiente donde se producen las precipitaciones y que los sistemas se planifiquen a la demanda (Basán Nickisch et al., 2012c).

## 2. METODOLOGÍA

Los sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia constan de los siguientes elementos (Figura 1)

- Área de captación.
- Sistema de canaletas y bajadas.
- Sistema de prefiltrado, cucharas y cámaras de inspección.
- Sistema de filtrado.
- Depósito de almacenamiento.
- Mecanismo de bombeo para extraer el agua.
- Tratamiento microbiológico.



**Figura 1.** Croquis de un sistema de aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano



El área de captación consiste en superficies bien acondicionadas o nuevas, preferentemente techos de las viviendas o instalaciones con superficies aptas para “cosechar” agua de lluvia de manera eficiente. Las características de esta superficie son clave para garantizar el llenado del depósito en base a las precipitaciones locales.

La dimensión del área de captación se calcula a partir del análisis de las lluvias del lugar o cercanas, siendo recomendable contar con series de precipitaciones

anuales lo suficientemente extensas (30 a 40 años como mínimo) para contemplar períodos hidrológicos secos, húmedos y medios.

En la Figura 2 se puede apreciar la alta componente aleatoria de la variable precipitación, muy común en regiones semiáridas y áridas. Por ello no se recomienda trabajar con los valores promedio históricos para captar agua de lluvia, ya que durante muchos años no se podrá satisfacer la demanda planificada.

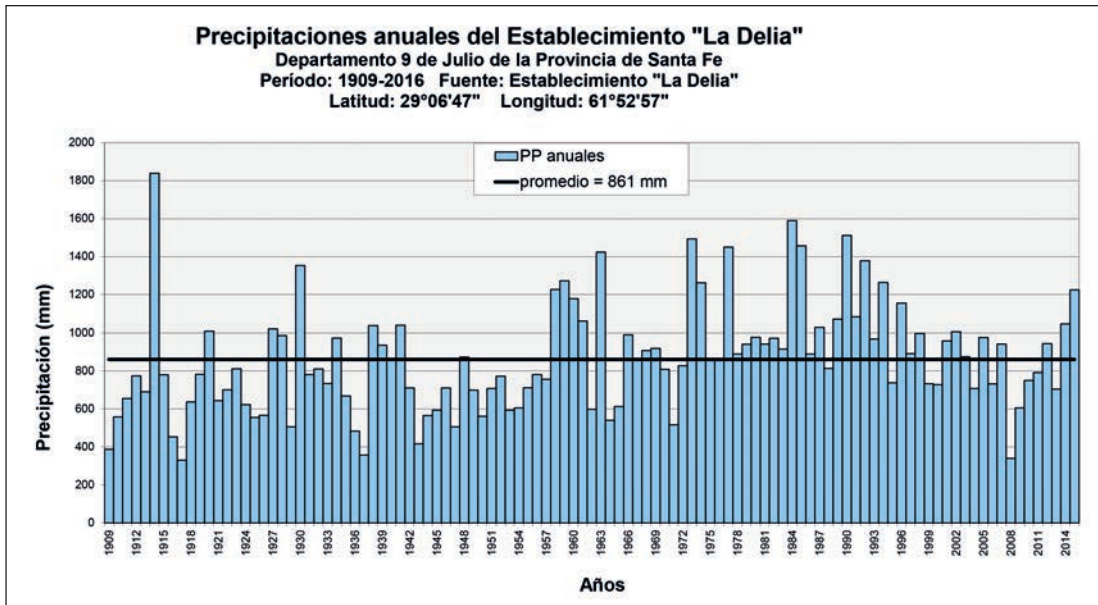


Figura 2. Precipitaciones anuales del Establecimiento La Delia, Departamento de 9 de Julio, Provincia de Santa Fe, Argentina

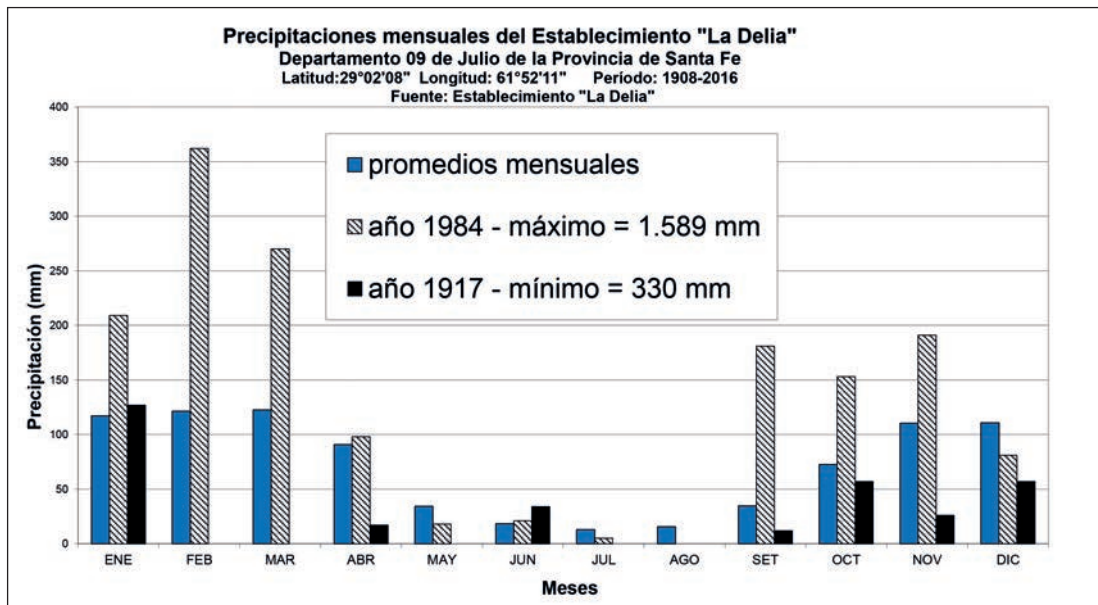


Figura 3. Distribución mensual promedio de lluvias en El Establecimiento La Delia, Dpto. 9 de Julio, Provincia de Santa Fe, Argentina, conjuntamente con los años de menor y mayor valor de la serie analizada

Para obtener la lluvia de diseño se deben realizar los análisis probabilísticos de esta variable aplicando modelos desarrollados para tal efecto (Normal, Log Normal, Wakeby, Pearson, Log Pearson,

Exponencial, General de Valores Extremos), donde en base a elegir los menores errores cuadráticos medios de la varianza y de la frecuencia, se opta por un valor de diseño que corresponda a un período

de retorno bajo,  $T_r = 1,25$  años para este estudio, para así procurar el abastecimiento de agua durante todo el año en todos los años, adoptando entonces la lluvia de diseño.

La distribución de las precipitaciones durante el año debe tenerse en cuenta para adoptar el tamaño del depósito necesario para satisfacer la demanda (Figura 3).

La otra variable de diseño importante es la demanda que se debe cubrir, por ello se analiza la población de diseño y sus características, priorizando el consumo personal e higiene de los alimentos, utensilios de uso diario, etc., partiendo con una dotación de 2 a 3 litros diarios por persona, que se irá incrementando si el aljibe también servirá para efectuar riegos a la huerta, para el aseo personal, para el consumo de animales de granja, etc. (Anaya Garduño, 1998).

Esa variable (cantidad de personas que se deben abastecer) se calcula en base a la curva de crecimiento de la población a 20 ó 30 años, o directamente en zonas rurales se realiza un incremento en un 20 ó 30% de la población actual que se quiere abastecer (Basán Nickisch, 2012a).

Se asume que un 10% del agua que cae en la superficie de captación no llega al depósito de agua por salpicaduras ante lluvias de alta intensidad.

Por lo tanto, la superficie de captación de agua de lluvia se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Superficie} = \text{Volumen} / \text{Altura}$$

Dónde:

**Superficie:** es la superficie de captación de diseño del sistema que se busca ( $m^2$ ).

**Volumen:** se calcula en base a la población de diseño, teniendo en cuenta la curva de crecimiento a 30 años, o un 20 ó 30% de incremento de la población actual ( $m^3$ ).

**Altura:** precipitación anual con una recurrencia de 1,25 años menos el 10 % por pérdidas por salpicaduras y en las conducciones (m).

El sistema de canaletas y bajadas conducen el agua de lluvia desde el techo hasta el depósito, previo paso por el sistema de filtrado. Es la parte más económica de la obra pero no siempre se dimensiona de manera tal de transportar toda el agua captada hasta el depósito, generalmente con un número insuficiente de bajadas, las cuales deben mantenerse limpias y en buenas condiciones (Anaya Garduño, 2011).

Las canaletas deben ser lo suficientemente grandes para que puedan conducir el agua captada en los techos, cualquiera sea la intensidad de la lluvia. Las más comunes son las de chapa galvanizada o de PVC con tratamiento contra los rayos ultravioleta.

Su dimensionamiento es recomendable que sea de 15 cm por 15 cm, no solo previniendo el caudal captado sino también obstrucciones parciales de hojas y/o sedimentos.

Se deben contemplar bajadas de diámetro 110 mm, previendo una por cada 30 a 40 metros cuadrados de superficie de captación, para minimizar pérdidas por rebalse ante lluvias intensas.

El encastre debe ser perfecto y tener suficientes ganchos de sujeción para que soporten el peso de las mismas con su máxima carga de agua, siendo recomendable que los ganchos se ubiquen cada 1,5 m de espaciamiento.

Es conveniente que las canaletas se instalen con un desnivel adecuado para que el agua escurra sin dificultad hacia las bajadas, con una pendiente de 0,005 (5 cm por cada 10 m de longitud). Siempre deben limpiarse antes y durante el período lluvioso, prestando la atención necesaria a las hojas y cualquier otro elemento que pueda saturar el sistema de canaletas, cañerías, prefiltrado y filtrado (Basán Nickisch y Tejerina Díaz, 2013).

El sistema de prefiltrado y cucharas permite retener restos vegetales (hojas, tallos) y demás sedimentos gruesos arrastrados desde el techo. Es esencial y necesario que toda el agua "cosechada" de los techos pase por un sistema de filtrado para almacenar siempre el agua libre de impurezas que dificulten su tratamiento posterior.

Existen diversas alternativas técnicas para operar estos sistemas. Unos consisten en un almacenamiento previo del agua sucia inicial de las lluvias para destinarse al riego de huertas y luego, cuando ya corre limpia, se deriva al depósito final destinado para el consumo humano (Figura 4). Para ello el tacho inicial debe tener un volumen de almacenamiento acorde a la superficie del techo y a los sedimentos del lugar.



**Figura 4.** Sistema de trampa inicial de tanque para almacenar el agua sucia para el riego de huerta o forestales

Otro consiste en un sistema de prefiltrado por cada caño de bajada del sistema de canaletas (Figura 5) y el mismo es simplemente la implementación de una bifurcación en esas cañerías con una malla plástica fijada con una abrazadera y tres remaches o tornillos pasantes, que impide el paso de residuos gruesos tales como material vegetal, insectos, entre otros. Es un mecanismo muy práctico en su instalación, en su funcionamiento y en su limpieza, ya que los sólidos retenidos se pueden retirar con la mano.

Ese sistema de filtrado se puede complementar con una cuchara que puede derivar el agua inicial con tierra y cerrarlo cuando el agua ya pasa limpia (Figura 5).



Figura 5. Sistema de prefiltrado y cuchara

No obstante, la operación del sistema de pre-filtrado y cuchara tiene 3 limitantes importantes:

- Hay que estar presente cuando se producen las precipitaciones.
- Se pierde volumen de agua que puede ser muy útil para satisfacer la demanda.
- El paso de agua con una carga de sedimentos importante si no es activada la cuchara.

Estas limitantes se acentúan en los Establecimientos Escolares en regiones con régimen monzónico de precipitaciones (verano en nuestro caso), que es cuando se encuentran en receso.

Cuando se considere necesario, debido a un trayecto largo de conducción de agua hasta el aljibe o cuando necesariamente se deban realizar conducciones no rectas, deberán implementarse *cámaras de inspección*, una por cada bajada planificada, que tengan tapas con buen cierre, con una altura suficiente que no permita el ingreso de agua superficial de escurrimiento, cualquiera sea su origen (Figura 1).

El sistema de filtrado consiste en un decantador y el filtro de arena, donde el agua pasa por los mismos, impidiendo el ingreso de tierra o de cualquier elemento que haya sorteado el sistema de prefiltrado (Figura 6).

El número y diámetro de las cañerías de PVC que colecta el agua filtrada debe ser igual o superior al de las cañerías de llegada que provienen del área de captación. Con esto se logra que el filtro no sea rebasada su capacidad de funcionamiento ante lluvias de alta intensidad.

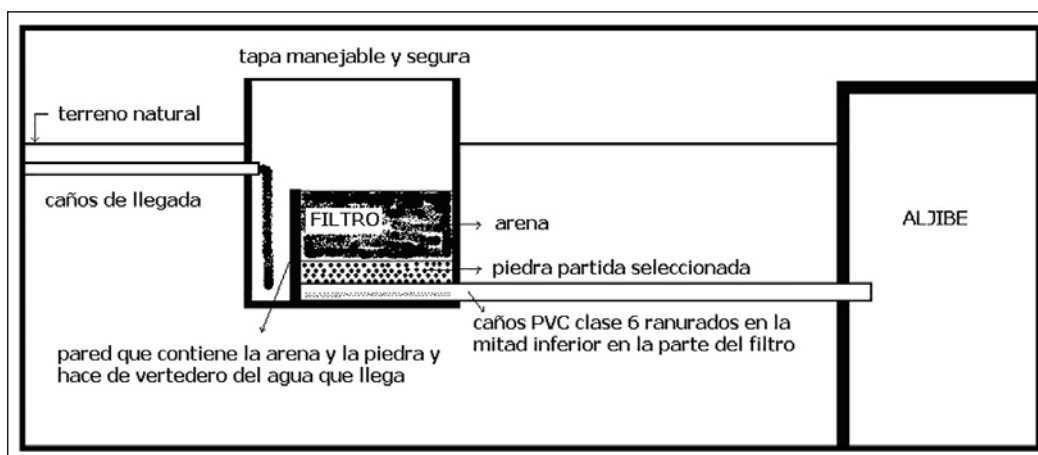


Figura 6. Filtro separado del aljibe

Las paredes del filtro se construyen con mampostería, cuyo espesor puede ser de 5 a 15 cm, construyéndose con ladrillos comunes de barro cocido de buena calidad, unidos con mortero de cemento portland normal y arena, con un revestimiento interior que contemple también material hidrófugo, para que sea estanco.

Las cañerías de llegada desembocan en el primer compartimento o decantador de sedimentos. Una pared nivelada a cero separa al mismo del sector de filtrado. El agua proveniente del techo inunda dicho decantador y termina rebasando la pared como un vertedero hacia el sector del filtro y termina en el aljibe.



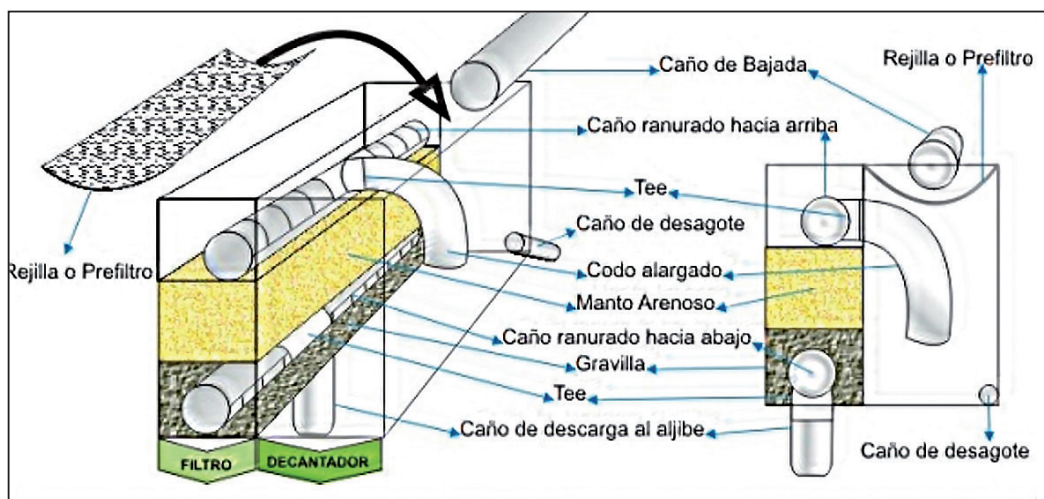
El filtro de arena en su parte inferior (en contacto con la cañería de PVC agujereada o ranurada) se carga con piedra partida fina, en una capa con espesor de 30 cm. Posteriormente, se coloca una capa de arena gruesa Tipo 1-2 mm, con un espesor de 20 a 40 cm hasta alcanzar la pared del vertedero que une con el primer compartimento.

La superficie filtrante de arena gruesa debe ser proporcional a la de captación: por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie de captación se recomienda disponer de 1 m<sup>2</sup> de superficie filtrante.-

El material filtrante es la arena, la cual es sostenida por la piedra partida, cuya función de esta última, es la de impedir el ingreso de la arena a la cañería de drenaje y, por ende, al depósito de agua.

El filtro debe poseer una tapa segura y práctica para inspeccionar su limpieza y funcionamiento. Antes de las primeras lluvias y durante el período lluvioso del verano debe corroborarse su estado (limpieza y la buena disposición del material filtrante).

Una variante a este diseño de prefiltrado, decantación y filtrado es la alternativa compacta que se ilustra en las Figuras 7 y 8.



**Figura 7.** Sistema de filtrado compuesto por prefiltrado, decantador y filtro de arena (Basán Nickisch et al., 2014b)

Esta alternativa compacta de sistema de filtrado se puede implementar tanto para aljibes construidos de mampostería, ferrocemento, placas de cemento, y también para depósitos plásticos, debiendo construir una base soporte aparte para estos tres últimos.

El depósito de almacenamiento permite conservar el agua captada durante todo el año.

Se puede construir de diversos materiales (mampostería, ferrocemento, plástico, madera, metálico, placas de cemento), donde deben prevalecer las normas constructivas que garanticen su comportamiento ingenieril en lo que hace a soportar adecuadamente presiones externas e internas, y una adecuada estanqueidad en lo que se considere su vida útil, siendo deseable que la misma sea de 30 años como mínimo.

Es sustancial consultar a los usuarios acerca de los materiales, preferencias, costos, lugares de implementación por el acceso de materiales de construcción, costumbres, capacidad constructiva local por alguna de las alternativas, etc.

Los depósitos pueden estar enterrados, semienterrados o en superficie, donde su diseño deberá contemplar estas alternativas.

Otro punto a tener en cuenta es el máximo nivel freático durante los períodos hidrológicos húmedos

(excesos), tanto por la construcción como por la operación y mantenimiento posteriores.

Su entorno debe estar convenientemente higienizado y libre de animales domésticos, en lo posible con un cercado perimetral que impida el ingreso cercano de esos animales.

Debe tener cañería de rebalse con malla mosquetero para impedir el ingreso de roedores, sapos, víboras, etc., a una altura tal que no pueda entrar el agua por escorrentía superficial teniéndose en cuenta, además, la pérdida de capacidad de almacenamiento que ello implica.

Siempre es conveniente que tenga un acceso superior seguro (con candado) y práctico más una escalera interior para poder inspeccionar/limpiar el depósito.

Es deseable que tenga un diseño cilíndrico para uniformizar tanto las presiones externas del suelo como las internas del agua.

En la parte inferior, cuando los suelos no son estables, como el caso de los limosos y/o arcillosos o la presencia de hormigueros, siempre es conveniente compactar con un pisón y, de ser necesario, colocar una primera capa de hormigón económico, cuyo espesor variará en relación directa con la capacidad del depósito. A mayor capacidad, mayor espesor.

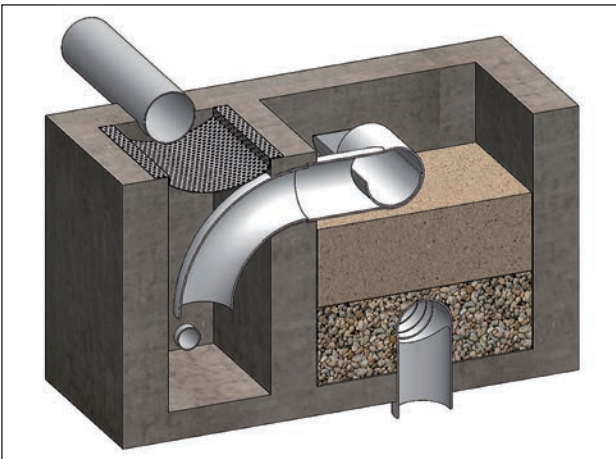


Figura 8. Vista de perfil del sistema compacto



Figura 9. Filtro ya cargado con sistema vertedor en la superficie de la arena



Figura 10. Filtro completo con tapas de protección para el filtro de arena

En el caso de presencia de freática cercana con concentración de sales se recomienda usar cemento puzolánico (resistente al ataque de sales, esencialmente sulfatos) y fundar la estructura sobre una capa de material granular para cortar el posible ascenso del agua freática por capilaridad.

Una vez estabilizado el piso la obra realmente comienza con una losa inferior de hormigón armado.

Las paredes laterales en los aljibes de mampostería se construyen con un espesor de 15 cm para depósitos de hasta 20.000 l de capacidad, luego se recomienda paredes de 20 cm de espesor hasta 30.000 l, para luego tener paredes de 30 cm de espesor para depósitos de más de 30.000 l, dependiendo esto fundamentalmente de la profundidad de los reservorios.

Es importante elegir ladrillos cocidos de buena calidad, cemento portland normal con una resistencia de 400 kg/cm<sup>2</sup> (CPN 40), encadenados laterales cada 1,5 m de altura con hierro de 8 mm de diámetro, y un revoque de 1 cm de espesor con material hidrófugo.

En el caso de zonas sísmicas realizar una doble armadura, cara interna y externa, para que trabaje en los dos sentidos, y vincular la malla de la fundación con la armadura de las paredes (muy importante). La idea es que trabaje más como cuerpo rígido, y minimizar las fisuras por movimientos diferenciales.

Siempre es conveniente implementar mecanismos de bombeo estancos para extraer el agua almacenada. Una bomba centrífuga domiciliar si se dispone de corriente convencional (220 V) o una bomba manual para la extracción del agua almacenada (Figura 11). Las mismas pueden colocarse encima de la tapa superior del almacenamiento o al costado del mismo. Deben ser estancos para reducir el riesgo de contaminación del agua (Figuras 11 y 12a y 12b).

Hay que evitar la apertura de la boca del depósito, la introducción de tarros o baldes con sogas para poder extraer el agua, minimizando así también el peligro de accidentes de los niños.



Figura 11. Mecanismo de bombeo manual para extraer y elevar agua con una bomba de hierro fundido





**Figura 12a.** Alternativa de bomba manual para aljibe construida con polipropileno. (Basán Nickisch y Sánchez, 2016)



**Figura 12b.** Desglose de una bomba a pistón que se puede construir con material de polipropileno

También es posible utilizar las energías renovables (eólica o solar) para bombear el agua del depósito, e incluso sobreelevarla a otros almacenamientos de las casas.

En el caso particular de depósitos implementados en superficie (Figuras 13 y 14) es práctico colocar un grifo para extraer el agua donde no hace falta el mecanismo de bombeo, siendo riesgoso también esto si alguien no tiene la precaución de cuidar que siempre se le dé un correcto uso y que no

pierda agua dicho grifo. En ambientes con niños se incrementa esta posibilidad de perder volúmenes de agua importantes.



**Figura 13.** Mujeres wichí del Lote 8 en Los Blancos, Salta, Argentina. Depósitos de plástico sobreelevados del terreno natural



**Figura 14.** Depósito sobre el terreno natural con sistema de captura de agua inicial sucia con mecanismo de prefiltrado y decantación en Haití (Basán Nickisch et al, 2016b)

El tratamiento microbiológico del agua almacenada es uno de los principales motivos de investigación en este tipo de sistemas.

Después que el agua pasó por el sistema de filtrado y se almacena limpia en el depósito, *todavía no es segura para el consumo humano*, ya que puede contener microorganismos patógenos que pongan en riesgo la salud de las personas por consumir agua sin un tratamiento adecuado.

Se consideró importante desde INTA realizar los análisis correspondientes con tres tratamientos diferentes de las consideradas tecnologías apropiadas (Figuras 15a, 15b y 15c) y a dos fuentes de agua de lluvia donde una de ellas posee sistema de filtrado, pero sin tratamiento bacteriológico (testigo 1) y otra sin filtrado y sin tratamiento bacteriológico (testigo 2):



Tratamiento 1: Dejar expuesta a la radiación solar una botella de plástico llena con agua de lluvia filtrada durante 1 día.

Tratamiento 2: Agregar una gota de hipoclorito de sodio comercial (lavandina) por cada litro de agua de lluvia filtrada.

Tratamiento 3: Hervir el agua de lluvia filtrada durante 3 a 5 minutos.

Testigo 1: agua filtrada sin ningún tratamiento microbiológico.

Testigo 2: agua sin filtrar y sin tratamiento microbiológico.

Cuando se presentan días nublados y se utilizan la radiación solar como desinfectante (comúnmente llamado SODIS) se recomienda dejar las botellas de agua expuestas por 2 días, simplemente por precaución antes de su consumo.

Según estudios realizados por el INTA EEA Santiago del Estero (Basán Nickisch, 2011) se necesita una gota de lavandina por cada 2 litros de agua almacenados en un aljibe, estando el agua clarificada. Con ello se logra cloro residual de al menos 0,2 mg/L como  $Cl_2$  y una desinfección de bacterias y virus patógenos, controlando el pH y la temperatura, con análisis microbiológicos periódicos para garantizar agua segura para el consumo. En esos estudios se comprobó también que la oscuridad y la temperatura que se genera en el interior de un aljibe contribuyen a preservar la capacidad de desinfección de este elemento, donde el cloro residual se mantuvo en el agua almacenada entre 30 y 45 días.

No se debe dosificar lavandina en exceso pues no es bueno para la salud. Después de aplicar la misma se debe esperar media hora para que se encuentre en condiciones de ser consumida. Es el único método que tiene un efecto residual de manera tal que después de lograda la desinfección sigue teniendo capacidad desinfectante ante una nueva contaminación.



**Figura 15a.** Desinfección de agua de lluvia con radiación solar (SODIS)

El hervido del agua es un tratamiento eficiente y solamente puede tener una limitante importante en algunos ambientes donde el combustible necesario no esté al alcance de la población (gas, leña, etc.). Luego de hervida el agua se deja enfriar y se deposita en un recipiente limpio hasta su consumo.



**Figura 15b.** Tratamiento con dosificación de lavandina

En el caso del tratamiento SODIS hay que utilizar botellas plásticas de calidad, en buen estado (no rayadas = opacas) y deben ser transparentes (sin color), debiendo descartarse aquellas comunes que puedan desprender elementos tóxicos.

Si se dosifica con lavandina debe ser con la tradicional, sin aditamentos de ningún tipo.



**Figura 15c.** Tratamiento con hervido del agua

### 3. RESULTADOS

Los tratamientos bacteriológicos 1 (agua filtrada del aljibe con tratamiento SODIS), 2 (agua filtrada del aljibe con lavandina) y 3 (agua del aljibe filtrada y hervida) mostraron ausencia de coliformes fecales, coliformes CEK y *Pseudomonas aeruginosa*, según se aprecia en la Tabla 1.

Las muestras 1, 2 y 3 arrojaron valores menores a los umbrales propuestos por el Código Alimentario Argentino de las bacterias aerobias totales y coliformes totales (<500 y <3 respectivamente).

En cuanto a los testigos, los resultados obtenidos para las muestras 4 y 5 indicaron la presencia de coliformes fecales y coliformes CEK, con valores

mayores a los recomendados de bacterias coliformes totales.

En el caso particular del agua cosechada y almacenada en el aljibe sin filtrar y sin tratamiento bacteriológico (5, presenta gran cantidad de bacterias aerobias totales, lo que se debe a que el agua se almacena sin el cierre superior. No sucede eso en aljibe con tapa (4).

**Tabla 1.** Resultados obtenidos de los diferentes tratamientos microbiológicos. (Basán Nickisch et al., 2014b)

Tipo microbiológico	Máximos	Muestras				
		1	2	3	4	5
Bacterias Aerobias Totales	< 500	70	<1	<1	200	4500
Bacterias Coliformes Totales	<3	<3	<3	<3	33	10
Bacterias Coliformes Fecales	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	16	5
Bacterias Coliformes CEK	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	17	5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia

#### 4. CONCLUSIONES

Se considera que el sistema compacto de prefiltrado, decantación, filtración y desinfección es el único que garantiza almacenar agua limpia en los depósitos.

Almacenar agua limpia no significa agua segura pero es un paso indispensable para que el agua no sea rechazada por su turbiedad y, especialmente, porque favorece su desinfección.

Los resultados de los tratamientos microbiológicos en base al agua tratada con el filtrado propuesto, convalidan la eficacia y efectividad de los mismos para garantizar agua segura para el consumo humano.

La desinfección con hipoclorito de sodio (lavandina), el hervido del agua y el tratamiento con radiación solar han dado un resultado excelente para contrarrestar agentes patógenos.

Los testigos 1 y 2 no garantizan agua segura para la población y convalidan la necesidad de realizar el filtrado del agua proveniente de las áreas de captación más el tratamiento microbiológico correspondiente para poder clasificar el agua segura para el consumo humano.

Los almacenamientos o depósitos deben estar cerrados, cualquiera sea el material de los mismos, y los mecanismos de bombeo ser estancos.

Es indispensable la capacitación de las personas que van a operar estos sistemas, sean comunitarios o familiares, para que las mismas internalicen qué se deben realizar estos tratamientos.

La operación y mantenimiento de los sistemas de captación de agua de lluvia es clave para garantizar la calidad del agua apta para el consumo humano en cualquier época del año, donde la limpieza y control

de cada una de las partes antes de las lluvias y durante el período lluvioso es esencial.

Esto permite asegurar que con tecnologías simples y validadas, se puede dar respuesta a la demanda de agua en ámbitos rurales y urbanos, constituyéndose esto en una herramienta importante para asegurar que el hecho de contar con agua en cantidad y calidad durante el año permite afirmar que no implica un motivo para la migración rural la falta de agua segura para propósitos múltiples.

El INTA actualmente investiga métodos con tecnologías apropiadas para que cualquier persona pueda implementar en su casa, de manera tal de garantizar en zonas con alta concentración agrícola no ingresen elementos indeseados a los aljibes.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya Garduño, M. (1998) Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico. América Latina y el Caribe, IICA, México.
- Anaya Garduño, M. 2011. Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Basán Nickisch, M. 2011. Abastecimiento con agua de lluvia para consumo humano en ambientes rurales. INTA
- Basán Nickisch, M. 2012a. Manejo de los Recursos Hídricos para áreas de secano – 2da. Edición. INTA
- Basán Nickisch, M. H. 2012c. Calidad del agua para usos múltiples. 1er Seminario Latinoamericano sobre acceso, uso y tratamiento del agua para la Agricultura Familiar – Agua de calidad con equidad. INTA.

Basán Nickisch, M. 2016. Sistemas de aprovechamiento del agua de lluvia (SCALL) para la EEA Ingeniero Juárez. INTA.

Basán Nickisch, M. y Tejerina Díaz, F. 2013. Nuevo sistema de filtrado de agua para aljibes. INTA.

Basán Nickisch, M.; Tejerina Díaz, F.; Jordan, P.; Tosolini, R.; Sánchez, L.; Sanz, P.; Vera, H. 2014a. Mantenimiento y Tratamiento del Agua en Aljibes. INTA.

Basán Nickisch, M.; Tejerina Díaz, F.; Jordan, P. 2014b. Tratamientos del agua de lluvia validados para consumo humano. INTA.

Basán Nickisch, M. y Sánchez L. 2016 Agua Segura para Comunidades Quom en el norte del Chaco. INTA.

Basán Nickisch, M.; Sánchez, L.; Tosolini, R.; Tejerina Díaz, F.; Jordan, P. 2016b. Aprovechamiento del agua de lluvia para usos múltiples en los Bajos Submeridionales y áreas de influencia. INTA.



## BALANCE DE AGUA EN UN ACUÍFERO COMO BASE PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE Y SEGURIDAD HÍDRICA

## GROUNDWATER BALANCE TO SUPPORT SUSTAINABLE MANAGEMENT AND WATER SECURITY

D'Elia, Mónica<sup>1</sup>; Paris, Marta; Pérez, Marcela

### Resumen

La cuantificación de la oferta y demanda de agua de una región es un componente básico del diagnóstico que integra un plan de gestión del agua. En relación a la oferta es fundamental conocer la disponibilidad de agua del sistema. La demanda refiere a los usos y usuarios del agua, entre los que deben considerarse imperiosamente los ecosistemas, atendiendo a la sostenibilidad de la gestión y el logro de la seguridad hídrica.

En este trabajo se presenta el resultado del balance de agua que ingresa y egresa de los acuíferos en un área de llanura del centro de la Provincia de Santa Fe (Argentina) y la identificación preliminar de algunos ecosistemas dependientes del agua subterránea.

Para estimar la recarga local del acuífero libre se utilizaron diferentes metodologías, mientras que la descarga del acuífero se evaluó a partir de la continuidad entre dos secciones del río Salado. La demanda de agua subterránea para distintos usos fue estimada a partir de datos oficiales de los censos poblacionales, económicos y agropecuarios. La identificación de los ecosistemas dependientes del agua subterránea se realizó por medio de muestreos de agua y análisis en laboratorio y análisis de imágenes satelitales.

Los resultados muestran que anualmente la recarga local del acuífero libre es del orden de 21 hm<sup>3</sup>, la recarga local del acuífero semiconfinado es del orden de los 4 hm<sup>3</sup> y la descarga al río Salado del orden de 18 hm<sup>3</sup>. La demanda de uso ganadero es del orden de 2 hm<sup>3</sup> y el consumo humano en áreas urbanas de 14 hm<sup>3</sup>. No se contó con datos oficiales de uso de agua para fines industrial e irrigación. Se han logrado identificar microinvertebrados dependientes del agua subterránea y áreas irrigadas con agua subterránea o con presencia de vegetación freatófita, están siendo estudiadas.

**Palabras Clave:** gestión integrada de los recursos hídricos, balance hídrico, recarga-descarga de acuíferos, ecosistemas

### Abstract

The quantification of the water supply and demand of a region is a basic component of the diagnosis that integrates a water management plan. In relation to the supply is essential to know the availability of water in the system. The demand refers to the uses and users of water, among which must be considered imperiously ecosystems, attending to the sustainability of management and the achievement of water security.

The results of the groundwater budget and the preliminarily identification of some groundwater dependent ecosystem in a plain of the Santa Fe province (Argentina) are presented in this work.

Local groundwater recharge was estimated using different methodologies, and discharge to Salado River between two sections was calculated. Groundwater demands for different uses were obtained from population, economic, agriculture and livestock official information. Groundwater dependent ecosystems were preliminarily identified by means of groundwater sampling, laboratory analysis and satellite images analysis.

The results show that groundwater local recharge to the unconfined aquifer was about 21 hm<sup>3</sup>, groundwater recharge to the semi-confined aquifer was about 4 hm<sup>3</sup> and groundwater discharge was about 18 hm<sup>3</sup>. Livestock water demand was about 2 hm<sup>3</sup> and human water consumption in urban areas was about 14 hm<sup>3</sup>. Official information related to irrigation and industrial groundwater demand was not available. Dependent groundwater stygofauna was identified and areas with groundwater dependent vegetation are being studied.

**Keywords:** integrated water resources management, water balance, groundwater recharge-discharge, ecosystems

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes en la temática

Bajo condiciones naturales previas a la explotación del agua subterránea, los acuíferos se encuentran en un estado de equilibrio dinámico: la recarga se compensa con la descarga. Tradicionalmente y en el marco de la gestión del agua subterránea, el concepto de *safe yield* (*explotación segura*) ha sido definido como el mantenimiento o sostenimiento, a

largo plazo, del balance entre el agua que se extrae y la cantidad de agua que recarga a los acuíferos anualmente. De esta manera, esta *explotación segura* limitaría la extracción de agua subterránea por bombeo a la cantidad de agua que se renueva naturalmente, pero no tiene en cuenta la descarga natural desde los acuíferos hacia ríos, lagos, mares, el flujo hacia otros acuíferos o el consumo de agua de vegetación freatófita. Por ello algunos autores

1 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Argentina. mdelia@fich.unl.edu.ar.

Recibido: 31/03/2017  
Aceptado: 30/10/2017

consideran que este concepto no puede considerarse como sustentable (Sophocleous, 1997).

Dada la profunda preocupación por alcanzar un manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos, se ha evidenciado un incremento de estudios relacionados al balance de agua subterránea y en particular a la recarga a los acuíferos. Sharma (1989), Lerner et al. (1990), Simmers (1998), Samper (1997), Custodio (1998), Scanlon et al. (2002), entre otros autores, abordaron este tema y sugirieron que, para minimizar la incertidumbre en la estimación de la recarga a los acuíferos, se apliquen y comparen diferentes procedimientos metodológicos corroborados con mediciones directas en campo.

Por otra parte, las alteraciones del equilibrio de los sistemas acuíferos pueden afectar negativamente a los ecosistemas dependientes del agua subterránea como la vegetación freatófita, humedales, ecosistemas en sistemas acuíferos en medios porosos y sistemas kársticos. Walker et al (2001) y Cook et al (2002) analizan en forma conjunta los procesos de recarga-descarga en acuíferos, resaltando la importancia del manejo de las áreas de descarga en relación con los niveles de agua subterránea y la topografía, las extracciones de agua para distintos usos, los procesos de salinización y realizan también consideraciones sobre el uso del agua subterránea por la vegetación. En tal sentido, es de destacar el desafío que implica la determinación de los requerimientos de agua subterránea de la vegetación freatófita ya que estarían condicionados por el tipo de suelo, especie, profundidad del agua subterránea y salinidad del agua.

En acuíferos en medios porosos y kársticos, se desarrolla una fauna subterránea con una gran diversidad de especies, que ha sido estudiada y clasificada por numerosos especialistas de reconocida trayectoria internacional. En Argentina, un grupo de investigadores multidisciplinar de la Universidad de Río Cuarto ha abordado el estudio de esta microfauna subterránea pudiendo distinguir algunas especies como cladóceros y copépodos en acuíferos loésicos (Blarasín et al, 2007).

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es establecer el balance de agua que ingresa y egresa de los acuíferos en un área de llanura del centro de la Provincia de Santa Fe, República Argentina, en forma preliminar, como parte de la evaluación de los recursos hídricos (oferta y demanda), base para la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

## 2. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el Departamento Las Colonias, en el centro de la Provincia de Santa Fe, República Argentina, entre los 31° 20' y los 31° 30' de latitud S y los 61° 05' y los 60° 45' de longitud O. Se encuentra en la región denominada llanura chaco-

pampeana, en la cuenca inferior del río Salado, al oeste del mismo. En esta zona la altitud varía entre 55 y 20 msnm con pendientes del orden de 0,1 y 0,2%. Abarca aproximadamente 500 km<sup>2</sup> e incluye áreas urbanas, suburbanas y rurales (Figura 1). En ella se emplazan la ciudad de Esperanza, capital del Departamento y otras localidades menores como Cavour y Humboldt. La principal actividad económica de la región es la agropecuaria como el cultivo de cereales y oleaginosas y la cría de ganado para producción de carne y leche. Pero además, existen importantes industrias relacionadas con esta actividad como son las metalúrgicas, lácteas, curtidorías y frigoríficos, entre otras. Todas estas actividades se sustentan en el agua subterránea que es extraída de dos importantes acuíferos de la región. La empresa Aguas Santafesinas S.A. (ASSA) realiza el aprovechamiento de agua subterránea del acuífero semiconfinado, a través de un campo de pozos ubicado al oeste de la ciudad de Esperanza. Suministra agua potable a esta ciudad a través de una red y a la ciudad de Rafaela, ubicada a 50 km al oeste del área, por medio de un acueducto.

El clima del área ha sido clasificado como C<sub>2</sub> B'3 r a', que corresponde a la denominación de subhúmedo húmedo (C<sub>2</sub>), mesotermal (B'3), de nula a pequeña deficiencia de agua (r) y de baja concentración térmica estival (a') (Panigatti, 1986). La temperatura media anual en el área es de 18°C. Las mayores temperaturas medias mensuales se registran entre los meses de noviembre a marzo, alcanzando el máximo valor en el mes de enero, alrededor de 25°C, y el mínimo en los meses de junio y julio, aproximadamente 12°C. La precipitación media anual para la serie 1904-2009 es de 989 mm, con un valor máximo de 1710 mm en el año 1914 y un mínimo de 423 mm en el año 1906. Se presenta en la región una alternancia de ciclos secos y húmedos de hasta 3 años que a partir del año 1959 se hicieron más prolongados.

Los suelos predominantes en el área de estudio son argiudoles típicos, bien drenados y profundos que pertenecen a la Unidad Cartográfica Simple: Serie Esperanza (ESP).

La columna hidrogeológica local comprende: un basamento acuícludo formado por arenas y arcillas de origen marino, correspondiente al techo de la Formación Paraná (Mioceno); un acuífero semiconfinado, compuesto por arenas finas y medianas, de origen fluvial de alrededor de 24 m de espesor medio, pertenecientes a la Formación Ituzaingó, también denominadas "Arenas Puelches" (Plioceno); un manto semiconfinante o acuitardo, formado por limos y arcillas de aproximadamente 3 m de espesor promedio de la Formación Pampa (Pleistoceno) y un acuífero freático compuesto por limos, arcillas y loess de origen eólico, palustre y lacustre de aproximadamente 15 m de potencia pertenecientes a la parte superior de la Formación Pampa (Figura 2).

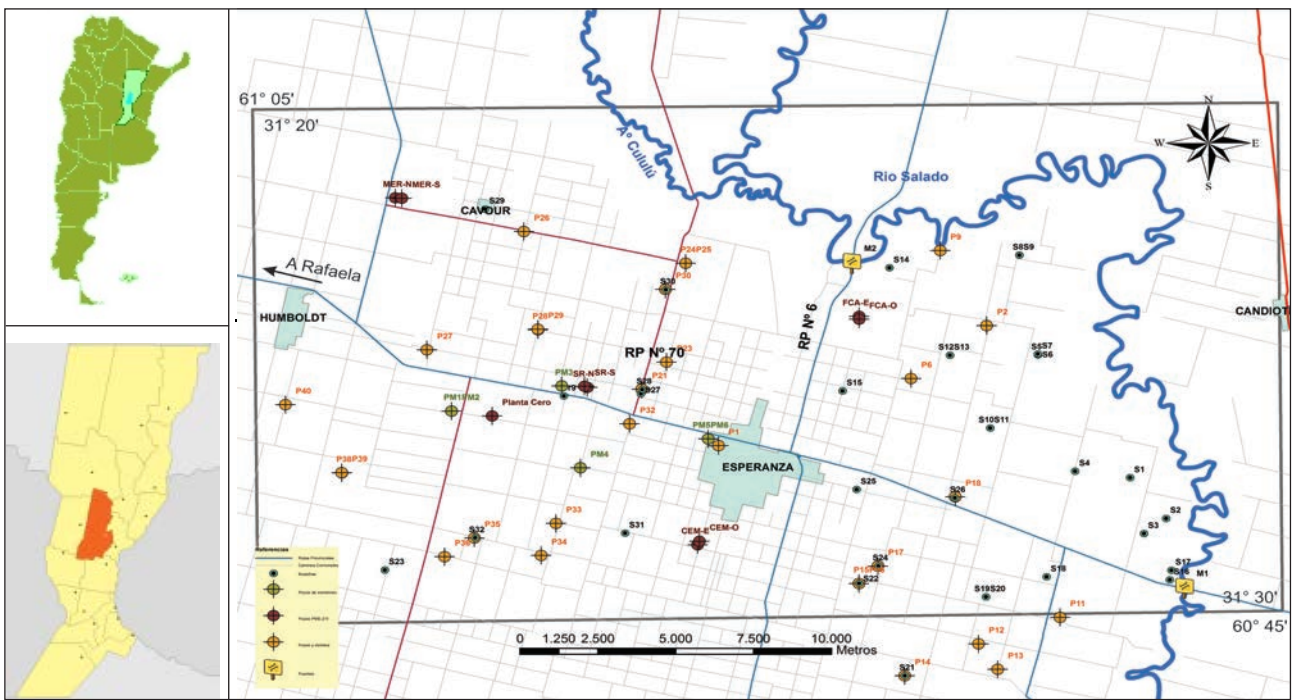


Figura 1. Ubicación del área de estudio y puntos de observación

El comportamiento hidráulico es de tipo multiunidad. Los parámetros hidráulicos formacionales de las Unidades Hidrogeológicas informados en estudios

previos (Fili et al, 1999; Tujchneider et al, 2005) se presentan en la Tabla 1.

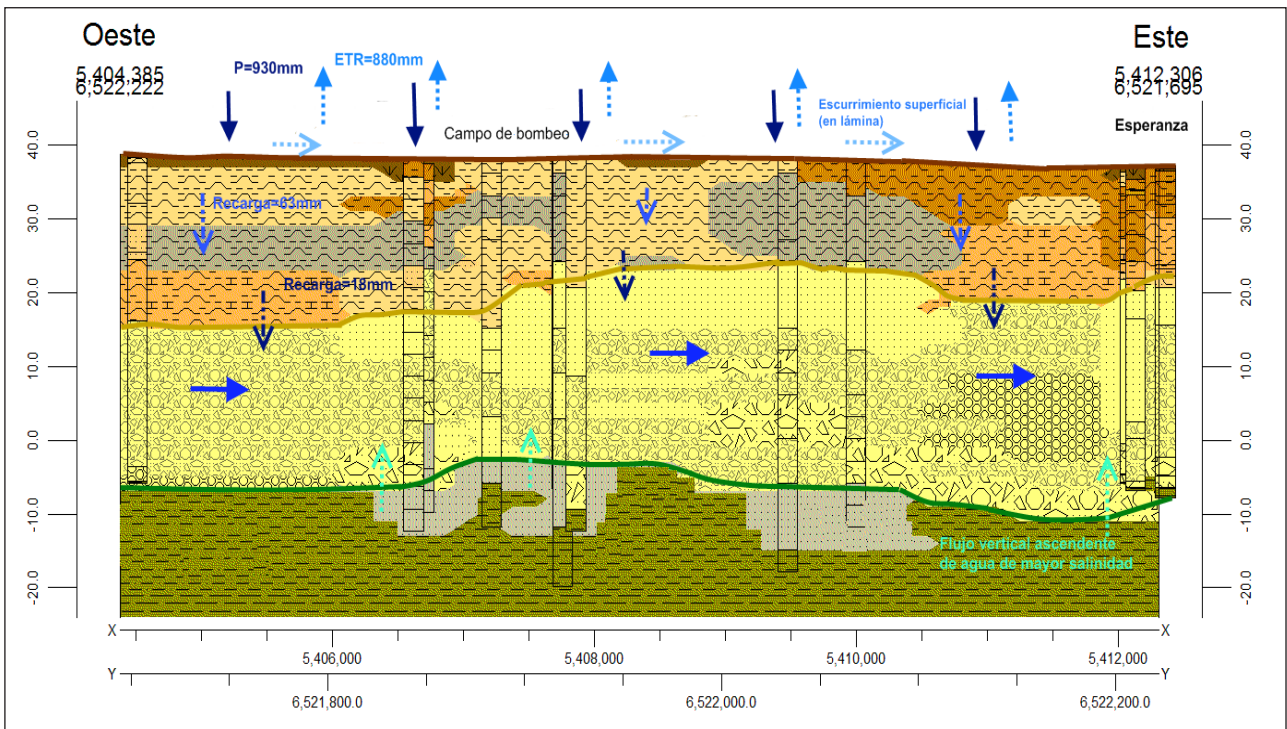


Figura 2. Modelo conceptual de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo (Fili et al, 1999; Paris, 2010)

El acuífero libre es recargado localmente por las precipitaciones, mientras que el acuífero semiconfinado recibe recarga local proveniente del acuífero libre suprayacente y recarga regional (D'Elia et al, 2005). Ambos acuíferos poseen un flujo regional de agua subterránea con dirección oeste-

este y descarga en el río Salado; particularmente el acuífero semiconfinado descarga además en el valle del río Paraná. Cabe destacar que no se conoce exactamente el límite oeste del acuífero semiconfinado, como así tampoco las áreas ni los volúmenes de recarga al mismo.



Tabla 1. Parámetros hidráulicos formacionales

Unidad Hidrogeológica	T (m <sup>2</sup> /día)	S	K <sub>h</sub> (m/día)	K <sub>v</sub> (m/día)
Pampeano	150	0.05	10	5
Acuitardo	1.5*10 <sup>-2</sup>	0.006	5*10 <sup>-3</sup>	5*10 <sup>-3</sup>
Arenas Puelches	600-950	10 <sup>-4</sup>	30	30

Existen flujos descendentes y ascendentes a través del acuitardo, en función de las relaciones hidráulicas entre los acuíferos, por lo que la extracción de agua del acuífero semiconfinado induce la recarga desde el acuífero libre y la afluencia lateral desde áreas circundantes del propio acuífero. Estimaciones recientes indican que el aporte del acuífero libre a través del acuitardo es del orden de 8 mm/año lo que representa 4,2 hm<sup>3</sup> anuales (D'Elia, 2013).

Fedele (2013) estimó la descarga del acuífero en el río Salado por medio de la descomposición de hidrogramas entre la sección RPN°6 y la estación hidrométrica Recreo RPN°70, ubicada aguas abajo de la sección RPN°6. Determinó que el caudal base promedio en la sección RPN°6 es del orden del 30% del caudal base promedio en la estación hidrométrica Recreo RPN°70.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

La información hidrometeorológica disponible consistió en registros diarios de precipitaciones de la estación pluviométrica Esperanza de la Dirección General de Comunicaciones de la Provincia de Santa Fe y registros diarios de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento para la estación meteorológica automática de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la UNL, Esperanza; para el período 2002-2011.

Los parámetros capacidad de campo y punto de marchitez permanente correspondientes al suelo argudol típico se obtuvieron por pruebas de laboratorio y ecuación de retención hídrica realizados en estudios previos, con los que se adoptó un valor de agua útil de 188 mm. La condición hidrológica de los suelos del área se estableció en estudios previos (D'Elia et al, 2002) y Pusineri & Arbuet en: D'Elia (2013) distinguieron los usos del suelo por medio del procesamiento de la Imagen Landsat 7TM Path Row 22782 del 28-03-2011.

Los registros de niveles de agua subterránea con los que se trabajó corresponden a 14 pozos de monitoreo: PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, SRE-N, SRE-S, MER-N, MER-S, FCA-E, FCA-O, CEM-E y CEM-O. En los 6 primeros se realizaron mediciones manuales de profundidad del agua subterránea con sonda Solinst Modelo 101. En los 8 últimos se instalaron registradores continuos de nivel de agua subterránea por transducción de presión Global Water WL 16 Level Logger. La profundidad de los pozos PM1, PM5, SRE-S, MER-S, FCA-O y CEM-O varía entre 10 y 20 m, por lo que se

obtuvo información correspondiente a la primera capa acuífera alojada en la Formación Pampa. Los pozos de monitoreo PM2, PM3, PM4, PM6, SRE-N, MER-N, FCA-E y CEM-E tienen una profundidad que varía entre 30 y 40 m y la información obtenida es representativa del segundo nivel acuífero alojado en la Formación Ituzaingó. El período y paso de tiempo de los registros de niveles de agua subterránea obtenidos de los pozos de monitoreo se presentan en la Tabla 2.

Se realizaron determinaciones de Cl<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de agua subterránea colectada en los pozos de monitoreo PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, para distintas fechas en el período 2003-2005 por el laboratorio de la empresa concesionaria de servicios sanitarios en ese momento (actualmente ASSA). Se consideraron las concentraciones de Cl<sup>-</sup> de las muestras de agua de lluvia colectadas en la estación meteorológica de la FICH-UNL, Santa Fe, para el período 2000-2006 (D'Elia et al, 2008) y se completó esta información con determinaciones de Cl<sup>-</sup> de las muestras de agua de lluvia de la misma estación, colectadas en el período 2007-2011 y analizadas en el Laboratorio de Química Ambiental (LQA) de la FICH-UNL.

Durante los meses de marzo y abril de 2011, se realizó un censo de pozos, perforaciones y molinos en el área de estudio. En 38 sitios se midieron manualmente profundidades de nivel de agua subterránea y en 33 se determinaron in-situ temperatura, pH, CE y se tomaron muestras de agua subterránea. En el LQA-FICH-UNL se determinaron Cl<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. En noviembre de 2012 se realizó otro censo de pozos en los que se midieron niveles de agua subterránea en 24 de los pozos censados en marzo-abril de 2011 y en 10 nuevos pozos ubicados en la margen izquierda del río Salado.

El trazado de las curvas isofreáticas se realizó en una primera instancia a mano alzada y luego utilizando el software Surfer 8.05 (©2004 Golden Software).

El Centro de Informaciones Meteorológicas de la FICH-UNL proporcionó la serie de caudales medios diarios (Q<sub>md</sub>) del río Salado en la estación hidrométrica Recreo RPN°70 para el período 1994-2012, con la que se realizó un análisis estadístico univariado. Se adoptó un valor de Q<sub>md</sub> para esta estación hidrométrica para el período octubre-noviembre 2008, como representativo del flujo base, ya que corresponde a un período de aguas bajas, inicio de una época de sequía extrema en la llanura pampeana. Con ese valor se estimó Q<sub>md</sub> para la sección RPN°6 teniendo en cuenta el porcentaje obtenido de estudios previos (Fedele, 2013) y se obtuvo el flujo base entre ambas estaciones (descarga del acuífero) por diferencia.

**Tabla 2.** Registros de niveles de agua subterránea.

Pozo	Fecha/Período de registro	Paso de tiempo
PM1, PM2, PM3, PM4	09/2002, 04-09-10-12/2003, 04-09/2004, 05/2005, 04-06/2006	
PM5	08/2002-08/2011	d/s
PM6	08/2002-08/2011	d/s
SRE-N	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2010	h/d
SRE-S	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
MER-N	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
MER-S	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
FCA-E	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
FCA-O	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
CEM-E	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d
CEM-O	08/2007-10/2008 y 06/2009-04/2011	h/d

d: diario; s: semanal; h: horario

Se realizaron muestreos de fauna subterránea en noviembre de 2011 y septiembre de 2012. En el primero de ellos se muestrearon 4 pozos de entre 10 y 15 m de profundidad que captan agua del primer nivel acuífero: S12, S13 y S27 corresponden a dos tambos y S33 a una granja de cría de pollos. En el segundo, se muestrearon 3 pozos de explotación de ASSA que captan agua del segundo nivel acuífero (P3, P30, P34) y un pozo de abastecimiento del Campo Experimental FCA de aproximadamente 15 m que extrae agua del primer nivel acuífero. Estos muestreos se realizaron filtrando entre 500 y 800 litros de agua bombeada de los pozos a través de una malla de 25  $\mu\text{m}$  de apertura y el volumen filtrado fue concentrado a 100  $\text{cm}^3$ . Los análisis de la fauna subterránea se realizaron en el Laboratorio de Plancton del Instituto Nacional de Limnología (INALI-UNL-CONICET). Dada la escasez de organismos, se analizó bajo microscopio el total de la muestra. En todos los casos se determinaron parámetros in situ como temperatura, pH, CE y OD y  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en el LQA-FICH-UNL.

Todos los puntos de observación se georreferenciaron y acotaron con GPS Diferencial Geodésico RTK Leica 1200. En la Figura 1 se presenta la ubicación de los mismos.

### 3.1. Métodos de estimación de recarga utilizados

Para la evaluación de la recarga al acuífero libre se consideró el período 2002-2011 y se utilizaron tres metodologías: balance de agua a nivel de suelo, fluctuaciones de niveles freáticos (Healy & Cook, 2002) y balance de masas de cloruros (Custodio & Llamas, 1983).

Para aplicar la primera metodología, se estimó la evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Thornthwaite & Mather (1955) y por el método de FAO Penman-Monteith (FAO, 2006), este último utilizando el software CROPWAT 8.0 para Windows

(© FAO, 2009). El escurrimiento superficial (ESC) se estimó por el método del Número de Curva (U.S. Soil Conservation Service, 1966).

En la aplicación del método de las fluctuaciones de los niveles freáticos se utilizaron valores de coeficiente de almacenamiento  $S=0,05$ , informado en estudios previos (Fili et al, 1999; Tujchneider et al, 2005) y  $S= 0,021$  que surge del análisis de las curvas de agotamiento de los niveles freáticos (D'Elia, 2013).

Para este estudio, se utilizaron ambos métodos con un paso de tiempo diario y mensual que luego se integró mensual y anualmente.

Para el planteo del balance de cloruros, se calculó la concentración promedio de  $\text{Cl}^-$  de la precipitación con los datos existentes para el período 2000-2012. Se consideró que la concentración de  $\text{Cl}^-$  del ESC era la misma que la de la precipitación y se estimó la concentración promedio de  $\text{Cl}^-$  del agua subterránea sin tener en cuenta la correspondiente a las muestras de agua que presentaron concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  superiores a 15mg/L, ya que esto podría sugerir un inicio de contaminación y una afectación en los valores naturales de distintos elementos en el agua subterránea. Finalmente se compararon los resultados obtenidos por las diferentes metodologías.

Se contó la Encuesta Ganadera por Localidad del Departamento Las Colonias del período 07/2012-06/2013 (IPEC, 2013) para estimar las demandas de agua para ganado y con estudios de Perez et al. (2014) para estimar los volúmenes de agua extraídos del acuífero para abastecimiento de las localidades del área.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis de las precipitaciones

Del análisis de las precipitaciones para el período 2002-2011, surge que la precipitación media anual resultó 1167mm y que se presentaron años húmedos:

2002-2003, 2004-2005 y 2006-2007, años secos: 2007-2008 y 2008-2009 y años típicos: 2003-2004, 2005-2006, 2009-2010 y 2010-2011. Las mayores precipitaciones medias mensuales se registraron en los meses de noviembre, diciembre, febrero, marzo y abril (superiores a 100mm) y las menores durante los meses de mayo, junio, julio y agosto (inferiores a 30mm).

**4.2. Análisis espacio-temporal de los niveles de agua subterránea**

Las curvas isofreáticas para marzo-abril de 2011 se obtuvieron considerando una interpolación por kriging y un modelo de variograma lineal sin

pepita y se trazaron con una equidistancia de 2,5 m (Figura 3). Los niveles freáticos se encontraron entre 44 y aproximadamente 13 m de cota IGN, con un gradiente de la superficie potenciométrica del orden del 1‰ en las áreas planas y de 2‰ en las cercanías del río Salado. El diseño de las curvas equipotenciales se muestra aproximadamente paralelo, con orientación norte-sur, por lo que el escurrimiento subterráneo muestra una dirección predominante oeste-este, corroborando la descarga en el río Salado. (D’Elia, 2013). Se observó que para el mes de noviembre de 2012 la configuración de las curvas isofreáticas era similar a la de 2011 y que el río Salado recibió aporte subterráneo desde ambas márgenes (Fedele, 2013).

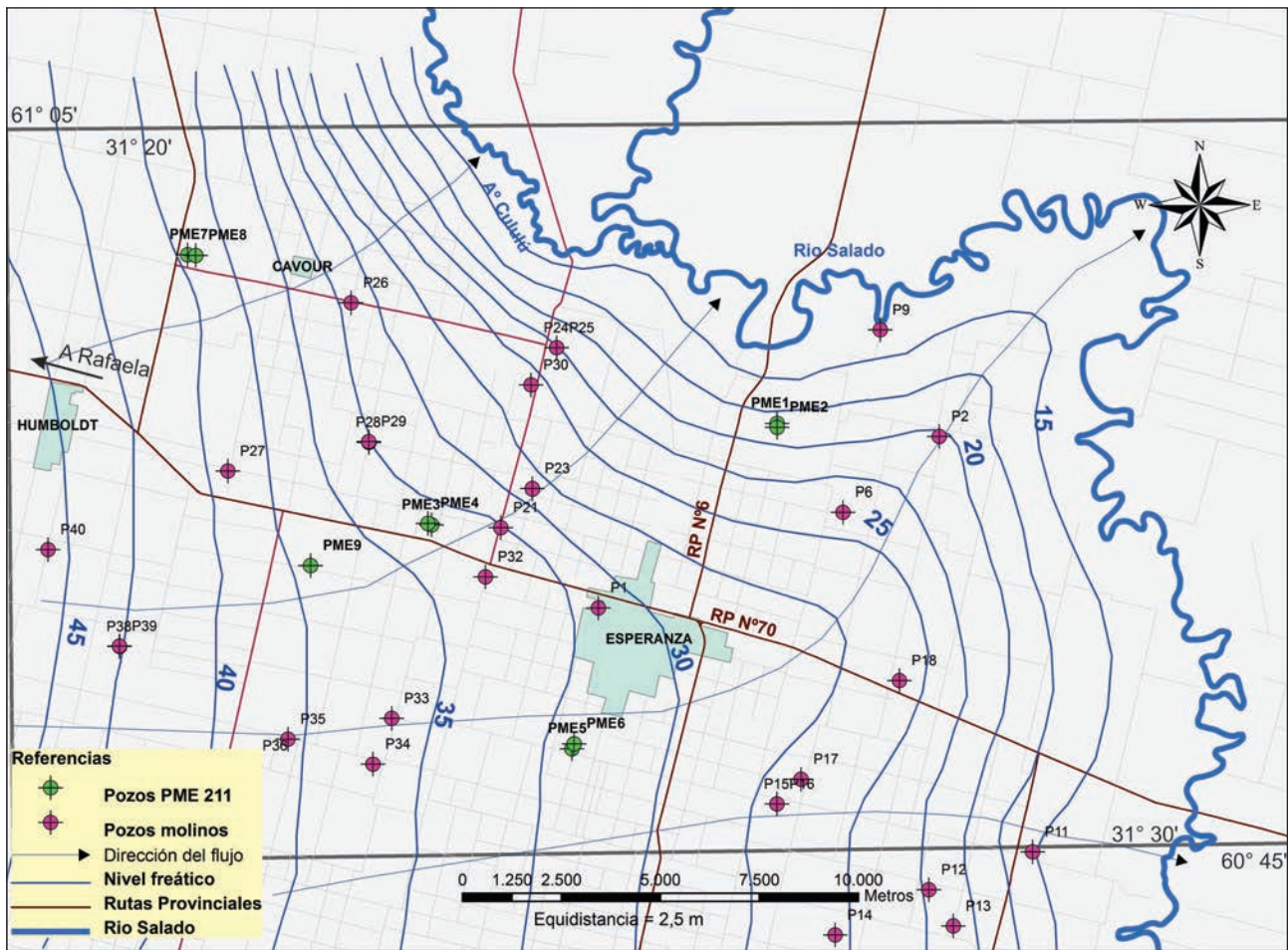


Figura 3. Curvas isofreáticas marzo-abril 2011.

Se evidenció un comportamiento similar en las fluctuaciones de los niveles de los acuíferos libre y semiconfinado con ciclos bianuales y trianuales de oscilaciones piezométricas correspondientes a los períodos: 10/2002-10/2004; 11/2004-07/2006; 08/2006-10/2009 y 11/2009-08/2011. Las variaciones de niveles freáticos son del orden de los 10 m en términos absolutos y el retardo en la respuesta del acuífero libre a las entradas por precipitación es de aproximadamente 1 mes, corroborado por el

resultado del análisis entre las series de P-P<sub>m</sub>acum y las variaciones de los niveles freáticos (D’Elia, 2013). Para la evaluación de la recarga a la primera capa acuífera se consideraron las variaciones de niveles registradas en el pozo de monitoreo PM5 debido a que posee un período de registro más extenso (2002-2011). La variación de estos niveles, conjuntamente con las precipitaciones mensuales se observan en la Figura 4.



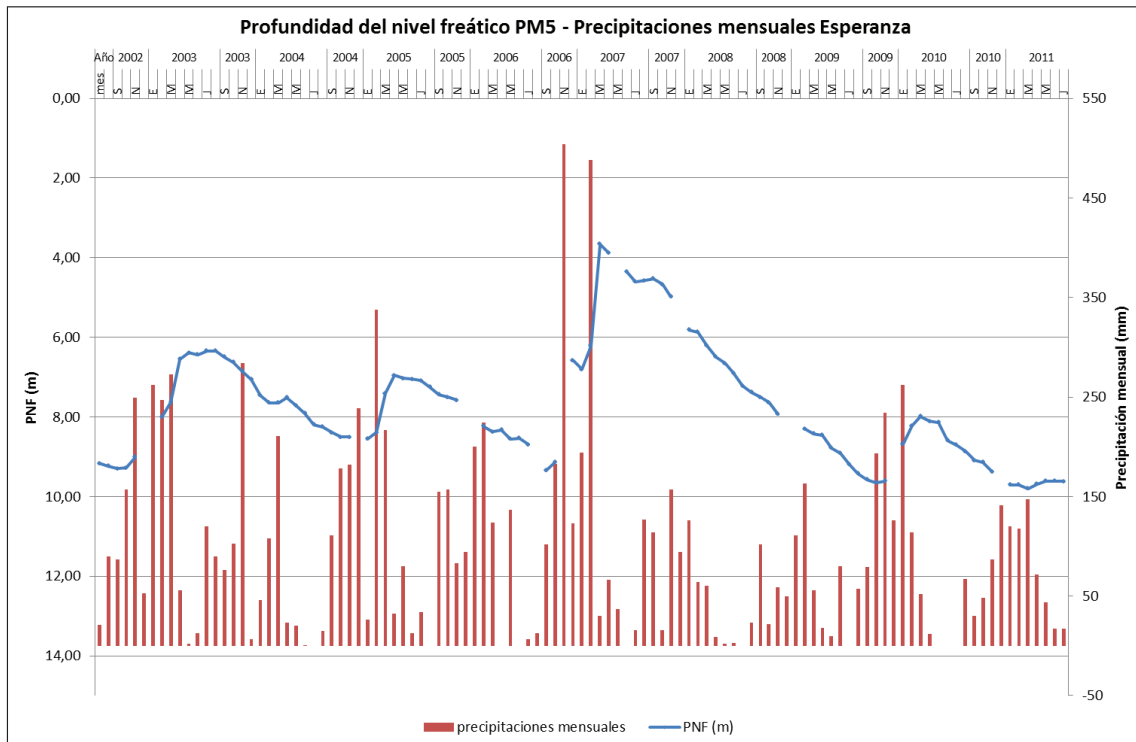


Figura 4. Niveles de agua subterránea vs precipitaciones mensuales

### 4.3. Estimación de la recarga

#### Balance de agua

Los resultados del balance de agua realizado utilizando la metodología de Thornthwaite para la estimación de la ETP y el método de Número de Curva para la estimación ESC, indican que en el período de análisis se produjeron 12 eventos de recarga de 1 a 4 meses de duración, con láminas de recarga de 7 a más de 175 mm. Si se considera la estimación de ETP por el método de FAO Penman-

Monteith y el método de Número de Curva para la estimación ESC, los eventos de recarga fueron 8, todos ellos de un mes de duración y con montos de 3 a 200 mm (Figura 5).

En términos medios anuales la recarga en tránsito resultó 101,9mm (con ETP estimada por Thornthwaite) y 47,6 mm (con ETP estimada por FAO Penman-Monteith) (Tabla 3), lo que representarían volúmenes de agua de 51 hm<sup>3</sup> y 24 hm<sup>3</sup> respectivamente. EXC representa el exceso hídrico anual resultante del balance de agua realizado.

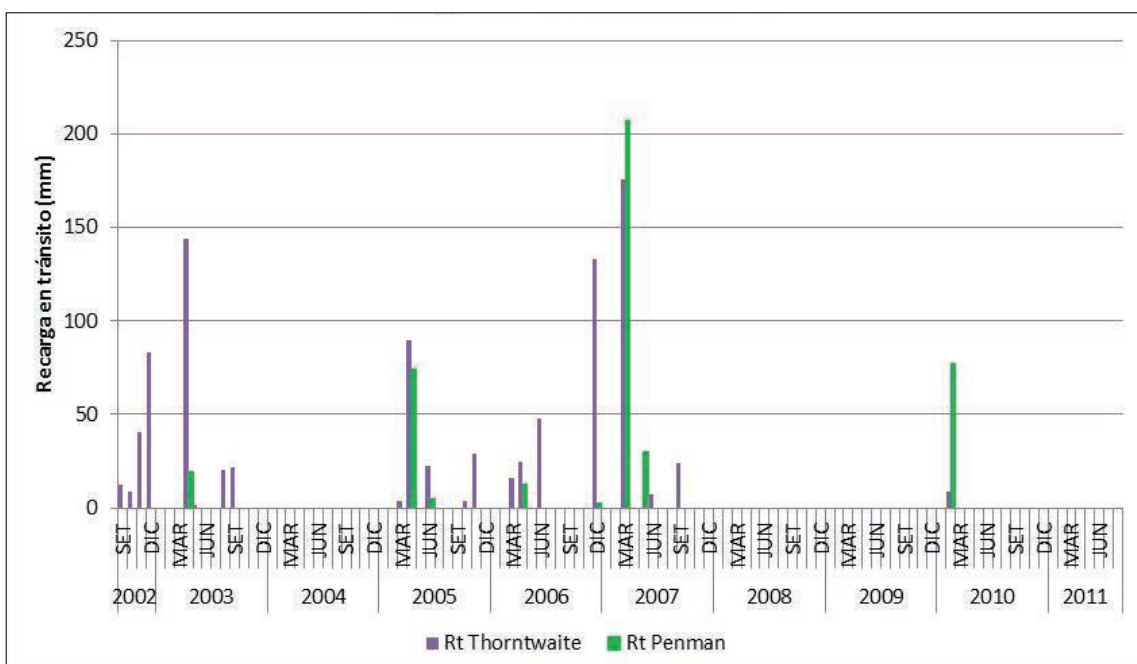


Figura 5. Recarga en tránsito estimada

**Tabla 3.** Resultados del balance de agua y recarga en tránsito en términos anuales y promedios anuales

Método de estimación de ETP	Año	P anual (mm)	EXC (mm)	ESC (mm)	Rt (mm)	% P
Thornthwaite	2002-2003	1.627,0	615,5	305,1	310,5	19,1
	2003-2004	969,0	166,9	144,9	21,9	2,3
	2004-2005	14.65,0	336,1	219,7	116,4	7,9
	2005-2006	1.181,0	280,4	159,3	121,1	10,3
	2006-2007	1.756,0	771,0	455,9	315,1	17,9
	2007-2008	772,0	73,8	50,2	23,6	3,1
	2008-2009	694,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2009-2010	1.129,0	52,0	43,3	8,7	0,8
	2010-2011	853,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Promedio	1.160,7	255,1	153,2	101,9	
FAO Penman-Monteith	2002-2003	1.627,0	93,9	74,6	19,4	1,2
	2003-2004	969,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2004-2005	1.465,0	149,6	70,6	79,0	5,4
	2005-2006	1.181,0	42,2	29,5	12,7	1,1
	2006-2007	1.756,0	663,9	423,8	240,1	13,7
	2007-2008	772,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2008-2009	694,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2009-2010	1.129,0	120,1	43,3	76,7	6,8
	2010-2011	853,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Promedio	1.160,7	118,9	71,3	47,6	

#### Fluctuaciones de niveles

Para la aplicación de este método se decidió utilizar la serie de niveles freáticos del pozo PM5 ya que era la serie más extensa y considerada representativa del comportamiento de los niveles freáticos del área. Se completaron los datos faltantes de esta serie con valores obtenidos de un análisis estadístico de correlación entre ésta y la serie de diferencias acumuladas entre la precipitación y la precipitación media de toda la serie ( $P - P_m$  acum), así como con las series de profundidad de niveles de agua subterránea de otros pozos de monitoreo (D'Elia, 2013).

Como resultado de la aplicación de esta metodología se presentaron 13 eventos de recarga que varían entre 1 y 4 meses de duración, con láminas de 4 a 75 mm si se considera un  $S=0,021$  y de 9 a 175 mm si se considera  $S=0,05$  (Figura 6).

En términos medios anuales la recarga real estimada resultó 98,9 mm con  $S=0,05$  y 41,5 mm con  $S=0,021$  (Tabla 4), lo que representaría 49,5 hm<sup>3</sup> y 20,7 hm<sup>3</sup> respectivamente.

**Tabla 4.** Recarga real en términos anuales y promedios anuales

Año	Panual (mm)	R (mm) S=0,05	R (%P)	R (mm) S=0,021	R (%P)
2002-2003	1.627,0	224,2	13,8	94	5,8
2003-2004	969,0	15,2	1,6	6,4	0,7
2004-2005	1.465,0	104,6	7,1	43,9	3,0
2005-2006	1.182,0	20,1	1,7	8,4	0,7
2006-2007	1.756,0	338,2	19,3	142,1	8,1
2007-2008	772,0	22,7	2,9	9,5	1,2
2008-2009	694,0	16,8	2,4	7	1,0
2009-2010	1.129,0	122,8	10,9	51,6	4,6
2010-2011	853,0	25,6	3,0	10,7	1,2
Promedio	1160,7	98,9		41,5	

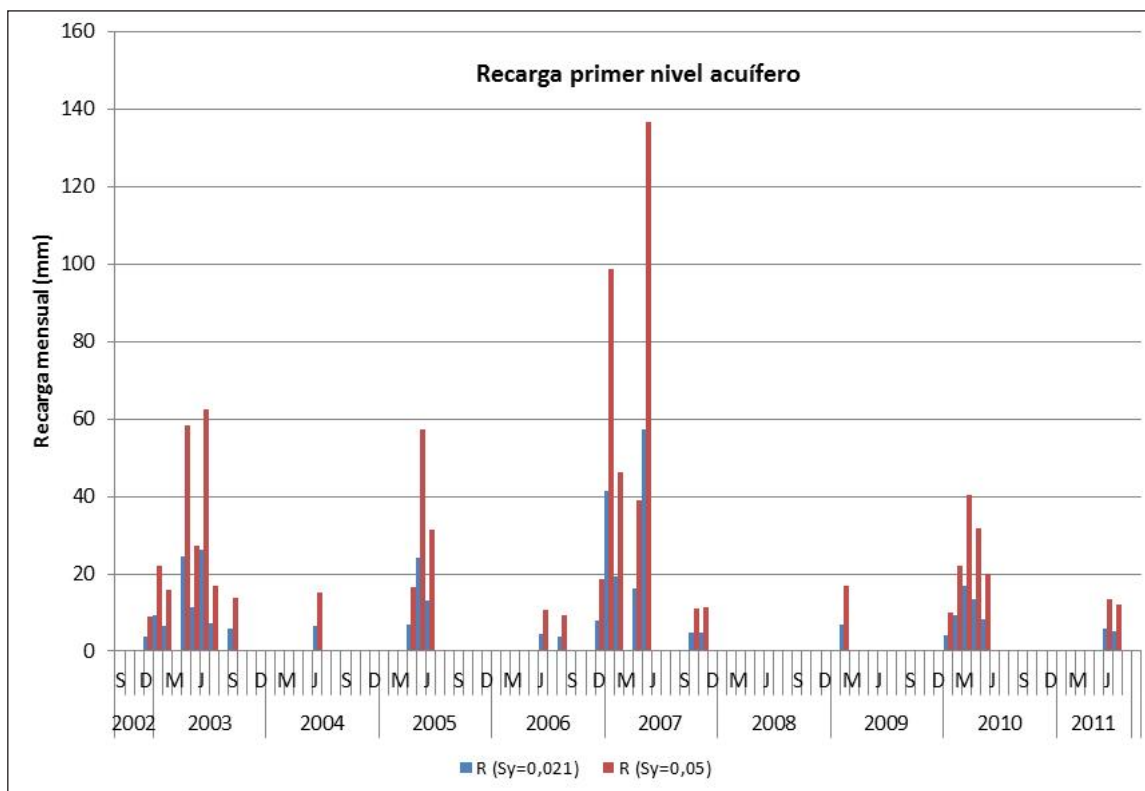


Figura 6. Recarga real estimada

**Balace de cloruros**

Como se vio anteriormente la precipitación media anual para el período de análisis resultó 1160,7 mm, se adoptó un escurrimiento superficial medio anual de 112,2 mm, la concentración media de Cl<sup>-</sup> de la precipitación resultó 0,674 mg/L y la del agua del primer nivel acuífero 19,1 mg/L. De esta manera el valor de recarga anual promedio resultó 36,8 mm lo que representaría 18,4 hm<sup>3</sup>.

**4.4. Comparación de los resultados**

Como se mencionó anteriormente, para minimizar la incertidumbre en la estimación de la recarga a los acuíferos, se sugiere que la aplicación y comparación de diferentes procedimientos metodológicos. Los valores de recarga local promedio anual estimada por los diferentes métodos para el período de análisis en el área de estudio se sintetizan en la Tabla 5.

Tabla 5. Recarga local promedio anual estimada

Método de estimación		Recarga promedio anual
Balance de agua	ETP estimada por Thornthwaite	101,9 mm=51 hm <sup>3</sup>
	ETP estimada por FAO Penman-Monteith	47,6 mm=24 hm <sup>3</sup>
Fluctuaciones de niveles	S=0,05	98,9 mm=49,5 hm <sup>3</sup>
	S=0,021	41,5 mm=20,7 hm <sup>3</sup>
Balance de cloruros		36,8 mm=18,4 hm <sup>3</sup>

Cabe recordar, que el método de balance de agua a nivel de suelo estima una recarga potencial o en tránsito, o sea la lámina de agua que sale de la zona del suelo, viaja por la zona intermedia de la zona no saturada y que puede alcanzar la zona saturada del acuífero. El método de las fluctuaciones de los niveles freáticos estima una recarga real, es decir la que realmente produce un ascenso del nivel freático, aumentando las reservas de agua subterránea.

Para este estudio, se considera que los resultados obtenidos por el método de balance de agua con

la estimación de la ETP por el método de FAO Penman-Monteith son más ajustados ya que el método tiene en cuenta los efectos de la velocidad del viento y la humedad relativa en el proceso de evapotranspiración, mientras que la estimación de ETP por el método de Thornthwaite, solo considera la temperatura.

Por otra parte, se considera que el resultado de la estimación de la recarga a los acuíferos por el método de las fluctuaciones de niveles freáticos con S=0,021, obtenido del análisis de las curvas de agotamiento



de los niveles freáticos en el área de estudio (D'Elia, 2013), es más ajustado a las características locales del sistema hidrogeológico que el valor de  $S=0,05$  de representación regional.

Finalmente la recarga estimada por el balance de cloruros representa un valor promedio anual para toda el área de estudio

En la Tabla 5 se resaltan los resultados considerados más ajustados.

**4.5. Estimación de la descarga de acuíferos**

El análisis estadístico univariado de la serie de  $Q_{md}$  que pasaron por la sección RPN°70, indica que los valores máximos y mínimos observados en el período 1994-2012, fueron de 3954 m<sup>3</sup>/s y 2,21 m<sup>3</sup>/s respectivamente, la media resultó 150 m<sup>3</sup>/s y la mediana 50,7 m<sup>3</sup>/s. Además, aproximadamente el 2% de los  $Q_{md}$  observados fueron inferiores a 6 m<sup>3</sup>/s y corresponden a los años 2000 y 2012, período que comprende el del presente estudio. Particularmente en el año 2009, año de sequía extrema en la llanura pampeana, se registraron caudales del orden de 5 m<sup>3</sup>/s. Por lo tanto, si se considera como caudal base un  $Q_{md}$  de 5 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica RPN°70, el caudal base en la sección RPN°6 resultaría 3,85 m<sup>3</sup>/s y consecuentemente, el aporte subterráneo hacia el río sería 1,15 m<sup>3</sup>/s. De este aporte subterráneo, la mitad (0,575 m<sup>3</sup>/s) provendría de la margen derecha del río Salado, lo que correspondería a un volumen anual de descarga de 18,1 hm<sup>3</sup>. Es de destacar que en este tramo el río recibe efluentes industriales durante todo el año a través de canales pluviales y tuberías cuyo caudal fue estimado en forma preliminar en 0,5 hm<sup>3</sup> por año.

**4.6. Estimación de las demanda de agua subterránea**

El acuífero libre es aprovechado por los establecimientos rurales para consumo humano,

riego y abrevado de ganado, mientras que el acuífero semiconfinado es aprovechado tanto en el ámbito rural como para consumo humano e industrial.

Según la Encuesta Ganadera por Localidad del Departamento Las Colonias del período 07/2012-06/2013 (IPEC, 2013), existen en el área de estudio 40267 cabezas de ganado vacuno, 24763 son animales para ordeñe y el resto para cría e invernada. Una primera estimación del consumo de agua del ganado arrojó un valor de 1,6 hm<sup>3</sup> anuales, considerando una dotación de 50 l/día para el animal de cría e invernada y 150 l/día para la vaca de ordeñe.

Como se mencionó anteriormente, la región se caracteriza por tener una alternancia de períodos húmedos y secos. En períodos húmedos, las precipitaciones alcanzan a cubrir los requerimientos de evapotranspiración de los principales cultivos, pero en épocas secas, el agua constituye uno de los principales limitantes para el desarrollo de los mismos y es por ello que los productores recurren a la técnica de riego suplementario con agua subterránea, para disminuir riesgos económicos. Sin embargo, no existe un registro de regantes en la región, por lo que no se cuenta con información de los volúmenes de agua subterránea utilizada para riego.

El volumen de agua extraído del acuífero semiconfinado para abastecimiento de agua de las localidades de Esperanza y Rafaela en el año 2013 fue estimado en 13,9 hm<sup>3</sup> (Perez et al, 2014)

Es conocido que los establecimientos industriales de mayor envergadura de la región, además de utilizar agua proveniente de la red de agua potable, poseen perforaciones propias, pero no se conocen los volúmenes de agua subterránea extraídos.

**4.7. Síntesis de los resultados obtenidos. Balance de agua del sistema acuífero**

Una síntesis de las entradas (oferta) y salidas (demanda) para el planteo del balance de agua se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Entradas y salidas del sistema acuífero

	Acuífero libre	Acuífero semiconfinado
<b>ENTRADAS = OFERTA</b>	recarga local= 20,7 hm <sup>3</sup>	recarga a través de la capa acuitarda= 4,2 hm <sup>3</sup>
		recarga regional= s/e
<b>SALIDAS ≈NATURAL + DEMANDA DE AGUA</b>	flujo base= 18,1 hm <sup>3</sup> menos efluentes industriales= 0,5 hm <sup>3</sup>	
	bebida ganado= 1,6 hm <sup>3</sup>	
	consumo humano rural=s/d	
	vegetación freatófita= s/e	consumo humano urbano= 13,9 hm <sup>3</sup>
		riego= s/d
industrias= s/d		

s/d= sin datos; s/e= sin estimar

Como entradas de agua al sistema acuífero (oferta) se consideraron: la recarga local al acuífero libre estimada por el método de fluctuaciones de niveles freáticos y la recarga a través de la capa acuitada hacia el acuífero semiconfinado, estimada en estudios previos. Como se mencionó anteriormente, no se conoce la recarga regional al acuífero semiconfinado.

Como salidas de agua del sistema acuífero se consideraron tanto las descargas naturales como las artificiales. Dentro de las salidas naturales se tuvieron en cuenta los requerimientos de agua de la vegetación freatófita, aunque aún no se cuenta con los resultados de estas estimaciones, y la descarga de los acuíferos libre y semiconfinado al río Salado, estimada a partir de los caudales de dos secciones del río. Se debe destacar que este volumen de descarga incluye el aporte de los efluentes industriales descargados en esa sección del río. Dentro de las salidas artificiales fueron considerados el volumen de agua extraído del acuífero semiconfinado para consumo humano en las áreas urbanas y el extraído tanto del acuífero libre como del semiconfinado para abrevado de ganado en el ámbito rural, ambos estimados previamente. Como se mencionó anteriormente no se cuenta con registros ni estadísticas oficiales de los volúmenes de agua subterránea utilizada por las industrias de la zona, para irrigación de los cultivos y para consumo

humano en el área rural, por lo que su estimación sería aventurada.

#### 4.8. Identificación de ecosistemas dependientes del agua subterránea

Como resultado del primer muestreo de fauna subterránea, se registró la presencia de dos especies de Rotífera Monogononta (*Lecane bulla* y *Brachionus havanensis*), una de Cladocera Anomopoda (*Chydorus nitiludus*) y larvas de copépodos del estadio de copepoditos pertenecientes a especies no identificadas de los órdenes Cyclopoida y Harpacticoida. También se hallaron ejemplares de Acari Oribatida y un insecto Tysanura aunque la presencia de este último se considera podría ser consecuencia de la contaminación de la muestra. En una muestra se hallaron varios organismos de forma ovalada que se presume podrían ser protozoos contraídos o huevos de algún invertebrado no determinado. Cabe señalar que prácticamente todo el material hallado fue muy escaso, estando representado por un solo ejemplar de cada taxón identificado, aunque en el caso de los presuntos protozoos contraídos se hallaron 18 ejemplares en el volumen total de la muestra (Figura 7). En las muestras obtenidas del segundo muestreo no se encontraron organismos.

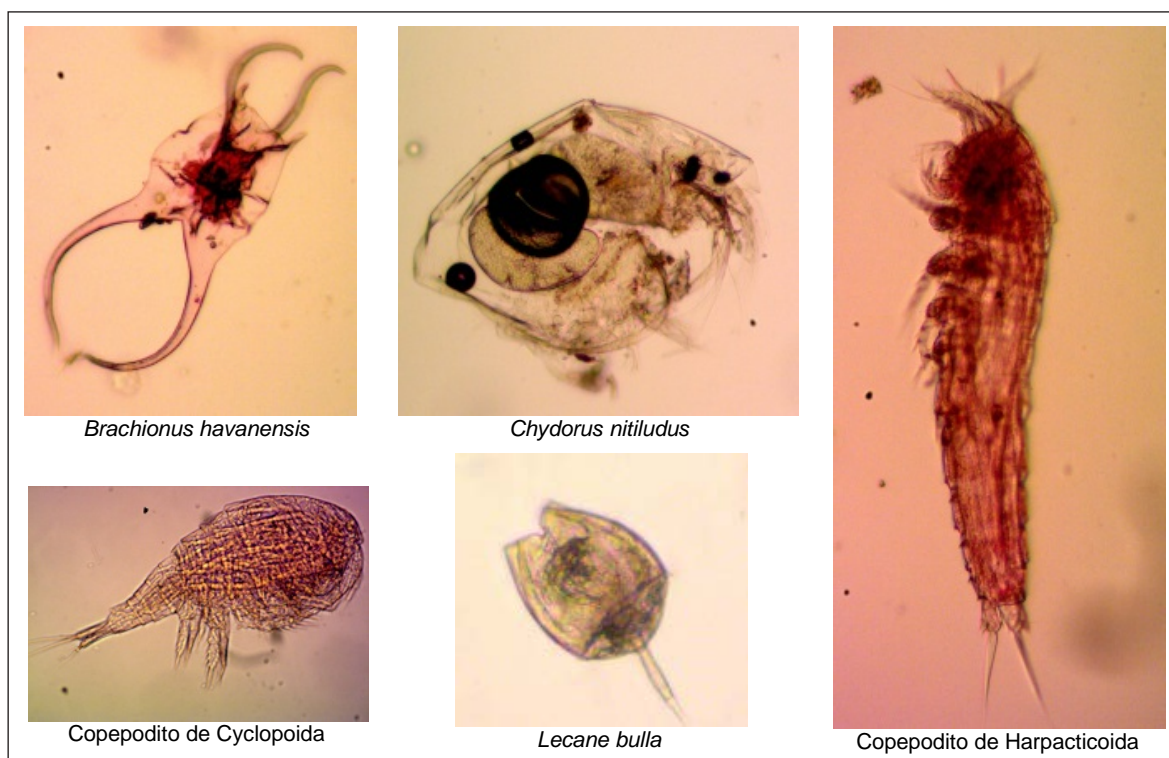


Figura 7. Organismos presentes en el agua subterránea

Finalmente, es de destacar que en el marco de proyectos de investigación del grupo al que pertenecen los autores de este trabajo, se están desarrollando estudios para analizar imágenes satelitales del año

2009, que corresponde a un período muy seco, de manera de distinguir los sectores que por su verdor se corresponderían con áreas irrigadas o con áreas con presencia de vegetación freatófita.

## 5. CONCLUSIONES

A simple vista, formular un balance de agua en un sistema hídrico parece una tarea sencilla. Sin embargo, es cierto que sólo algunos componentes de este balance como la precipitación y caudales de salida de una cuenca, pueden medirse y los otros deben ser estimados. Muchas veces no se dispone de mediciones suficientes y confiables y las estimaciones introducen incertidumbres. A pesar de ello es fundamental encarar investigaciones y avanzar en el conocimiento de los sistemas hídricos. En particular, el comportamiento de los sistemas hídricos subterráneos no es tan visible y es tarea de los hidrogeólogos visibilizarlos para poder gestionarlos.

En relación con la recarga al acuífero libre, se puede decir que el método de las fluctuaciones de los niveles freáticos proporciona una estimación de la recarga real, pues el ascenso del nivel freático se produce por la llegada de agua de recarga. Sin embargo, su confiabilidad está dada por la correcta selección del coeficiente de almacenamiento, que precisamente es un parámetro hidráulico formacional muy variable.

La recarga estimada por el método de balance de agua en la zona de evapotranspiración de las plantas, es una recarga potencial, representa el agua que sale de la zona del suelo pero que puede no alcanzar el acuífero; además requiere de la estimación de varias variables y parámetros, lo que introduce aún más incertidumbres. Finalmente el balance de cloruros proporciona una recarga promedio anual para un área determinada y es probable que se requiera mayor información distribuida en el espacio y tiempo.

Por ello se ha considerado como más ajustado el resultado obtenido por el método de fluctuaciones de los niveles freáticos con la consideración del valor de coeficiente de almacenamiento más representativo de las características hidrogeológicas locales. La utilización de las metodologías de balance de agua y balance de cloruros ha contribuido a corroborar la estimación de recarga realizada por el método de fluctuaciones de los niveles freáticos.

La descarga de los acuíferos ha sido estimada como el volumen de agua correspondiente al flujo base del río Salado en un tramo del mismo, considerando los caudales medios diarios de un período de aguas bajas (época de sequía).

En zonas rurales resulta difícil establecer con certeza qué volúmenes de agua son extraídos del acuífero libre y del acuífero semiconfinado para consumo humano y animal. Si bien el aprovechamiento del acuífero semiconfinado para agua potable es conocido, no se han podido establecer el volumen de agua extraída por industrias y por los productores agropecuarios con fines de riego en épocas secas. Se continúan estudios que permitirán distinguir áreas irrigadas y con vegetación freatófita a través del procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

Finalmente, se ha identificado en forma preliminar la presencia de invertebrados en el ambiente subterráneo lo que constituye un avance sumamente importante en el conocimiento de estos ecosistemas en la región. La continuidad de las investigaciones permitirá evaluar la influencia de la litología y el uso del territorio sobre estas comunidades y eventualmente ser consideradas indicadores del estado del sistema hídrico subterráneo.

Se considera que los resultados obtenidos constituyen el punto de partida del diagnóstico que integra un plan de gestión del agua en el área de estudio, al cuantificar la oferta y demanda de agua contemplando a los ecosistemas y atendiendo al logro de la seguridad hídrica.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dra. Ofelia Tujchneider por sus valiosos aportes, las Ing. Evangelina Fornari y Ana Laura Fedele por su colaboración en las tareas de campo; a las Ings. María Lina Pagliano y Lucía Virgilio por la realización de las determinaciones en laboratorio y a los Dres. Juan Paggi, Susana José de Paggi, Mónica Blarasín y Laura Tione por la realización de los muestreos y análisis de fauna subterránea.

## 7. REFERENCIAS

- Blarasín, M., Bedano, M., Tione, L. & Cabrera, A. 2007. Caracterización de un acuífero loésico e identificación preliminar de microinvertebrados: ecosistema y consideraciones ambientales. V Congreso Argentino de Hidrogeología. Actas: 409-421.
- Cook, P., Jolly, I., Walker, G. & Robinson, N. 2002. From Drainage to Recharge to Discharge: some time lags in Subsurface Hydrology. Preprint from Dubai International Conference on Water Resources and Integrated Management in the Third Millennium, Dubai, UAE, Feb. 2002, 23.
- Custodio, E. 1998. Recarga de los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero de España. Vol. 109-4: 329-346.
- Custodio E. & Llamas M.R. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Tomo I. 2350pp.
- D'Elia, M., Pusineri, G. & Marano, R. 2002. CN parameter estimation using remote sensing and geographic information system. 29<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment. Versión CD. Buenos Aires.
- D'Elia, M., Tujchneider, O., Paris, M., Pérez, M. & Aravena, R. 2005. Técnicas isotópicas en la caracterización de sistemas de flujo subterráneo



- en Esperanza y Paraná, Argentina. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. Vol.5: 31-38.
- D'Elia M., Tujchneider O., Paris M., y Perez M. & Gervasio S. 2008. Groundwater recharge assessment using environmental tracing methods. 5th International Conference on Tracers and Tracing Methods-Tracer 5. Tiradentes, Brasil Noviembre de 2008.
- D'Elia, M. 2013. Sistemas geohidrológicos en áreas de llanura. Identificación de mecanismos y cuantificación de recarga a los acuíferos. Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas (Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto). 251pp.
- FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje. 298pp.
- Fedele A.L., 2013. Descarga de acuíferos en áreas de llanura. Informe Final Científica Universidad Nacional del Litoral. 45. Inédito
- Fili, M., Tujchneider, O., Perez, M., Paris, M. & D'Elia M. 1999. Estudio del sistema de aguas subterráneas en el área de Esperanza-Humboldt y zona de influencia. Servicio Especializado de Asistencia Técnica. Convenio Aguas Provinciales de Santa Fe y Universidad Nacional del Litoral. Informe Final.
- Healey, R. & Cook, P. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* Vol 10 Number 1: 91-109.
- IPEC, 2013. Encuesta Ganadera 2013. En: <http://www.santafe.gov.ar/index.php/web/guia/estadistica>
- Lerner, D., Issar, A. & Simmers, I. 1990. Groundwater Recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. Heinz Heise, International Contributions to Hydrogeology, Vol 8: 345.
- Panigatti, J. 1986. Consideraciones sobre el clima del centro-oeste de la provincia de Santa Fe. EEA INTA Rafaela. Bol. Int. Divulgaciones. Nro. 15: 29.
- Paris M. 2010. Métodos estadísticos multivariados aplicados en Hidrología Subterránea. Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas (Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto): 173.
- Perez M., Tujchneider, O., Paris, M. & D'Elia, M. 2014. Sustainability indicators of groundwater resources in the central area of Santa Fe province, Argentina. *Environmental Earth Sciences*. DOI 10.1007/s12665-014-3181-1.
- Samper, F. J. 1997. Evaluación de la recarga por lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero de España*. Vol. 109-4: 347-370.
- Scanlon, B., Healy, R. & Cook, P. 2002. Choosing appropriate techniques to quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. Vol. 10, Number 1: 18-39.
- Sharma, M. 1989. Groundwater Recharge. *Proceedings of the Symposium on Groundwater Recharge* (ed.) Rotterdam: Balkema: 323.
- Simmers, I. 1998. Groundwater recharge: an overview of estimation `problems´ and recent developments. In: Robins N.S. (ed.) *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*. Geological Society, London, Especial Publication, 130: 1-5.
- Sophocleous, M. 1997. Managing Water Resources Systems: Why "safe yield is not sustainable. *Groundwater*. Vol 35 (6), pp. 561.
- Thorntwaite, C. & Mather, J. 1955. The Water Balance. *Publications in Climatology*. Volume VIII. Number 1. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. Centerton, New Jersey: 104.
- Tujchneider, O., Paris, M., Perez, M. & D'Elia, M. 2005. Singularidad constitutiva de sistemas geohidrológicos de llanura y la gestión de los recursos hídricos subterráneos. *Revista latinoamericana de Hidrogeología*. Vol.5: 117-121.
- U.S. Soil Conservation Service, 1966. Diseño de presas pequeñas. Bureau of Reclamation: 639.
- Walker, G., Cook, P. & Gilfedder M. 2001. Recharge/ Discharge determination. *Australian Groundwater School. Fundamentals of groundwater sciences, technology and management*. Vol.2 – Technology. Centre for Groundwater Studies: 377-412.

**ARUBA'S DESALINATION'S KNOWLEDGE AND EXPERIENCE:  
CONQUERING THE SEA TOWARD DESALINATION'S SUSTAINABILITY**

**CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA DE LA DESALINIZACIÓN EN ARUBA:  
CONQUISTA DEL MAR HACIA LA SOSTENIBILIDAD DE LA DESALINIZACIÓN**

Marchena, Filomeno A.<sup>1</sup>; Halman, Johannes I. M.<sup>2</sup>

**Abstract**

The semi-arid island of Aruba has earned throughout its desalination history an excellent reputation for the efficient commercial application of the costly seawater desalination technology. Reliable drinking water production and distribution is of imminent importance for the population, the island economy, industry, and in particular, for the tourism industry. But, seawater desalination is very susceptible to many operational problems hampering stable and efficient water production. The primary operational problems are excessive foaming, biofouling, scaling and corrosion. In Aruba, due to sub-optimal conditioning of the drinking water, iron and copper corrosion in the distribution system has caused diminished water quality and leakages due to perforations of pipes in the distribution system. In the 1990's, following an intensive scientific research a Continuous Desalination Efficiency Improvement Process was developed to eliminate the aforementioned operational problems. This paper outlines the different state of the art chemical additives developed and applied in collaboration with the chemical supplier to achieve sustainable desalination. The application of the chemical additives resulted in practically 100% availability of the thermal desalination units and increased efficiency with 7% for both thermal and membrane production units. The iron concentration of the drinking water has been reduced to about 0.01 ppm, which is far less than the World Health Organization's target of 0.3 ppm for drinking water. Due to the optimal condition of the drinking water and the resulting reduction in corrosion and leakages, the Non-Revenue Water amounted to 2.6-4.7 percent versus 15-65 percent in the neighboring Islands in the Caribbean region. The different technical solutions discussed in this paper may be useful for many seawater desalination companies; especially in Small Island Developing States, to effectively solve ongoing operational problems and move toward sustainable operation.

**Keywords:** Seawater Desalination, Marine Biofouling, Foaming, Scaling, Desalination Sustainability.

**Resumen**

Durante su historia de desalinización, la semiárida isla de Aruba, se ha ganado una reputación excelente gracias a la eficiente aplicación comercial de la tecnología costosa de desalinización de agua de mar.

La producción y distribución confiable de agua potable es de inminente importancia para la población, la economía de la isla, la industria, y en particular, la industria turística. Pero la desalinización de agua de mar es muy sensible a muchos problemas operacionales, el cual resulta en una obstaculización de la producción estable y eficiente de agua. Los problemas operacionales primarios son: la formación excesiva de espuma, bio-incrustación, incrustaciones y corrosión. En Aruba, a causa del acondicionamiento subóptimo del agua potable, la corrosión de hierro y cobre en el sistema de distribución ha causado una calidad deteriorada del agua y fugas a causa de perforaciones de tuberías en el sistema de distribución. En los años noventa, tras una investigación científica intensiva, se desarrolló un Proceso de Mejora Continua de la Desalinización Eficiente para eliminar los problemas operacionales anteriormente mencionados. Este artículo describe lo último en los diferentes aditivos químicos desarrollados y aplicados en colaboración con el suministrador químico para conseguir desalinización sostenible. La aplicación de los aditivos químicos resultó prácticamente en un 100% de disponibilidad de las unidades térmicas de desalinización y en un incremento de eficiencia de 7% para las unidades de producción térmicas y aquellas por membranas. La concentración de hierro en el agua potable ha sido reducida a aproximadamente 0.01 ppm, el cual es mucho menos que el objetivo de 0.3 ppm para el agua potable, instituido por la Organización Mundial de la Salud. A consecuencia de la condición óptima del agua potable y de la reducción de corrosión y fugas, el Agua No Contabilizada ha llegado al 2.6-4.7 por ciento frente a un 15-65 por ciento en las islas vecinas en la región del Caribe. Las diferentes soluciones técnicas tratadas en este artículo pueden ser útiles para muchas plantas desalinizadoras; especialmente en los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo para solucionar, de una manera eficiente, los problemas operacionales en desarrollo y llegar a una operación sostenible.

**Palabras clave:** Desalinización de agua de mar, Bio-incrustación marina, Formación de Espuma, Incrustaciones, Sostenibilidad de Desalinización.

1 UNESCO Chair Sustainable Water Technology and Management, University of Curaçao. Curaçao. f.marchena@uoc.cw.

2 Chair Technology Innovation and Risk Management, University of Twente. Netherlands. J.I.M.Halman@ctw.utwente.nl

## 1. INTRODUCTION

Water is in abundance on our blue planet Earth but from the total amount of water about 97 percent is seawater and only 3 percent is fresh water suitable for human consumption (Velmurugan et al., 2007). From this total amount of fresh water 71 percent is subterranean, 27 percent is in the form of ice and only about 2 percent is present as surface water in rivers and lakes. Actually the yearly rain fall is sufficient for the whole population on Earth but unfortunately it is not uniformly distributed over the world. There are places with abundant rain fall while others have, practically the whole year long, no rain at all (Buro, 2000). The coming decades the effect of climate change may globally further enhance a detrimental impact on the emerging water shortage, especially for Small Islands Developing States (SIDS), which are particularly vulnerable to climate change. Therefore, in such arid regions with practically no natural fresh water resources the best possible solution to the water shortage problem is the use of cost effective sustainable desalination of saline water and waste water reuse (Marchena, 2013).

Seawater desalination is known worldwide as the most important technology for the production of drinking water in arid areas. Since 1860, thermal evaporation has been used as a large-scale mature technology for the production of drinking water and industrial water. Due to the high consumption of both thermal and electrical energy this technology is still an expensive process despite many innovations. A technological breakthrough in desalination cost was achieved with the development of the reverse osmosis desalination technology. This high pressure membrane technology, commercial available since the 1970's, has recently taken over the dominant role of thermal desalination. The introduction of energy recovery systems and development of new high efficiency permeable membrane materials have made this process about 70 to 75 percent more energy efficient than the thermal desalination technology (Marchena, 2013).

Desalination is now a mature commercial enterprise with desalination units surpassing 500,000 m<sup>3</sup>/day. Some state of the art desalination processes are summarized in table 1 (Kahn, 1986).

The desalination of seawater has given an enormous boost to the economic development of the semi-arid Island of Aruba which is located in the Caribbean region, only a few miles from the coast of Venezuela, South America. Aruba has developed into a prosperous island primarily due to the availability of a trustworthy production of drinking water and industrial water supporting especially the flourishing tourism industry and other industrial activities. However, seawater desalination was not always a smooth operational process; in the course of time many operational problems hampering stable fresh water production and efficiency had to be solved. For

example, excessive foaming during flash evaporation enhanced by natural surface active components in seawater, and biofilms formed by marine micro-organism on heat transfer tube surfaces, impeding efficient heat transfer. Additionally, macro organism plugging of tube inlets, reducing cooling seawater flow, were frequently experienced in the thermal evaporators as well as high temperature scale formation due to the decomposition of bicarbonates present in seawater.

**Table 1:** Commercial desalination processes

Commercial Available Desalination Technologies
<p><b>Large capacity thermal desalination processes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multi Stage Flashing (MSF)</li> <li>- Multi Effect Distillation (MED)</li> <li>- Vapor Compression (VD)</li> </ul> <p><b>Large capacity membrane desalination processes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Electro Dialysis (ED)</li> <li>- Electro Dialysis reversal (EDR)</li> <li>- Electro Deionisation (EDI)</li> </ul> <p><b>Large capacity membrane desalination processes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Electro Dialysis (ED)</li> <li>- Electro Dialysis reversal (EDR)</li> <li>- Electro Deionisation (EDI)</li> </ul>

A problem with the membrane technology is that it is very vulnerable to marine biofouling and if not addressed and solved properly the semi-permeable membranes can be permanently damaged. Effective chemical additives are therefore necessary to cope with these operational problems; without these additives stable and efficient desalination is practically impossible (Marchena, 2013).

In the early desalination years in Aruba, as in many other countries, these problems were addressed and mitigated by the trial and error method using commonly available chemicals. However, during the last decades a scientific research was performed to develop an efficiency improvement process based, primarily, on the experience and knowledge of the operation and maintenance work floor personnel.

In the context of this scientific approach, as will be explained in the next section, state of the art chemical additives were developed and successfully applied in a collaboration with the chemical supplier to mitigate excessive foaming, biofouling and scaling. Also an effective corrosion inhibition program has been developed to eliminate iron and copper corrosion in the distribution system (Post et al., 2002).

## 2. ARUBA'S EXPERIENCES IN CONTINUOUS DESALINATION EFFICIENCY IMPROVEMENT

This section outlines the technologies and techniques developed in Aruba to mitigate excessive foaming, biofouling, scaling and corrosion. It also covers the



importance of the gained desalination knowledge and experience conquering the sea toward sustainable, stable and dependable seawater desalination for the production of drinking- and industrial water. The paper will be especially enlightening in the context of a "Continuous Desalination Efficiency Improvement Process" (CDEIP) in support of other "Small Islands Developing States" (SIDS) to increase their resiliency for the supply of safe and healthy drinking water.

## 2.1 Drinking water supply in Aruba: A brief historic overview

### 2.1.1. Drinking water supply before seawater desalination

Aruba is a semi-arid island with practically no natural surface water- or subterranean fresh water resources. In the rainy seasons, rain water can be abundant but most of the water flows back to the sea through the ephemeral streams leaving the Island in scarcity of drinking water. The early inhabitants mainly Arawak natives and their descendants used surface water for their daily water supply and dug wells in search for ground water, using wooden winches and wind mills to haul up the water. Later on they built houses of clay or stones with cisterns to harvest rainwater. They also discovered and applied primitive techniques for the drinking water treatment. The juice of the cactus plant and some drops of seawater were used as a primitive additive for the coagulation and flocculation process to clarify the muddy surface water. As illustrated in figure 1, they also applied a calcite stone filter to filter out colloidal particles from the drinking water and used jars of clay to keep the water fresh and cool due to the natural evaporation process (Marchena, 2013).



Figure 1. A calcite stone filter and a jar of clay

In the period of 1900 to 1914, Aruba had its very first sustainable drinking water supply company. Groundwater was pumped, using wind mills, through a distribution pipe to the ships in the harbor and the inhabitants of Oranjestad, Aruba's Capital. Desalination of seawater was introduced in the first decades of the 20<sup>th</sup> century for the production of fresh water.

## 2.2. Seawater desalination in Aruba: thermal and membrane technology

### 2.2.1. The thermal desalination technology

From 1903 to 1916, seawater of the Spanish Lagoon was desalinated for the production of boiler water for the steam engines and for the production of fresh water for the gold extraction process at the Gold Mining Company situated at Balashi. Available groundwater was limited and salty and usage of nearby Spanish Lagoon's seawater resulted in heavy scaling and explosion of boilers (Walhain, 2005).

Commercial seawater desalination started in 1932 with the production of drinking water at the drinking water facility, "*Landswater Voorziening*" (LWV), also at Balashi. The first desalination technology applied was the "*Multi Effect Distillation*" (MED), using evaporators manufactured by the WEIR Inc. of Scotland (Birkett et al., 2002). In 1959, Aruba had for a very short period of time the largest seawater desalination facility in the world using the MED-technology. The first generation of the MED evaporators had a production capacity of 200 m<sup>3</sup>/day and a performance ratio of 1 to 2. The "*Gain Output Ratio*" (GOR), the efficiency value historically called in Aruba the "*Performance Ratio*" (PR), is defined as the ratio of the amount of distillate produced and the amount of low pressure steam consumed. In 1958, the second generation of the MED evaporators with a capacity of 2,000 m<sup>3</sup>/day and a PR of 5 to 6 were installed. At this time the name of the drinking water facility was changed to "*Water- en Energiebedrijf*" (WEB) due to the combined water and power production of this plant. For many years the MED process was the most important desalination technology at WEB, but in the 1960's it was replaced by the more reliable and operationally stable "*Multi Stage Flashing*" (MSF) technology. This technology is more suitable for up scaling to larger capacity.

In 1965, following the trend of the desalination market in the world, the first generation of a more efficient thermal desalination technology, the "*Multi Stage Flashing*" (MSF-) evaporators manufactured by "*Aqua Chem Inc.*" from the USA, was introduced. The first MSF evaporator had a production capacity of 3,000 m<sup>3</sup>/day. In 1983, the second generation of the MSF-evaporators with a capacity of 6,000 m<sup>3</sup>/day and a PR of 9 were installed, closing the MED-technology's era in Aruba.

In the 1970's, a new vertical "*Multi Stage Controlled Flash*" (MSCF) Evaporator from "*Aquanova BV*", a Dutch Hungarian design, was also installed but with mixed results. For the increase of desalination production capacity due to the rapid economic growth in Aruba in the 1990's, the decision was made to replace the existing plants with the more robust, reliable and efficient Aqua Chem MSF evaporators. From 1990 to 1997, five third generation Aqua Chem MSF evaporators with a nominal capacity of 6,000 m<sup>3</sup>/day and a PR of 10 to 11 were installed.

All of the above mentioned MSF evaporators were based on the brine recirculation technology with a "Top Brine Temperature" (TBT) of 110 °C. This technology has outrivalled the MED process because of high reliability, stable operation with optimal control of scaling, less prone to fouling and the possibility to increase production capacity. Both of these thermal technologies are based on the high energetic phase transition of evaporation and condensation. The recently dominant reverse osmosis technology, on the contrary, only needs mechanical energy to separate fresh water from seawater through a semi-permeable membrane, making it the most energy efficient technology nowadays.

### 2.2.2. The Seawater Reverse Osmosis Membrane Technology

In the period of 1983 to 1985, the membrane technology was introduced in Aruba to cope with production decay due to the aging MED plants and the poor operation of the Aquanova MSCF evaporators and to mitigate the import of fresh water. This "Sea Water Reverse Osmosis" (SWRO) plant had a capacity of 1,000 m<sup>3</sup>/day and was built with "Plate and Frame" (PF) membranes; this plant was actually the first SWRO membrane technology plant built in Aruba. The plant was operated by "Geveke BV" under a "Build Own and Operate" (BOO) contract.

In 2008, a two pass SWRO plant manufactured by "GE Water & Process Technology" (GE WPT) with a nominal capacity rating 8,000 m<sup>3</sup>/day was installed for the production of drinking water. The second two pass SWRO plant was installed in 2012. This production unit was manufactured by "Veolia Water Services" (VWS) with a 25,500 m<sup>3</sup>/day nominal capacity. In 2015, a mobile 12,000 m<sup>3</sup>/day SWRO plant manufactured and operated by GE WPT went in operation. With the installation, in 2015, of the new "Electro Deionization" (EDI) membrane technology plant, with a capacity of 4,500 m<sup>3</sup>/day for the production of very pure water for industrial purposes, the supremacy of thermal desalination came to an end in Aruba after more than eighty years of successful application.

In conclusion, seawater desalination was since its introduction in 1932 the main fresh water resource of Aruba and was successfully applied since then to secure drinking water supply. However, desalination of seawater was not always without problems. The most frequently encountered operational problems hampering stable desalination and drinking water quality, as will be explained more in depth in the next sections, are: (1) corrosion and erosion due to the corrosive seawater environment and shortcomings in design; (2) excessive foaming due to natural surface active components in seawater; (3) scale formation due to high temperature decomposition of bicarbonates in thermal evaporators; (4) scale formation due to concentration polarization at the membrane surfaces; (5) biofouling in thermal

evaporators and SWRO units; and (6) corrosion in water distribution systems causing brown and blue water and water losses due to pipe perforations and leakages (Marchena, 2013).

### 2.3. Toward sustainable seawater desalination: Operational aspects of importance

According to the desalination operational experience at WEB Aruba, well designed and constructed desalination units usually pass the operational performance test in the commissioning phase; typically, and within the specified and agreed upon period, all design criteria, nominal capacity and efficiency are met after some adjustment. However, our experience is that after some months of operation decay and consequently efficiency reduction occur basically due to the operational problems mentioned in the previous section. With the lapse of time, without an effective continuous improvement process, this efficiency decaying tendency, especially enhanced by aging of the production units and corrosion, will become more intensive (Arrindell, 1987).

The seawater environment and pure distillate (particularly due to its acidity) are very corrosive, making maintenance of the desalination units and material selection a very important aspect in applied seawater desalination technology. The main internal problems encountered in seawater evaporators are corrosion and perforations of the carbon steel evaporation stages where the flashing recirculating brine is flowing. Additionally, the corrosive non-condensable gasses such as oxygen and carbon dioxide emerging from the condensing vapors also cause severe corrosion in the venting system of the evaporation stages (Al-Mutaz et al., 2007). The application of stainless steel lining in these compartments was a mayor solution for these problems together with adequate improved design of the venting systems. Deaeration of the seawater feed before entering the evaporator has also significantly contributed to inhibit vent side corrosion.

Flow induced erosion and corrosion at the recirculating brine tube inlets of the evaporating vessels was another form of aggressive corrosion. These problems were solved by adaptation of plant designs and adjustment of brine gates and distillate gates to reduce recirculating brine flow velocities. Many of these practical solutions have been introduced by sharing operational and maintenance experiences and knowledge with manufacturers. Furthermore, the installation of high temperature resistant polymeric inserts in the tube bundle's inlets has offered effective protection against tube leaks as a result of erosion corrosion.

The decreasing trend of the performance ratio of a MSF evaporator in the operational period before and after a condenser cleaning and minor corrective maintenance activities to improve efficiency is illustrated in figure 2 (Marchena, 2013).

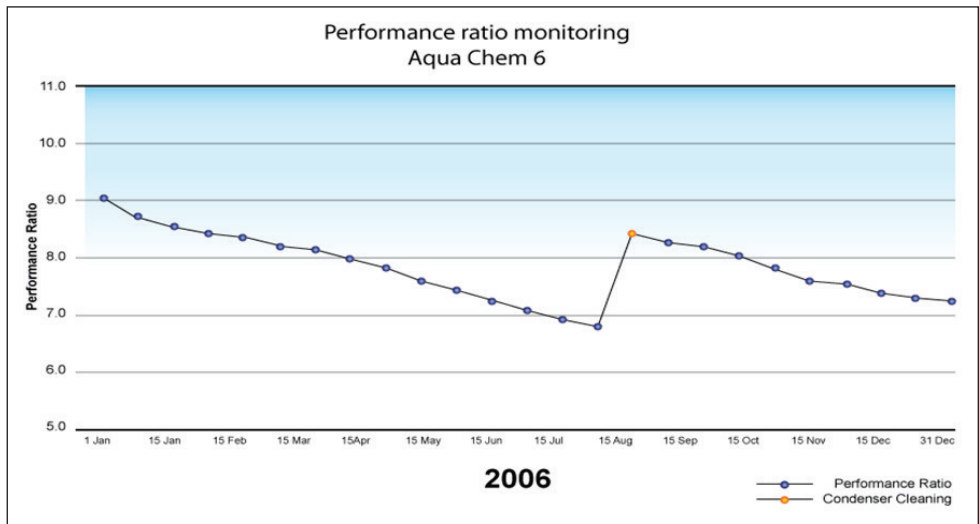


Figure 2. Performance Ratio decay of an MSF evaporator

2.3.1. Excessive foaming

Excessive foaming is inherent to the flashing process of seawater where vapor bubbles are spontaneously formed at reduced pressure in the successive evaporating stages (Auerbach et al., 1981). This foaming process is further enhanced and stabilized due to the presence of naturally occurring bio-organic surface active components in seawater. This foaming tendency of the recirculating brine is a physicochemical aspect of importance that hampers stable evaporation in thermal seawater desalination. It causes entrainment of seawater droplets in the condensing vapor which diminishes the quality of the produced distillate. Figure 3 illustrates the flashing induced foaming of the recirculating brine in a MSF evaporator (Marchena, 2013).

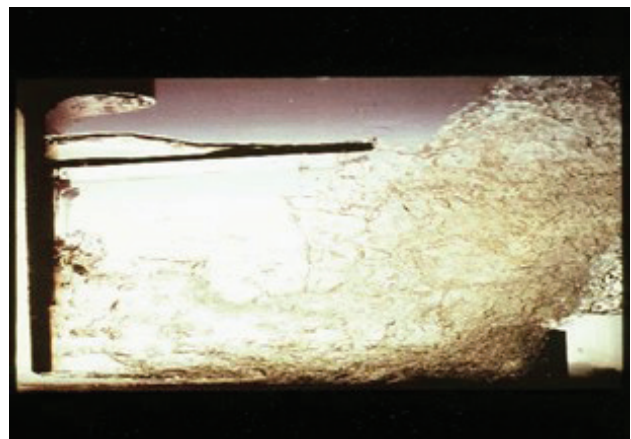


Figure 3. Foaming of flashing recirculating brine

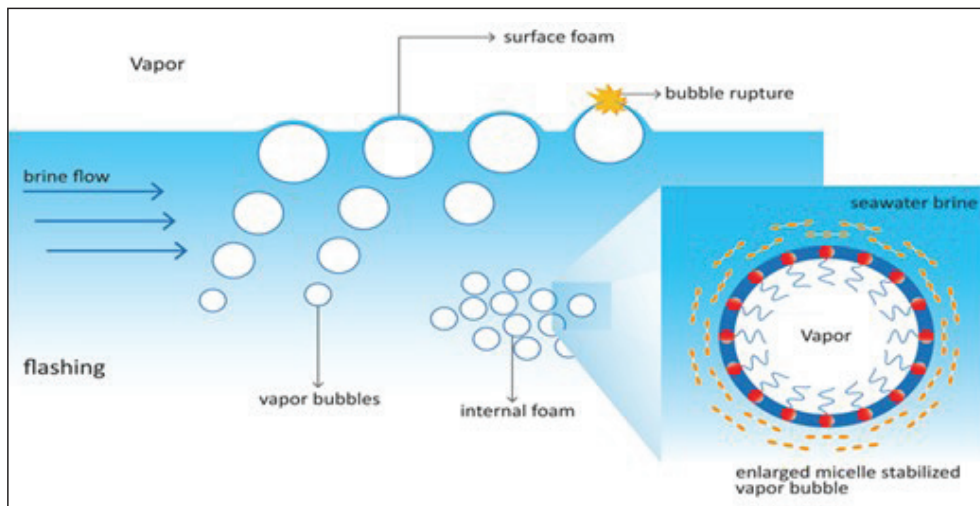


Figure 4. Foaming destabilization and stabilization in desalination

Dosing of an effective antifoaming additive to destabilize foam formation is due necessary to control violent evaporation inducing excessive foaming in the MSF evaporation (Imam et al., 2000). In cooperation with the chemical supplier an effective

high temperature antifoaming agent based on the ethylene oxide-propylene oxide (EO-PO) block copolymer technology had been developed and applied in Aruba to increase desalination stability.



Although the application of this antifoaming additive was very successful, monitoring is very crucial because under- and overdosing of the antifoam has caused, respectively, increased product salinity and production decay. The effect of under dosing was obvious but production and efficiency decay because of overdosing was often not satisfactorily explained. In Aruba, the surface tension of the curved vapor liquid surface of the flashing vapor bubbles was introduced to successfully explain this observed operational phenomena. According to the developed theory, production and efficiency decay is primarily caused by internal foams stabilized by excess antifoam molecules. This in turn causes a two phase flow pattern in the recirculating brine reducing heat transfer and pumping capacity. The destabilization of surface foams and the stabilization of entrained internal foams are schematically illustrated in figure 4 (Marchena, 2013).

Effective monitoring and control of the antifoam dosing is even more pronounced when taking into consideration the fact that the necessary additives to control scaling and biofouling are surface active chemicals that significantly enhance seawater foaming.

### 2.3.2. Scale formation in thermal desalination

Another problem of importance encountered in seawater thermal desalination since the pioneering age is scale formation on the heat transfer surfaces due to thermal decomposition of bicarbonates normally present in seawater. In this thermal induced chemical process, calcium carbonates and magnesium hydroxide and calcium sulfates are formed which have a retrograde solubility e.g. decreased solubility with increasing temperature. These components precipitate on the heat transfer surfaces and form a non-heat conductive layer increasing resistance for heat transfer resulting in efficiency reduction. Furthermore, once a layer is formed precipitation can continue until the whole tube is plugged. Aruba was since the start of its desalination activities in 1932 a major contributor to inhibit scale formation in thermal desalination as is indicated in table 2 (Marchena, 2013).

In the early years of desalination, the hard scale formed on the submerged tube bundles in the MED evaporators was removed using thermal shock and physical force (hammer and chisel). Thermo-shock was achieved by alternately permitting hot steam and cold water to flow through the tube bundle. The resulting tube contraction and expansion cracked and loosened the scales and other deposits from the surface of the tubes. This physical and mechanical approach of scale control has been practiced in Aruba from 1933 to 1958. In 1958, the first chemical scale treatment program worldwide, the dosing of a solution of ferric chloride ( $FeCl_3$ ) became available after intensive research done by WEIR Inc. in Aruba and Curacao (Hiller, 1953; Marchena, 2013). In the

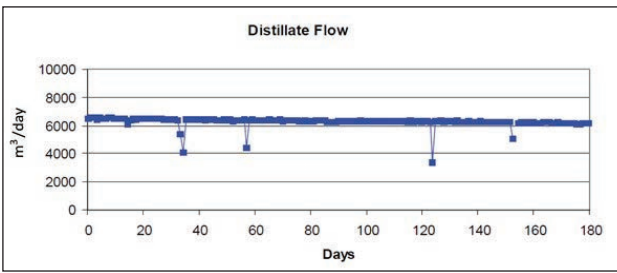
period 1958 to 1963, ferric chloride was produced in Aruba, on site, through an innovative electrochemical process in which a diluted solution of hydrochloric acid and seawater was electrolyzed with iron and carbon electrodes. This ferric chloride scale control program lasted until 1963 in which year it was replaced by the use of 98% concentrated sulfuric acid as scale inhibitor.

**Table 2.** Scale inhibition techniques used at WEB Aruba

Period	Scale inhibition technics
1933-1958	Thermo shock of the hear transfer coils; removal of scales with chisel and hammer
1958-1963	Dising of $FeCl_3$ ; on site production of ferric chloride; electrolyses of hydrochloric solution with iron electrodes.
1963-2007	Dosing of 98% concentrated sulfuric acid
1991-1994	Combined dosing of sulfuric acid and Belgard EV <sup>TM</sup>
2004	Dosing of 100% HT antiscalant of GEBetz; technical successful trial
2006-2007	Elimination of sulfuric acid with HT 15 antiscalant of GE WPT

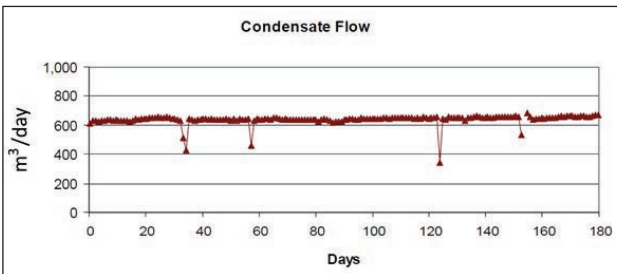
The first experiments with the dosing of concentrated sulfuric acid were performed on site. Concentrated sulfuric acid dosing was used successfully from 1963 to 2007. Aruba was the first to use this scale control program for commercial seawater desalination (Khan, 1986). From 1991 to 1994, a combination of acid dosing and a high temperature (HT-) antiscalant, Belgard EV<sup>TM</sup> was used as scale inhibitor. Although a decreased level of corrosion in the evaporators was experienced, this combined dosing practice was terminated due to poor overall performance caused by brine heater fouling.

Finally, in 2004 an alternative was found for the sulfuric acid dosing after an eight month successful trial with a 100% dosage of a HT-antiscalant. This effective high temperature scale inhibitor, based on the polymeric phosphonate and poly maleic chemistry, was developed in collaboration with the chemical supplier (Perez, 2005). In 2007, after approximately forty years of usage, this application resulted in the total elimination of concentrated sulfuric acid as scale inhibitor (Marchena, 2013). From the first days of the trial it was already obvious that the new scale inhibition program would be successful, since the brine heater operating conditions remained constant once the operation was stabilized. During the 180 days demonstration period the MSF evaporator had maintained very stable and efficient operating condition with, practically, a constant brine heater pressure. This was an indication that practically no fouling and scaling were occurring on the heat transfer tubes in the brine heater and the heat recovery section. The average distillate production during the trial was 6,285 m<sup>3</sup>/day with a slightly decreasing trend as shown in figure 5 (Marchena, 2013).



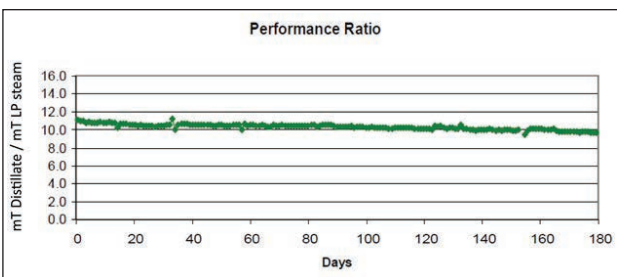
**Figure 5.** The distillate flow during the 180 days trial period

Additionally, the condensate flow also showed a slightly increasing trend with an average flow of 636 m³/day and negligible high temperature fouling/scaling in the high temperature vessels and the brine heater. The trend of the condensate flow is shown in figure 6 (Marchena, 2013).



**Figure 6.** The condensate flow during the 180 days trial period

As a consequence the performance ratio (the ratio of the distillate production in mT/day and the condensate flow in mT/day) was practically constant. In accordance with the two graphs above, the trend of the performance ratio showed a slightly decreasing trend as indicated in figure 7 (Marchena, 2013). The performance ratio had an average value of 9.88 during the 180 days trial period.



**Figure 7.** The Performance Ratio during the 180 days trial period

To conclude this section, the overall condition of the brine heater after eight months of operation with the new HT-antiscalant was excellent, as is illustrated in figure 8, right picture (Marchena, 2013). The condition of the same brine heater on sulfuric acid dosing (left picture) is also shown for comparison.



**Figure 8.** Condition of the brine heater on acid dosing and new HT-antiscalant

### 2.3.3. Biofouling in thermal desalination

Throughout the history of seawater desalination activities in Aruba, heavy biofouling was always a problem in the intake systems and the condensers of the seawater evaporators. Macro biofouling, especially barnacles, regularly obstructed cooling seawater flow through the condenser tubes of the thermal desalination plants.

In addition, marine biofilms on the heat transfer surfaces reduced the heat transfer, which led to decreasing production and efficiency of the MSF evaporators. Approximately every three months an evaporator had to be shut down for condenser cleaning and minor corrective maintenance to maintain optimum production and efficiency.

In a collaboration with the chemical supplier a novel non-oxidizing biofouling treatment was developed based on the quaternary amine n-alkyldimethylbenzyl ammonium chloride (ADBAC) technology to control biofouling. Quaternary amines are cationic surfactants with an excellent biocidal efficacy against macro bio-organism (Post et al., 2003). An evaluation trial was performed with the objective to prolong stable operation of the evaporators for at least one year without condenser cleaning. The challenge during this trial period was that the nominal production capacity of 6,000 m³/day and a performance ratio above 9 should at least be maintained. The trial was successfully concluded after 7.5 months with an average production and efficiency of respectively 6,267 m³/day and 9.6. As a matter of fact, the MSF evaporator used for the test continued in operation for 15 months after the initial dosing of the non-oxidizing biocide without the necessity for condenser cleaning.

Different visual inspections carried out during this period showed the condenser to be in excellent clean condition without any form of macro biofouling. Another observation was that the optimal temperature difference between the condenser and the evaporation vessels in the heat regeneration section indicated practically no micro biofouling on the heat transfer surfaces.

To monitor the fouling condition of a condenser, the desalination department of WEB, developed and introduced the condenser fouling ratio. This fouling ratio is defined as the ratio of the seawater flow and the distillate flow. Normally when the condenser is

fouling the distillate production steadily decays and the cooling seawater flow is increased resulting in an increased condenser fouling ratio. A constant trend of the condenser fouling ratio indicates that practically

no fouling is taking place on the condenser's tubes. The trend of the condenser fouling ratio during the aforementioned trial with the non-oxidizing biofouling additive is depicted in figure 9 (Marchena, 2013).

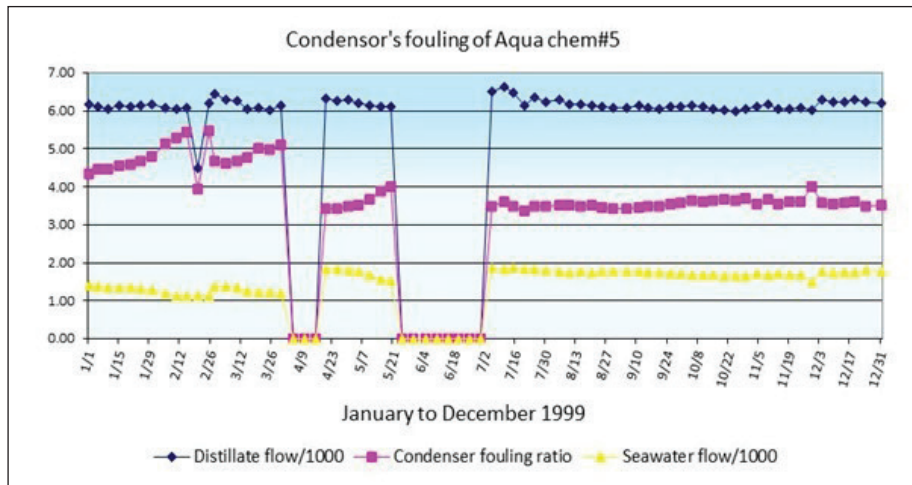


Figure 9. Condenser fouling ratio of Aqua Chem#5 in 1999 during trial

In conclusion of this section the condition of the condenser of the MSF evaporator before and after application of the new biocide is illustrated in figure 10 (Marchena, 2013).



Figure 10. The effectiveness of the non-oxidizing biocide additive

2.3.4. Scale formation and biofouling on SWRO membranes

Fouling of SWRO membranes can be very pronounced if the pretreatment of the seawater feed fails or the pretreatment system is not adequately designed. Membrane fouling can drastically reduce fresh water production and its quality. If not taken care of effectively, membranes can be permanently damaged in a very short period of time. The major contributions to the membrane fouling processes are the physicochemical depositions and biofouling due to attachment and proliferations of marine microorganism on the membrane surfaces. The physicochemical fouling process consists of: (1) precipitation of supersaturated inorganic chemical components; (2) organic fouling; and (3) colloidal fouling.

The precipitation of inorganic salts on the membrane surface occurs mainly due to concentration polarization. This process is inherent to the water

diffusion through the membrane following the convective mass transfer from the bulk to the membrane surface and back diffusion from the boundary layer toward the liquid bulk (Van der Meer, 2003). Defined also as crystalline fouling, mineral scale is deposited or forms on the membrane surface as a result of exceeding the solubility limits of the respective minerals. Figure 11 illustrates schematically the concentration polarization process on a semi-permeable membrane (Marchena, 2013).

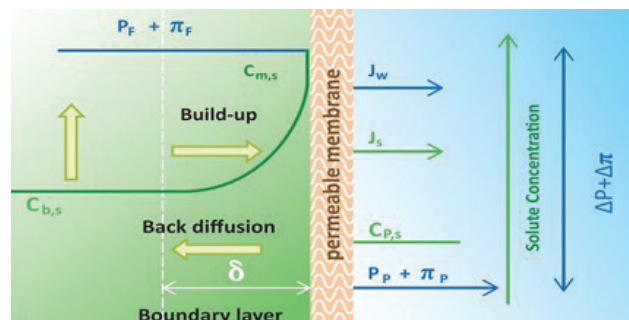


Figure 11. The concentration polarization process

Organic fouling on the other hand is adsorption of organic molecules onto the membrane surface where they remain, unable to diffuse through the membrane or re-dissolve into the feed bulk solution. These can be dissolved humic or fulvic acids from decomposing vegetable matter as well as oils and grease (van der Helm, 2007).

The third form of physicochemical fouling is colloidal fouling which involves coating of the membrane surface by particles that cannot pass through the membrane. This includes deposition of materials such as clay, silt, colloidal silica and particulates attracted especially by undissolved organic matter such as



humic substances. Physicochemical fouling can furthermore enhance attachment of microorganism leading to severe biofouling. Biofouling of SWRO membrane surfaces is defined as the deposition, accumulation, and growth of microbiological organisms on membrane surfaces. Also included are other foulants that support and act as nutrients for the biofilm. A biofouling layer will continue to grow thicker and denser, drastically reducing permeation of fresh water through the membrane.

Biofouling of membranes is a major technical issue in practically all water treatment processes. A biofilm quickly forms on all surfaces exposed to almost any feed water. It is a serious problem for all reverse osmosis systems using surface waters as feed water (Sheikhholeslami, 2007).

Severe membrane fouling, a combination of both physicochemical- and biofouling is also experienced in the Aruba plants with the new SWRO membrane technology, as illustrated in figure 12 (Marchena, 2013).



Figure 12. Disassembled SWRO membrane showing biofilm matrix

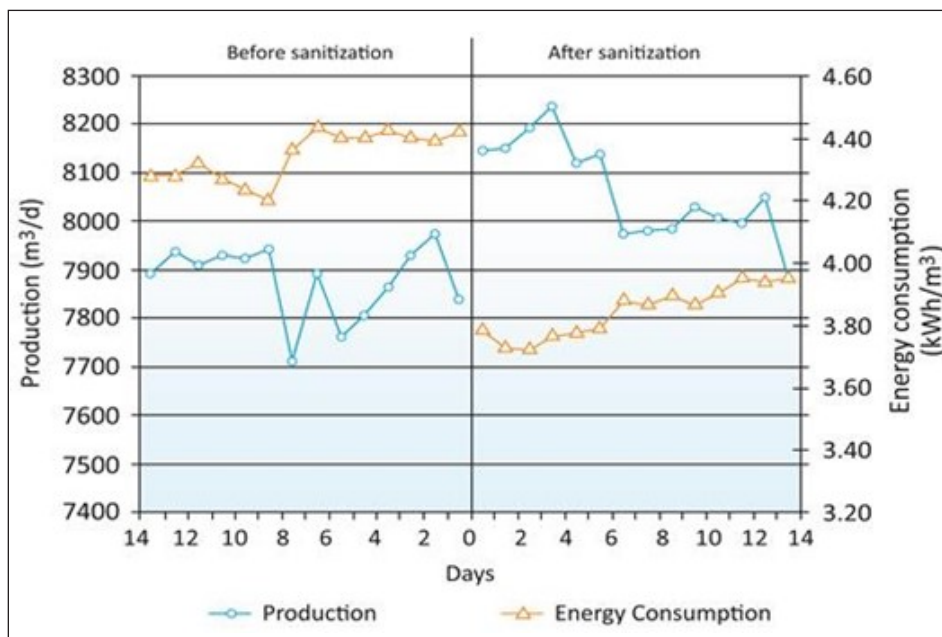


Figure 13. Effectiveness of the osmotic cleaning process

In cooperation with the manufacturer, different membrane cleaning procedures have been applied to mitigate membrane biofouling, however with mixed results. Further on, a novel osmotic membrane cleaning and sanitation method was developed and applied which effectively increased production and efficiency above design values (Marchena, 2012).

After the application of this innovative osmotic membrane cleaning process and the intensified sanitation, the energy consumption dropped, for the first, time to 3.72 kWh/m<sup>3</sup>, 7% lower than the target design value of 4.00 kWh/m<sup>3</sup>. In Figure 13, the trend of the energy consumption and production prior and after the application of this novel osmotic membrane cleaning process is illustrated to demonstrate its effectiveness to increase efficiency (Marchena, 2013).

#### 2.4. Corrosion in Potable water Distribution Systems

Thermal distillation and membrane desalination plants produce potable water of the very highest purity and quality. The distillation process, in particular, eliminates all of the many contaminants which commonly occur at low levels in potable water produced from surface water and well water supplies. Although distilled and membrane treated water is pure, it is corrosive to the pipes, storage tanks, valves, and meters that comprise the water distribution system. Corrosion reduces the useful service life of the system, reduces the carrying capacity of the pipes, and releases undesirable corrosion products, such as red iron oxides (rust), into the drinking water. The methods available for controlling corrosion in potable water systems are very limited due to the

requirement that any material added to the water must be certified as safe for human consumption, and should not affect the taste of the water. Since the very beginning of the thermal desalination activities in Aruba, the hot distillate has been cascaded over a bed of natural coral stones in the “Coral House” and sodium hexametaphosphate (SHMP) was used as a corrosion inhibitor. From the late 1980s until 1990, the community of Aruba experienced brown water problems throughout the island due to corrosion in the distribution piping system, with the iron content far beyond WHO-standards.

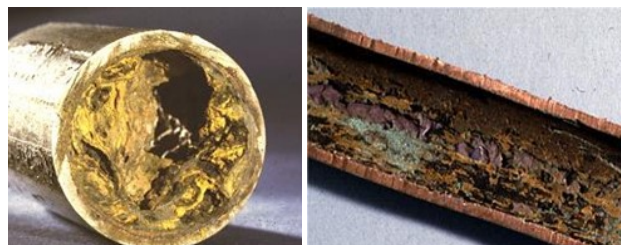
In 1990, after a comprehensive corrosion survey of Aruba’s Potable Water Distribution System the SHMP corrosion inhibitor program was replaced with a new treatment program consisting of low levels of both zinc and pyrophosphate. This treatment program, in effect from 1990 to 1996, successfully cleaned up the system and eliminated the “brown water” complaints. By 1996, the bulk of the iron products had been removed from the system and efforts were re-focused on further reducing corrosion. Around that time the zinc product was replaced by an orthophosphate/zinc blend and the pyrophosphate dosage was reduced. Occasionally, WEB Aruba has also observed blue water in their distribution system; this is caused by corrosion in the smaller copper distribution lines.

This section provides a summary description of the corrosion processes causing the occurrence of brown water, blue water and corrosion induced perforations of distribution pipes.

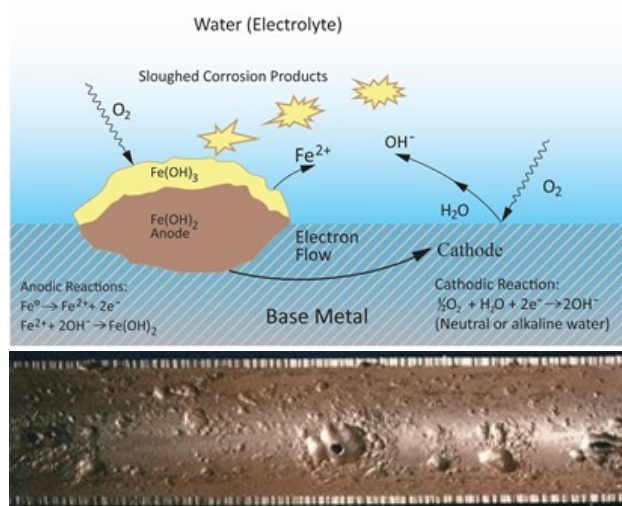
Refined metals, such as steel and copper are inherently unstable. In the natural environment, these metals are found as their oxides, hydroxides, sulfides, and ionic solutions, which are more stable than the refined metal. Corrosion is simply an electrochemical reaction of the refined metal with its environment that returns the metal to its natural oxidized state (Fontana, 1986). For example, when steel pipe corrodes in water, it reverts to iron oxide, commonly known as “rust”. Some of the rust adheres to and accumulates on the surface of the pipe. These accumulations, known as tubercles or tuberculation are more voluminous than the refined steel, restricting the flow in pipes. Some of the rust breaks free from the surface, imparting an unsightly red, orange, and brown color to the water or blue-green in the case of copper corrosion. Over the long term, corrosion causes a loss of pipe wall thickness and eventual perforation, resulting in water leaks. The pictures in figures 14 are vivid examples of corrosion in steel and copper used in potable water systems (Post et al., 2002).

In more scientific terms, corrosion can be understood as an electrochemical process, essentially a battery operating under uncontrolled conditions. There are four basic elements to the corrosion cell: (1) anode, where the metal gives up electrons and dissolves into solution; (2) cathode, where the electrons given up at

the cathode are released to solution; (3) conductor (base metal), which conducts the flow of electrons; and (4) electrolyte (water solution), where the flow of ions in solution completes the circuit. Figure 15 illustrates schematically the electrochemical aspects of the corrosion cell for steel in a water system (Marchena, 2013).



**Figure 14.** Iron and copper corrosion in distribution pipes

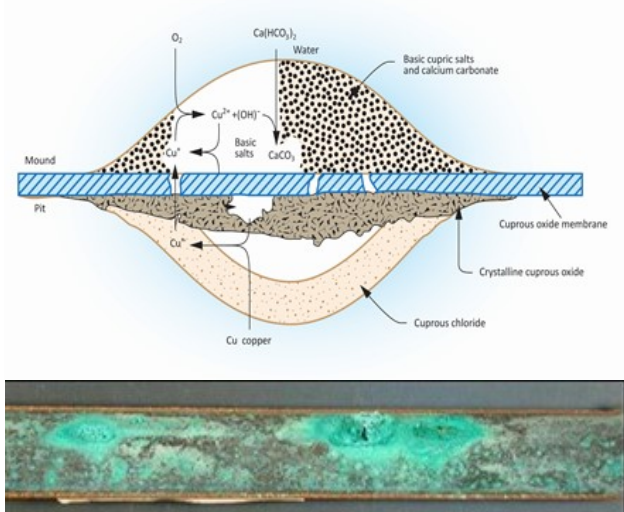


**Figure 15.** Electrochemical iron corrosion cell in water systems

For copper, the natural corrosion process at neutral or alkaline pH is limited by the rate of copper dissolving into solution at the anode. In Figure 16, a diagrammatic representation of the flow accelerated pitting corrosion of copper producing blue water in drinking water distribution pipe lines is illustrated (Hollander, 1990; Marchena, 2013). The mechanism of copper pitting corrosion is very complex. Different oxidation-reduction reactions (as shown in figure 16) take place forming different copper oxides and salts deposits.

As noted earlier, the desalination process removes practically all ions including calcium, magnesium and carbonates giving desalinated water significantly different characteristics from naturally occurring water and a different treatment methodology is required. The application of the pyrophosphate based corrosion inhibition program in Aruba has effectively mitigated corrosion in the water distribution network eliminating the occurrence of brown water, blue water

and corrosion induced perforations of distribution pipes. The water losses are significantly reduced, with Aruba having the lowest percentage "Non-Revenue Water" (NRW) in the region of about 2.6 to 4.7 % as compared with 15 to 65% in the neighboring islands; the low "Infrastructure Leakage Index" (ILI) reflects the well-maintained condition of the distribution network (Marchena, 2013).



**Figure 16.** Chloride induced copper corrosion in water

### 3. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This paper has outlined the different techniques that have been developed and successfully applied in Aruba in cooperation with manufacturers and chemical suppliers to solve the operational problems hampering efficient fresh water productions experienced with desalination. Especially the gained operational and maintenance experiences of the work floor personnel have been a determinative factor toward many solutions of the desalination problems. This was also the basis of the Continuous Desalination Efficiency Improvement Process to effectively involve the work floor personnel.

Aruba's journey starting from a primitive water supply system to sophisticated seawater desalination facilities, resolving most of the desalination problems encountered, is worth sharing with other Small Island Developing States in semi-arid and arid areas. A great challenge, however, is still the reduction of the impact of desalination on the coastal marine ecosystem. In this context further research is necessary to improve the osmotic membrane cleaning process to eliminate the intensive chemical cleaning of the SWRO membranes. A contribution to the development of zero liquid discharge seawater desalination technologies and the forward osmosis technology are near future desalination challenges of importance in Aruba to mitigate or eliminate the contamination of the coastal marine ecosystem.

### 4. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Management Team of WEB Aruba for permission granted to use the company's information for this paper. Further the authors are grateful to Mrs. Zullynny N. Rafael Schwengle and Mr. Rudberth A. E. Wolff and Mr. Vincentico R. Jr. Vrolijk for their dedication to upgrade the graphs and pictures and to Mr. J. W. Hogdson for critical reading of this paper.

### 5. REFERENCES

Al-Mutaz, A. S., Alodan, M.A., Abudaleem, F. & Al-Arifi, A. 2007. Experimental Investigation of Vapor Side Corrosion in Multistage Flash Desalination Plants. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Maspalomas, Gran Canaria, Spain.

Arrindell, E. M. 1987. Considerations for Increasing Overall Plant Life and Efficiency. Caribbean Desalination Seminar Technical Proceedings, Antigua West Indies: 186-201.

Auerbach, M. H., O'Neill Reiner, R.A. y Walinsky, S.W. 1981. Foam Control in MSF Desalination. Desalination, 38, pp. 159-168.

Birkett, J.D. y Arrindell, E.M. 2002. Aruba's Early Experiences in Desalination. Caribbean Desalination Conference, Oranjestad, Aruba.

Buro, O.K. 2000. The ABCs of Desalting. 2nd edition, International Desalination Association, USA, p. 30.

Fontana, M. G. 1986. Corrosion Engineering. 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., USA, p. 556.

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. y Melin T. 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination 216: 1-76.

Helm van der, A. W. C. 2007. Integral modeling of ozonation for optimization of drinking water treatment. Gildeprint Drukkerijen BV, PhD Thesis, Technological University Delft, The Netherlands: 151.

Hiller, H. 1953. Scale Formation in Seawater Distilling Plants and its Prevention. Proceeding of Industrial Mechanical Engineering (A) vol.167: 295-322.

Hollander, O. 1990. Technical Seminar Electric Utility Plant Water Treatment, Houston, Texas, USA.

Imam, M., Al-Raheed, R., Al-Tisan, L., Abdulgader, A.T., Mustafa, G.M., Al-Mobayed, A.S., Eshan, A. & Brose, D. 2000. Study on a polyoxypropylene glycol-based antifoaming agent in MSF plants. Desalination 129: 187-196.

Khan, A. H. 1986. Desalination Processes and Multistage Flash Distillation Practice. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands, p. 596.

Marchena, F. A. 2013. Efficiency Improvement of Seawater Desalination Processes: The case of the



WEB Aruba NV on the Island of Aruba. PhD thesis. University of Twente, The Netherlands, p. 522.

Marchena, F. A., R. P.M. Wever, V. R. J. Vrolijk & V. A. Alberts. 2013. An innovative environmental friendly chemical free osmotic on line cleaning process for SWRO's- en BWRO's membranes. Patent 1038485, NL Octrooicentrum, The Netherlands.

Meer van der, W. G. J. 2003. Mathematical Modeling of NF and RO Membrane Filtration Plants and Modules. PhD Thesis, Technological University of Delft, The Netherlands: 352.

Perez, L. A., Carey, W.S. y Blandford, N. 2005. Development of a New Scale Control Program for Seawater Thermal Desalination Processes, IDA World Congress, SP05-211, Singapore.

Post, R. E., Marchena, F.A., Maria, D.R. & Delannoy, H. 2002. Water Treatment Technology for Desalination

Systems-A decade of experience inhibiting corrosion and "red water" in drinking water systems. Caribbean Desalination Conference, Oranjestad, Aruba.

Post, R. M., Marchena, F.A., Maria, D.R. y Delannoy, F.H. 2003. A new method for Controlling Marine Growth in Desalination Plant Intake Systems. 2<sup>nd</sup> Expo/Congress Water, Piscaderabay, Curacao.

Sheikholeslami, R. 2007. Fouling in Membranes and Thermal Units A Unified Approach-Its principles, Assessment, Control and Mitigation. Balaban Desalinations Publications, L'Aquila, Italy: 242.

Velmurugan, V., K. Srithar. 2007. Solar stills with a mini solar pond-analytical simulation and experimental validation. Desalination 216: 232-241.

Walhain, J. H. M. 2005. Oro Ubao: a study of the gold mining in Aruba, (in Dutch). Unoca, Oranjestad, Aruba: 56.

## ORIGEN DE SUELOS DEPOSITADOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TAPACALÍ, MADRIZ, NICARAGUA MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE ISÓTOPOS ESTABLES DE COMPUESTOS ESPECÍFICOS

### STUDY OF THE ORIGIN OF SOILS DEPOSITED IN THE TAPACALÍ RIVER SUB - BASIN, MADRIZ, NICARAGUA USING THE TECHNIQUE OF STABLE ISOTOPE OF SPECIFIC COMPOUNDS

Caballero Arbizu, Yader Santiago<sup>1</sup>; de los Santos Villalobosm, Sergio<sup>2</sup>

#### Resumen

la degradación del suelo por la erosión es un grave problema en el mundo debido a la pérdida de la capa fértil, poniendo en riesgo tanto la seguridad alimentaria como los recursos naturales. Éste es el problema en la subcuenca del Río Tapacalí, compartida entre Nicaragua y Honduras, en la que las principales actividades económicas son la agricultura de subsistencia (maíz, frijol, tomate y yuca), el cultivo intensivo del café y la ganadería. Por lo anterior y como primer paso para entender el problema del movimiento del suelo en esta subcuenca se utilizó la técnica de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) para identificar sus principales contribuyentes. Esta técnica se basa en el hecho de que cada especie de planta de una comunidad vegetal excreta por las raíces ácidos grasos con huellas isotópicas específicas. Así, utilizando el software CSSIAR versión 2.00 para estimar la redistribución de los suelos evaluada en 29 puntos representativos del uso del suelo en la subcuenca. Los resultados mostraron que los principales contribuyentes a la deposición de suelo fueron los puntos NI11 (29%), NI03 (23%), NI28 (7%) y NI09 (4%) ubicados en la parte baja de la sub-cuenca (NI11 y NI28); además, en la parte alta (NI03) y en la parte central (NI09). Por otra parte, el origen de los sedimentos acumulados en los suelos de la subcuenca proviene principalmente del cultivo de maíz (NI11, NI03 y NI09) y de los bosques de roble (NI28). En este estudio se puede observar una separación considerando sólo dos fuentes diferenciadas de la composición isotópica; una empobrecida ( $\delta^{13}\text{C}$  aproximadamente  $-26.81\text{‰}$ ), que corresponde a los valores medidos de las plantas de especie  $\text{C}_3$  en 27 sitios muestreados y una enriquecida ( $\delta^{13}\text{C}$  aproximadamente  $-16.87\text{‰}$ ), cuyo valor coincide con las plantas de especie  $\text{C}_4$  en dos sitios muestreados en la subcuenca. La diferencia mostrada por los suelos refleja diferentes fuentes de carbono posiblemente debido a los usos del suelo en la actualidad, el pasado lejano y la presencia de procesos in situ únicos dentro del ambiente del suelo. Los valores de los ácidos grasos y sus respectivos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior, también hay una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo en la subcuenca.

**Palabras claves:** Erosión, Isótopos estables, ácidos orgánicos, CSSI

#### Abstract

Soil degradation by erosion is a serious problem in the world due to the loss of the fertile layer, putting both food security and natural resources at risk. This is the problem in the Tapacali River subbasin, shared between Nicaragua and Honduras, where the main economic activities are subsistence agriculture (maize, beans, tomato and cassava), intensive coffee cultivation and livestock farming. Therefore, as a first step in understanding the soil movement problem in this sub-basin, the Stable Isotope of Specific Compounds (CSSI) technique was used to identify its main contributors. This technique is based on the fact that each plant species of a plant community excretes by the roots fatty acids with specific isotopic traces. Thus, using the software CSSIAR version 2.00 to estimate the redistribution of the soils evaluated in 29 points representative of the land use in the sub-basin. The results showed that the main contributors to soil deposition were NI11 (29%), NI03 (23%), NI28 (7%) and NI09 (4%) located in the lower part of the sub- And NI28). In addition, in the upper part (NI03) and in the central part (NI09). On the other hand, the origin of the sediments accumulated in the soils of the subbasin comes mainly from the cultivation of maize (NI11, NI03 and NI09) and oak (NI28). In this study a separation can be observed considering only two different sources of the isotopic composition; One impoverished ( $\delta^{13}\text{C}$  approximately  $-26.81\text{‰}$ ), which corresponds to the measured values of  $\text{C}_3$  species plants at 27 sites sampled and one enriched ( $\delta^{13}\text{C}$  approximately  $-16.87\text{‰}$ ), whose value coincides with  $\text{C}_4$  species plants at two sites sampled In the sub-basin. The difference shown by soils reflects different carbon sources possibly due to current land uses, the distant past and the presence of unique in situ processes within the soil environment. The values of the fatty acids and their respective values of  $\delta^{13}\text{C}$  reflect both the current and previous plant cover, there is also a contribution of micro-flora and fauna within the soil matrix in the sub-basin.

**Key words:** Erosion, Stable isotopes, organic acids, CSSI

1 Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Nicaragua. yadercaballero@cira.unan.edu.ni

2 CONACYT - Instituto Tecnológico de Sonora. México. sergio.delossantos@itson.edu.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión edáfica es reconocida hoy en día como la principal causa de la degradación del suelo causada por la expansión e intensificación de la agricultura y la deforestación de los bosques, esto a su vez contribuye al detrimento de los ecosistemas naturales incluyendo la calidad del suelo y agua en América Latina y el Caribe. Por otro lado, la creciente demanda mundial de alimentos ha provocado el aumento sustancial de la producción de granos (semilla de soya, trigo, maíz) y otros productos alimenticios que se han basado en la intensificación masiva y no planificada de las actividades agrícolas, la deforestación de vastos territorios y el uso a gran escala de fertilizantes y pesticidas (IAEA, 2014).

Entre las consecuencias evidentes de estas prácticas agrícolas poco sostenibles están el aumento de las tasas de erosión y sedimentación a nivel de cuencas lo que conduce al deterioro físico, químico y biológico del suelo, afectando a su vez a los recursos hídricos circundantes. En Nicaragua la erosión de los suelos ha aumentado en los últimos veinte años y ha afectado a un 20% de las tierras agrícolas, a un 15% de los pastizales y a un 30% de los bosques (FAO, 2008).

La agricultura y la ganadería son las principales actividades productivas que generan ingresos económicos a las familias en la subcuenca del Río Tapacalí, las cuales han generado la degradación de los recursos naturales como consecuencia del cambio de uso de la tierra, la deforestación y la poca adopción de buenas prácticas agrícolas y ambientales (Alianza por la resiliencia, 2014). De hecho, toda la subcuenca ha sido categorizada como vulnerable al deslizamiento de tierra según los resultados del Estudio de Modelación de Riesgos a Deslizamientos de Tierra realizado por la Alianza por la resiliencia en el año 2013.

Debido a la problemática anterior se han realizado proyectos en la subcuenca basados principalmente en contribuir al mejoramiento de las condiciones socioambientales de los pobladores que habitan en las comunidades localizadas en el territorio mediante la reducción de la vulnerabilidad ante las amenazas naturales y la degradación de los recursos naturales así como en el aumento de la resiliencia comunitaria con la participación de todos los actores sociales (Alianza por la resiliencia, 2013). Sin embargo, se necesitan investigaciones que estén enfocadas en conocer el comportamiento de los sitios más vulnerables a la erosión y el movimiento del suelo.

Se han desarrollado diversas técnicas a través de los años para estimar las tasas de erosión y entre ellas se destacan la medición directa, la huella geológica y la de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (de los Santos Villalobos et al., 2016). Estas mediciones utilizan métodos generalmente complejos y costosos que producen datos a veces no representativos de

las cuencas y que por lo tanto no podrían aplicarse a eventos de erosión a largo plazo.

En la actualidad se están utilizando herramientas que emplean isótopos estables y/o radioactivos como trazadores ambientales y que proporcionan información sobre el movimiento de los suelos, su dirección y velocidad, entre otros (de los Santos Villalobos et al., 2016). Con la finalidad de entender el impacto global del movimiento del suelo en un ecosistema es determinante cuantificar la cantidad de éste que se pierde o gana en un sitio específico y conocer tanto su deposición final como su contribución al suelo total acumulado en el sitio, esto es posible mediante la aplicación de la técnica innovadora de Isótopos Estables de Compuesto Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés) (Hancock y Revill, 2008; Gibbs, 2008). Por ejemplo un estudio realizado por Carvajal (2008), en 24 sitios muestreados presentó cambios de vegetación de tipo fotosintético  $C_3$  (cafetal, relicto de selva) por  $C_4$  (pastizal, cultivo de cana panelera) y viceversa, posiblemente por el cambio en el uso del suelo y de prácticas agrícola en el en los suelos en Alcalá, Valledel Cauca.

El objetivo de este estudio fue identificar las fuentes de los sedimentos derivados de los diferentes usos del suelo (agrícola, forestal y ganadería) y las zonas de deposición de los sedimentos así como para determinar las causas históricas de la degradación de los suelos por erosión en la subcuenca del Río Tapacalí ubicada en la parte alta del Río Coco, Nicaragua/Honduras, midiendo las proporciones de origen natural de los isótopos estables de Carbono ( $^{13}C$ ) en 29 muestras de suelos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción del área de estudio

La subcuenca del Río Tapacalí se ubica en la parte alta del Río Coco (Cuenca No. 45) en la Región Central-Norte de Nicaragua, al sur de la República de Honduras y se ubica entre las coordenadas geográficas de la proyección WGS84:  $13^{\circ} 17' 00''$  y  $13^{\circ} 27' 10''$  de Latitud Norte y  $86^{\circ} 36' 00''$  y  $86^{\circ} 45' 15''$  de Longitud Oeste (Figura 1). La subcuenca distribuida en siete municipios tiene una superficie de  $156.93 \text{ km}^2$  (15,693 hectáreas) y un perímetro de 70.79 km, lo cual representa el 0.78% del área total de la Cuenca del Río Coco ( $19,969 \text{ km}^2$ ). Cuatro municipios (Somoto, San Lucas, Las Sabanas y San José de Cusmapa) pertenecen al departamento de Madriz y ocupan el 76.32% ( $119.65 \text{ km}^2$ ) del territorio, dos municipios (Pueblo Nuevo y San Juan de Limay) pertenecen al departamento de Estelí y ocupan el 0.86% ( $1.34 \text{ km}^2$ ) del área y el municipio de San Marcos de Colón de la República de Honduras ocupa el 22.83% ( $35.83 \text{ km}^2$ ) del área total de la subcuenca. Esta se extiende en dirección Sureste - Noroeste desde su parte alta en el municipio de San José de



Cusmapa en dirección Este de la cabecera municipal a una elevación de 1625 msnm; desembocando en su confluencia con el Río Comalí en el sitio

conocido como Los Encuentros, dicha confluencia da origen al cauce principal de Río Coco en territorio nicaragüense.

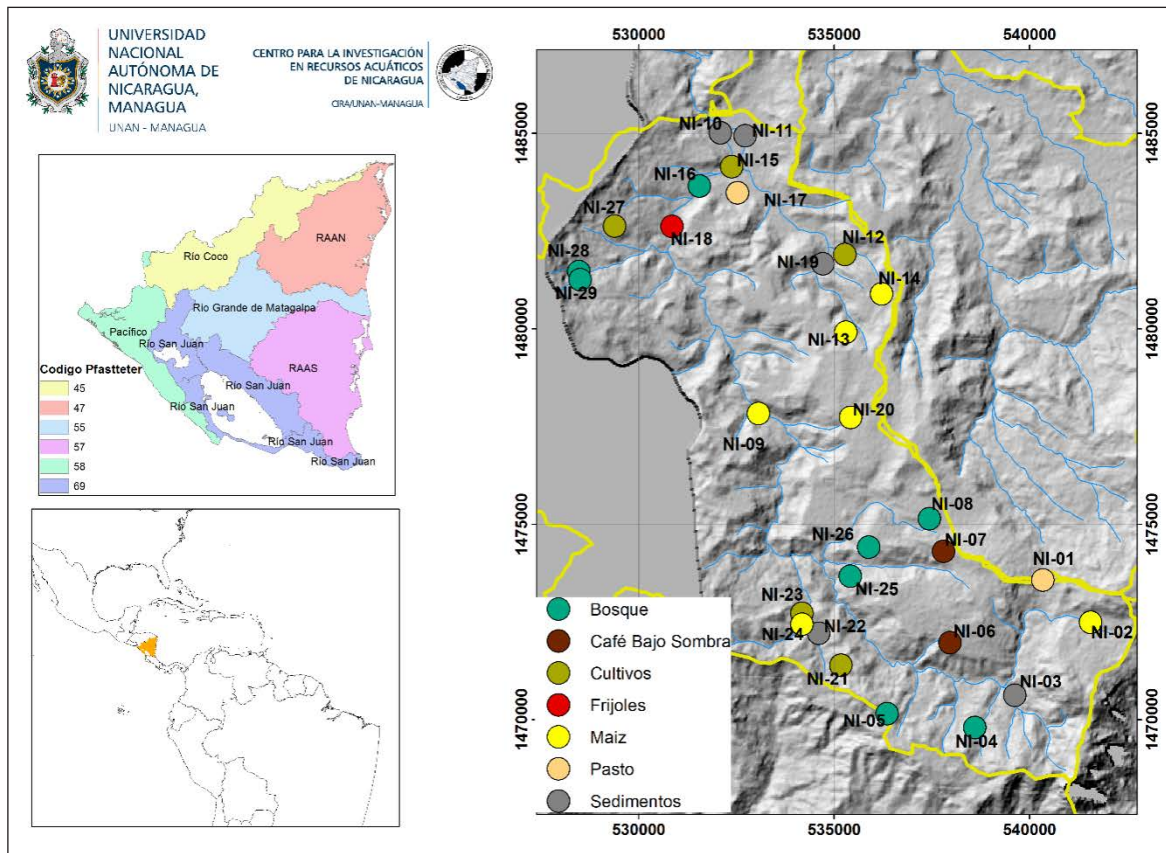


Figura 1. Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo seleccionados como representativos de los usos del suelo en la subcuenca del Río Tapacalí, Madriz, Nicaragua

El promedio aritmético de precipitación anual de la subcuenca es de 1286 mm según el período de registros de datos meteorológicos desde 1971 hasta 2010 (Alianza por la resiliencia, 2014) en donde la parte alta representada por la Estación Meteorológica de San José de Cusmapa es la zona más lluviosa y registra un promedio anual de 1724 mm, en la parte media representada por la Estación Meteorológica Miquilce el acumulado es de 1104 mm y en la parte baja representada por la Estación Meteorológica El Espino el acumulado alcanza los 1028 mm. La subcuenca se encuentra ubicada en la Provincia Geológica denominada Tierras Altas del Interior, predominando las rocas ígneas del grupo Coyol, cuya edad aproximada es de 13 millones de años, producto del vulcanismo continental del Terciario (Alianza por la resiliencia, 2014). Respecto al relieve, la pendiente media en la subcuenca es de 0.033 m/m (3.3%), siendo la microcuenca Gualiqueme la que presenta el mayor valor medio de pendiente (40.8%) y las microcuencas Tapacalí parte baja y El Varillal presentan valores menores. En la subcuenca del Río Tapacalí predominan los suelos con poco desarrollo del orden Entisol con un área de 69.83 km<sup>2</sup> correspondiente al 44.5 % del territorio de la subcuenca, seguido de

suelos más desarrollados del orden Alfisol con un área de 21.66 km<sup>2</sup> correspondiente al 13.8 % y en una buena proporción se encuentran los suelos del orden Vertisol con un área de 65.44 km<sup>2</sup> correspondiente al 41.7 %.

## 2.2. Selección y muestreo de sitios de interés

Se seleccionaron 29 sitios de muestreo representativos de los distintos usos del suelo y prácticas agrícolas. Los parámetros utilizados para su selección fueron que hubiera evidencia de erosión y deposición de sedimentos y pendiente, que favoreciera la escorrentía superficial y a su vez el aumento de la pérdida de la capa superficial del suelo en la subcuenca por ejemplo sitios donde el sedimento había sido transportado después de una lluvia reciente o en suelos poco compactados.

Las muestras de suelo en la subcuenca y de sedimento del lecho del Río se colectaron por triplicado para producir muestras compuestas. Durante la recolección se utilizaron guantes y se dispuso las muestras en bolsas de plástico de 25 lb. El muestreo se realizó entre el 8 de septiembre y 3 de octubre de 2014. Las 29 muestras de suelo se

recolectaron en los primeros 10 cm de profundidad representando los distintos usos del suelo en la subcuenca tales como el cultivo de maíz, frijol, café bajo sombra, pasto para el ganado, tomate, bosque de roble y bosque de pinos. Las cinco muestras de sedimento se colectaron en las laderas del cauce principal del Río Tapacalí (Figura 1).

### 2.3. Preparación y análisis de muestras

Alícuotas de 100 g de suelo seco de las 29 muestras se tamizaron a través de una malla de 63 mm y se almacenaron en bolsas de plástico (Ziploc) en el laboratorio de Radioquímica Ambiental del CIRA/UNAN-Managua para ser enviadas al Laboratorio de Radioecología (LARA), Instituto de Física de la Universidad Federal Fluminense (UFF), Río de Janeiro, Brasil. El análisis de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés Compound Specific Stable Isotopes) se realizó como parte del proyecto regional de cooperación técnico-científica RLA/5064 ARCAL CXL (Fortalecimiento de las estrategias de conservación del suelo y el agua a nivel de cuenca mediante el uso de técnicas innovadoras de isótopos estables).

La técnica de CSSI se fundamenta en el estudio de la producción y excreción al suelo de un conjunto de marcadores orgánicos, ácidos grasos ( $C_{14}$  a  $C_{24}$ ), únicos para cada especie de plantas en una comunidad vegetal, cuya huella isotópica en términos de abundancia natural de  $\delta^{13}C$  (relación de isótopo pesado  $^{13}C$  al liviano  $^{12}C$  de la muestra en relación a un patrón internacional, en partes por mil ‰) es constante e independiente de las condiciones edafo-climáticas en las cuales las plantas se desarrollaron (de los Santos Villalobos et al., 2017).

Las muestras de suelo se extrajeron cuantitativamente mediante sonicación (2 x 30 ml) con una mezcla de  $CH_2Cl_2$ -MeOH (Bligh y Dyer, 1959). Los extractos se transfirieron a un embudo de separación, y después de la separación de fases, los lípidos se recuperaron en la capa inferior de  $CH_2Cl_2$  (los disolventes se eliminaron al vacío) y se prepararon hasta un volumen conocido con diclorometano y se almacenaron sellados bajo nitrógeno a  $-20^{\circ}C$ . Los ácidos grasos (AG) se recuperaron de la fracción acuosa de la mezcla saponificada después de la adición de 1 ml de HCl y se convirtieron a sus ésteres metílicos antes de analizar mediante tratamiento con metanol acidificado (Christie, 1982).

La cromatografía de gases (GC) para separar y cuantificar las fracciones de ácidos grasos se realizó usando un cromatógrafo de gases Varian 3800, equipado con una columna HP5, un detector de ionización de llama (FID) e hidrógeno como gas portador. Las fracciones se analizaron usando el éster metílico de ácido graso  $C_{23}$  como patrón.

El análisis de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) se realizó usando un cromatógrafo de gases Thermo GC acoplado a un espectrómetro de masas de relación de isótopos Delta S de Finnigan Mat operado en modo de flujo continuo. La columna no polar (HP5) y las condiciones operativas fueron similares a las descritas anteriormente para los análisis GC-FID, pero se utilizó helio como gas portador. Los valores de isótopos estables se corrigieron para el carbono añadido durante la metilación (<1‰). La precisión analítica se estima en un valor superior al 0,5‰. Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando el software CSSIAR v2.00 (de los Santos Villalobos et al., 2017).

Este software es una herramienta basada en el enfoque Bayesiano del paquete SIAR que utiliza modelos de mezcla para determinar la distribución de isótopos estables del suelo, usando datos de  $\delta^{13}C$  y de ácidos grasos y es ejecutado sobre el programa gratuito R ([www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)) (de los Santos Villalobos et al., 2017). Para obtener una mejor discriminación de todas las fuentes del suelo en la subcuenca se obtuvo la proporción del suelo y su desviación estándar. Los resultados obtenidos por el modelo a partir del  $\delta^{13}C$  y cinco veces la media de los ácidos grasos seleccionados ( $C_{18\_1}$ ,  $C_{20\_0}$ ,  $C_{22\_0}$ ,  $C_{24\_0}$ ), presentan las contribuciones reales de las fuentes a la mezcla NI10.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Variación del carbono del suelo

Los resultados del análisis de  $\delta^{13}C$  ‰ y el contenido de Carbono total en las fuentes de los suelos en los 29 sitios muestreados en la subcuenca del Río Tapacalí se presentan en la Tabla 1, donde se agruparon en base a los usos actuales del suelo, como son los cultivos anuales (maíz, frijol, café de sombra, tomate y yuca), pastos para ganado, bosques (de pino y roble) y sedimento de río.

La mayor contribución de Carbono de las fuentes de suelos se detectó en el sitio NI24 utilizado para el cultivo de maíz ( $1643 \mu g g^{-1}$ ); mientras que la más baja en el sitio NI28 utilizado para bosque de roble ( $90 \mu g g^{-1}$ ). Sin embargo, analizando los valores promedio y su desviación estándar tomando en cuenta el uso actual del suelo encontramos que las muestras de suelo provenientes de pasto para ganado presentan una contribución de  $573 \pm 65 \mu g g^{-1}$ , los provenientes de los diferentes cultivos de  $447 \pm 359 \mu g g^{-1}$  y los provenientes de bosques de  $406 \pm 182 \mu g g^{-1}$ . Cabe destacar que el uso actual del suelo con menor variabilidad en los resultados fue el de pasto para ganado y con mayor variabilidad el de los cultivos de maíz y mezcla con otros tipos de cultivos (frijol, tomate y café). Esto pudiera deberse a que los suelos con uso actual para pasto han sido usados con ese fin durante mucho tiempo, mientras que los suelos con uso actual para cultivos (maíz, frijoles, café, yuca, tomate) pueden haber sido usados en el pasado

para diversos fines. Según un estudio realizado por Carvajal (2008) en el Valle de Alcalá, la abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  permitió demostrar que los depósitos de carbono en el suelo no solo dependen del uso y

la cobertura vegetal actual, sino también tienen alta influencia los usos establecidos con anterioridad y que han fijado este elemento en el suelo.

**Tabla 1.** Resultados de análisis de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) y contenido de carbono total ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en muestras de suelo con diferentes usos actuales y sedimentos en la subcuenca del Río Tapacalí, Madriz, Nicaragua

Código de la muestra	Lugar de muestreo	Usos actuales del suelo	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Carbono ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
NI02	Quebrada honda	Maíz	-25.92	436
NI09	Miguilse		-25.65	125
NI13	El Porvenir		-20.23	432
NI14	Mal Paso		-20.61	296
NI20	Llano Florentín		-16.87	370
NI24	Quebrada Los Cuevones		-25.41	1642
NI12	Misalqualto	Maíz, tomate	-21.21	236
NI15	Vuelta La Barranca	Maíz, frijoles	-23.87	326
NI27	Los Araditos	Maíz, frijoles	-23.07	413
NI21	El Mojón	Maíz, café	-22.39	273
NI23	Loma La Banqueta	Maíz, café, yuca	-25.84	503
NI18	Montaña El Salamar	Frijoles	-22.48	469
NI06	San Ramón	Café bajo sombra	-26.03	408
NI07	Santo Domingo		-23.63	323
NI01	El Cipián	Pasto de ganado	-24.97	527
NI17	Loma La Flor		-24.72	619
NI16	Tapacalí	Bosque	-24.47	198
NI04	Las Pocillas	Bosque de pino	-23.47	617
NI05	Los Llanitos		-25.11	465
NI08	Llano Alaupe	Bosque de roble	-23.81	593
NI25	Tapacalí		-23.69	395
NI26	Loma La Meseta		-17.51	403
NI28	Quebrada El Gualiqueme		-25.09	90
NI29	El Gualiqueme		Bosque peremnefolio	-25.34
NI03	Ribera de la Quebrada El Rodeo	Sedimento de río, cultivo de maíz cercano	-26.80	149
NI10	Ribera del Río Tapacalí		-26.77	253
NI11	Ribera del Río Tapacalí 2		-26.81	293
NI19	Ribera de la Quebrada Mal Paso		-21.50	436
NI22	Ribera de la Quebrada El Tule		-23.22	370

También se encontró que el Carbono no es igual en sitios que tienen el mismo uso o cobertura vegetal, y que para comprender la acumulación de este elemento no solo bastan las mediciones in situ, sino que es necesaria la reconstrucción del pasado de cada lugar para tener nociones sobre las posibles causas de los resultados encontrados.

### 3.2. Abundancia natural del $\delta^{13}\text{C}$ por usos y coberturas vegetales del terreno

De acuerdo a los resultados del análisis de  $\delta^{13}\text{C}$  ‰ las contribuciones más empobrecidas de  $\delta^{13}\text{C}$  se obtuvieron en los sitios NI03, NI10 y NI11 (Sedimentos de la Quebrada El Rodeo y del Río Tapacalí-26.77 a



-26.81) y las más enriquecidas en los sitios NI20 y NI26 (cultivo de maíz y bosque de roble, -16.87 y -17.51, respectivamente) (Tabla 1, Figura 2). Catorce muestras de suelos y sedimentos colectados evidencian la influencia de Plantas C<sub>3</sub> ( $\delta^{13}C$  entre -24 a -30 ‰: NI02, NI09, NI24, NI23, NI06, NI01, NI17, NI16, NI05, NI28, NI29, NI03, NI10, NI11), dos (NI20 y NI26) la de Plantas C<sub>4</sub> ( $\delta^{13}C$  entre -10 a -16 ‰) y el resto de las muestras (NI13, NI14, NI12, NI15, NI27, NI21, NI18, NI07, NI04, NI08, NI25, NI19, NI22) la de Plantas CAM por presentar valores intermedios de  $\delta^{13}C$  entre -16 a -24 ‰ (Videla, 2008). La mayor parte de las plantas identificadas en la subcuenca son del tipo C<sub>3</sub> (tomate, frijoles, café y árboles), el maíz es una Planta C<sub>4</sub> y otras especies como la piña, la pitahaya y otros cactus son representantes de Plantas CAM.

Los cambios de vegetación de tipo fotosintético (C<sub>3</sub>, CAM y C<sub>4</sub>) encontrada en los sitios muestreados en este estudio, posiblemente se debe a procesos

de sustitución de los diferentes cultivos que se desarrollan en la subcuenca (maíz, frijoles, café, tomate y árboles). En algunos de los sitios muestreados se observó señales de <sup>13</sup>C que correspondían a vegetación anterior y no a la actual; indicando que en su gran mayoría el carbono almacenado en el suelo se debía a los procesos de fijación de los cultivos establecidos en épocas anteriores y no a las gramíneas predominantes en los últimos años. Lo anterior permite reconocer la importancia de la estimación de la abundancia natural de <sup>13</sup>C y el conocimiento de la historia del uso del terreno de cada sitio de muestreo. La situación anterior coincide con un estudio realizado por Carvajal (2008), porque 24 de los 96 sitios muestreados en las tres zonas del Valle de Alcalá presentaron cambios de vegetación de tipo fotosintético C<sub>3</sub> por C<sub>4</sub>, debido a procesos de sustitución de cafetales por pastizales o caña panelera es decir debido a los diferentes cultivos desarrollados en épocas anteriores.

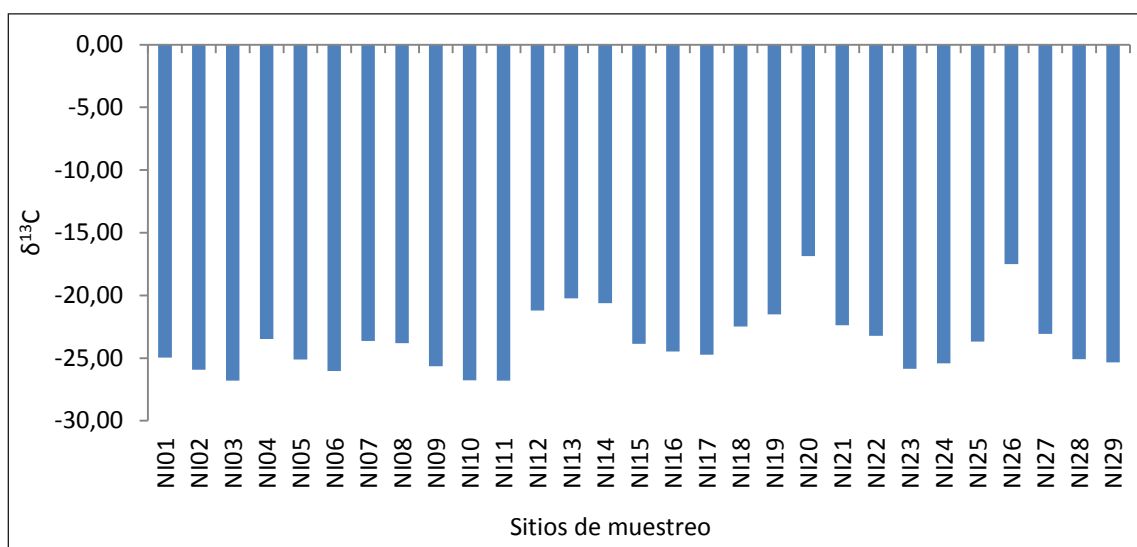


Figura 2. Composición isotópica de  $\delta^{13}C$  en las muestras de suelo y sedimento en la subcuenca del Río Tapacalí

### 3.3. Discriminación de las fuentes de la erosión

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo CSSIAR v2.00 utilizando los valores de  $\delta^{13}C$  se evaluó cinco veces la media de los ácidos grasos seleccionados (C18\_1, C20\_0, C22\_0, C24\_0) para obtener una mejor discriminación de todas las fuentes del suelo en la subcuenca y se obtuvo la proporción del suelo y su desviación estándar, presentándose las contribuciones reales de las fuentes a la mezcla NI10. (Gibbs, 2008). En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la proporción del suelo y la desviación estándar en el sitio de Mezcla NI10 y los sitios seleccionados en los suelos de la subcuenca del del Río Tapacalí.

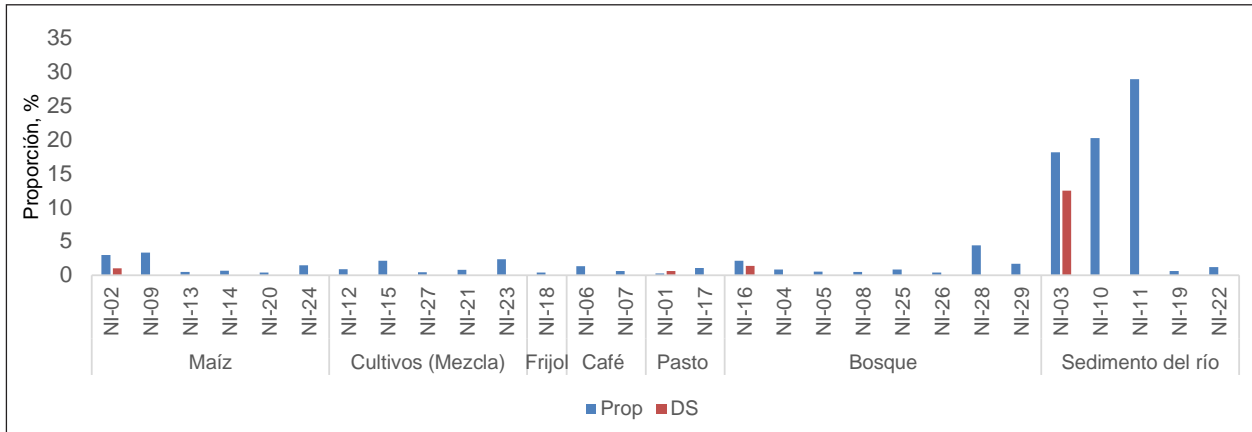
El sitio de mezcla de sedimentos del sitio NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca presentó una proporción de ácidos grasos de 20.25 %. Este

resultado muestra que las contribuciones de carbono proveniente de todos los sitios seleccionados para este estudio desde las zonas altas a la parte baja de la subcuenca. Esta situación también fue observada por Carvajal (2008), que atribuyó el almacenamiento de Carbono en la parte más baja posiblemente a las fuertes precipitaciones en el área de estudio durante los meses más lluviosos, lo que pudo haber transportado hacia las zonas planas del terreno la fracción de la materia orgánica que se presenta en estado soluble o posiblemente en suspensión.

Por otro lado, las proporciones de ácidos grasos en todos los sitios muestreados variaron entre 0.23 % a 28.95 %, presentando el valor más alto el sitio NI11. Otros sitios que mostraron una proporción considerable de ácidos grasos fueron el NI03 ubicado en la parte alta de la subcuenca y los sitios NI09 y NI15 utilizados para el cultivo de maíz y los sitios forestales

NI16 y NI28. Las áreas de cultivo utilizadas en los sitios NI08 y NI18 son destinadas a la producción de frijol y bosques, en la subcuenca y no fueron considerados como un contribuyente importante. Aunque la resolución de fuentes menores es deficiente con la fiabilidad de las predicciones de fuente menor que se refleja por sus incertidumbres, los resultados

muestran una alta probabilidad de mayor aportación del carbono de los suelos erosionados de los sitios NI03 (18.17 %) y NI28 (4.41 %), ambos ubicados en las partes altas de sus respectivas microcuencas y del sitio NI11 (28.95 %) ubicado en la parte baja de la subcuenca y el sitio NI09 (3.36 %) ubicado en la parte central de la subcuenca.



**Figura 3.** Resultados de la proporción de ácidos grasos en el sitio de Mezcla NI10 y los sitios seleccionados en los suelos de la subcuenca del Río Tapacalí

Las proporciones más altas de ácidos grasos obtenidas en este estudio muestran que la principal fuente de carbono corresponden a los suelos utilizados para el cultivo de maíz debido a que son los usos dominantes en la subcuenca. La tendencia de las proporciones de ácidos grasos sigue de cerca la tendencia mayoritaria de la composición isotópica para todas las fuentes del suelo (Tabla 1).

El modelo de mezcla CSSIAR v2.00 utilizado para este trabajo utilizó los siguientes ácidos grasos para la mejor discriminación general para todas las fuentes del suelo en la subcuenca: (C18\_1, C20\_0, C22\_0, C24\_0), siendo la más viable la presentada por los ácidos grasos de C22\_0 y C18\_1. El modelo de mezcla predijo que el mayor aporte de sedimento al sitio NI10 proviene de la erosión del subsuelo de los suelos ubicados en los sitios NI03 y NI11, los cuales aportan el 47.12 % del total de todos los sitios muestreados. Los resultados de la discriminación de los ácidos grasos de C22\_0 y C18\_1 utilizando el modelo de mezcla CSSIAR v2.00 para este estudio se muestran en la Figura 4.

De acuerdo a los resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) y las proporciones de carbono en la subcuenca del Río Tapacalí, el tipo de práctica agrícola que se emplea en los sitios donde se realiza el cultivo de maíz provoca mayor erosión, la cual predomina en toda la subcuenca seguida de la ganadería (pasto) y la forestal. La mezcla de sedimento objetivo es una muestra de sedimento recolectada en el sitio NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca y representa el sedimento del río obtenido desde la parte alta y central de la subcuenca. De acuerdo a los resultados del contenido de carbono, las fuentes de los

sedimentos en la subcuenca proviene principalmente de los suelos de NI24 ( $1642.98\mu\text{g g}^{-1}$ ) utilizado para cultivos de maíz, NI04 y NI17 utilizados para bosque y pasto respectivamente. Los sitios NI01, NI08, NI17 y NI23 utilizados para pasto y bosques evidenciaron mayor aporte de carbono a los suelos del área de estudio en relación a los demás sitios estudiados (Tabla 1).

Es interesante considerar el papel de la parte alta de la subcuenca del Río Tapacalí en la entrega de subsuelos al NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca. El rastreo geoquímico de las muestras de suelos de la subcuenca del Río Tapacalí indicó que una proporción significativa (hasta el 25%) de sedimento suministrado a la parte baja de la subcuenca se erosiona de los suelos asociados a la formación geológica, tipo de usos del suelo y deslizamientos predominantes en toda la subcuenca. Según el Plan de Manejo y Gestión Integral de la subcuenca del Río Tapacalí realizado en el 2014, uno de los principales problemas en la subcuenca del Río Tapacalí son los deslizamientos de laderas. Los trazadores de superficie indican que la erosión del subsuelo es significativa en las partes altas de la subcuenca del Río Tapacalí. Estos subsuelos erosionados provienen posiblemente de arroyos que drenan de la región alta de los sitios NI03, NI09, NI11 y NI28, todos los cuales aportan partículas del suelo hacia la parte baja de la subcuenca. El modelo predice que el 77% del sedimento de NI10 proviene de erosión del suelo de NI03, NI09, NI11, NI15, NI16 y NI28 (Figura 3).

Los resultados de la técnica CSSI confirman el papel dominante del cultivo de maíz en el aporte

de carbono a los suelos en la subcuenca. Algunos suelos cultivados en la subcuenca presentan otro tipo de vegetación fotosintética, dado que el cultivo se realiza principalmente en regiones de inundación de bajo relieve, regiones que tienen más probabilidades de ser zonas de deposición de sedimentos durante el flujo sobrebanco que las fuentes de sedimento. Es importante mencionar que los suelos utilizados para el cultivo de maíz dominan los insumos de carbono al sitio N11, mientras que los suelos procedentes de

las regiones de bosques se consideran importantes como fuentes de aporte de sedimentos. El análisis del CSSI confirma que en los suelos utilizados para cultivo de maíz predomina la mayor fuente de erosión (~ 50%). Sin embargo, no todo el suelo de la región es utilizada para cultivo de maíz, ni toda la región es boscosa. Los resultados de radionúclidos muestran que no más del 20% puede ser originado por la erosión de la capa de los suelos superficiales, en la subcuenca del Río Tapacalí.

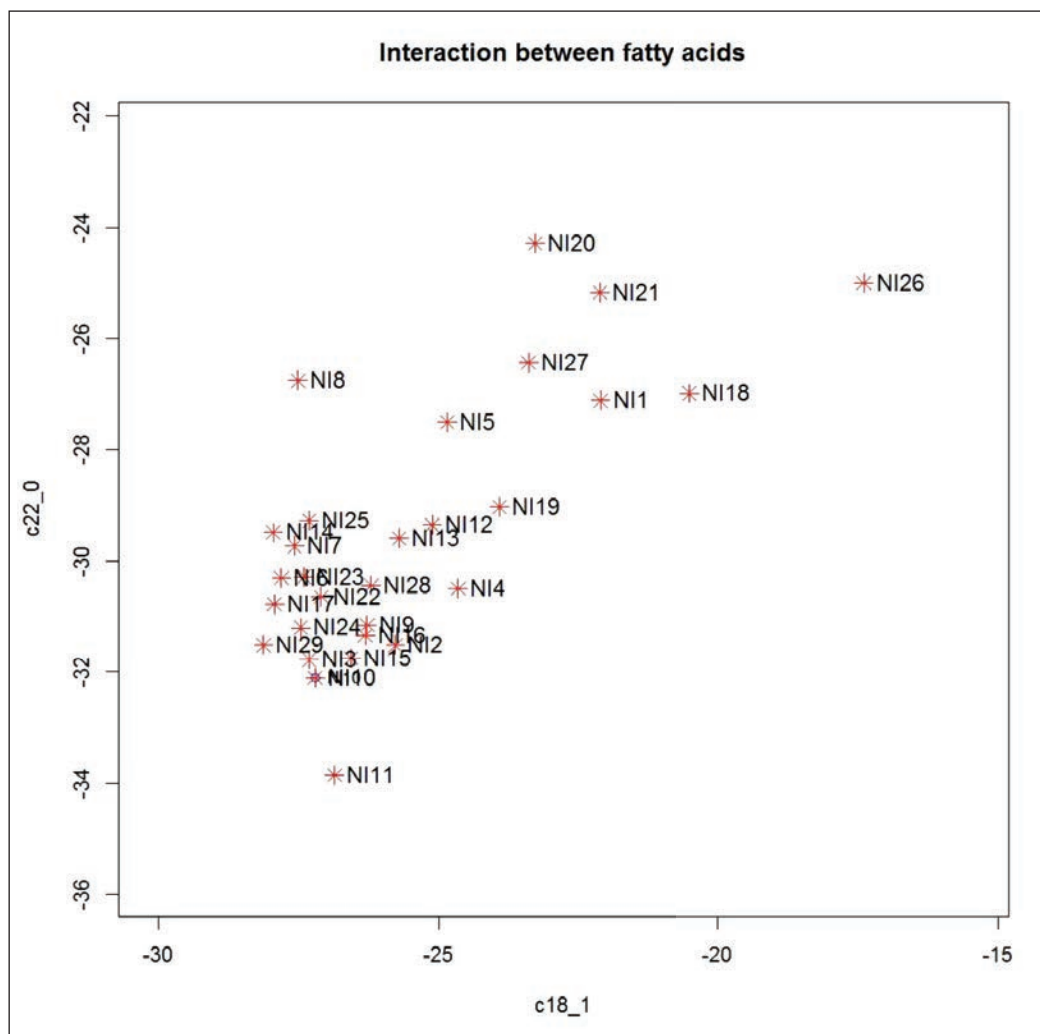


Figura 4. Interacción entre isótopos de C22\_0 y C18\_1 en la subcuenca del Río Tapacalí

### 3.4. El origen de las firmas $\delta^{13}\text{C}$ del suelo

Las huellas  $\delta^{13}\text{C}$  observadas en cada fuente de suelo en la subcuenca utilizando los patrones  $\delta^{13}\text{C}$  se encontraron entre los más fiables los que presentan longitudes de cadena de masa de carbono de  $\text{C}_{14}$  a  $\text{C}_{22}$ . Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  se encuentran principalmente entre suelos cultivados, forestales y pastizales y el carbono en estos suelos está dominado por las plantas  $\text{C}_3$  y CAM en la mayoría de los sitios muestreados a excepción de los sitios NI20 y NI26 que presentan suelos con características aproximadas a carbono  $\text{C}_4$ . Según Videla (2008), la mayoría de las plantas  $\text{C}_3$  tienen valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -24 a -30 ‰, con un valor promedio de -27 ‰. En las plantas  $\text{C}_4$

los valores  $\delta^{13}\text{C}$  se sitúan entre -10 a -16 ‰, con un valor promedio -16 ‰. En lo que respecta a las plantas CAM estas presentan valores intermedios entre -16 a -24 ‰.

Los valores promedio de  $\delta^{13}\text{C}$  en las diferentes fuentes de suelos en la subcuenca variaron entre -26.81 y -16.87 ‰, mostrando que en la mayoría de los usos y cobertura de carbono orgánico del suelo estuvo asociado a vegetación de tipo fotosintético  $\text{C}_3$  (-25.64 ‰ en promedio) y CAM (-22.55 ‰ en promedio), sin embargo se encontraron diferencias entre usos del suelo en los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de los sitios NI20 ubicado en la parte central de la subcuenca y NI26 ubicado en la parte alta de la subcuenca porque



variaron entre -16.87 a -17.51 ‰, aproximándose al tipo de vegetación fotosintética  $C_4$  (-17.19 ‰ en promedio).

La diferencia en los valores de  $\delta^{13}C$  de los suelos utilizados para el cultivo de maíz NI20 y NI26 con el resto de los sitios muestreados para este estudio puede atribuirse al enriquecimiento de la composición isotópica de  $\delta^{13}C$  de carbono  $C_4$  debido a cambios en los cultivos en estos sitios con predominio de tipo fotosintético  $C_3$  a  $C_4$  y a la naturaleza inmutable a largo plazo de la cubierta de las plantas en laderas de pastoreo y bosques protegidos en esta subcuenca. Blake et al. (2012) sugirieron que una historia de uso mixto de la tierra (por ejemplo, cultivos y pastos) reduce la discriminación entre las fuentes del suelo. En la subcuenca gran parte de la agricultura y algunos bosques se lleva a cabo en pendientes y se encuentran ubicados en la parte alta y central lo que facilita el movimiento de los carbonos de las plantas por las escorrentías que se forman por la precipitación.

Los sitios de sedimentos próximos a la ribera del Río Tapacalí y cultivos de maíz presentaron valores promedios más altos  $\delta^{13}C$  para este estudio con -25.02 ‰, mientras que los suelos utilizados para maíz mezclado con otros cultivos presentaron valores promedios de -23.28 ‰ y los suelos utilizados para maíz y frijol en la subcuenca presentaron los valores promedios más bajos con -22.45 y -22.48 ‰ respectivamente. Otras fuentes de suelo utilizados para café de sombra y pasto muestran valores similares de  $\delta^{13}C$  con -24.83 y -24.84 ‰ respectivamente. También se observó que los suelos utilizados para bosques presentaron valores muy cercanos a los utilizados para café de sombra y pasto (-23.56 ‰). Los suelos de bosques muestran similitudes con los suelos utilizados para el cultivo de maíz cercano a la ribera del río, debido a que el cultivo ocurre principalmente en las llanuras de inundación del río en las que se encuentran las orillas de los ríos. Sin embargo, se observa una desviación mayor para los ácidos de cadena  $C_{16}$ , presumiblemente, los ácidos grasos de producción agrícola son responsables de esta diferencia; A pesar de la gama de cultivos (maíz, frijol, café, yuca y tomate) en la subcuenca estos no impiden atribuir la diferencia a un cultivo específico.

Las huellas de  $\delta^{13}C$  de algunos de los suelos procedentes de las zonas de cultivo y bosques en la subcuenca oscilan entre los límites  $C_3$  y  $C_4$ , proporcionando de nuevo una fuente de discriminación desde las otras fuentes de suelos. El comportamiento está también claramente diferente de los suelos cercanos a la ribera del río. Una observación interesante en este estudio es la estrecha coincidencia observada entre los suelos utilizados para maíz y frijol. La diferencia mostrada por los suelos refleja diferentes fuentes de carbono (cobertura vegetal) debido a los usos de los suelos en el pasado lejano y / o la presencia de procesos in situ únicos dentro del

ambiente del suelo. Aunque los valores de los ácidos grasos y sus respectivos valores de  $\delta^{13}C$  reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior, también hay una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo en la subcuenca. Por lo tanto, los patrones que vemos para cada fuente de suelo reflejan en cierto grado una comunidad de suelo, influenciada en parte por los usos actuales y pasados de la tierra en la subcuenca del Río Tapacalí. Esto último concuerda con lo encontrado por Hancock y Revill (2008), donde las proporciones de ácidos grasos y sus respectivos valores de  $\delta^{13}C$  reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior y una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo.

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio, los valores de  $\delta^{13}C$  del sitio NI10 mostró suficiente discriminación para distinguir que prácticas agrícolas y/o cultivos provocan mayor erosión, siendo la agricultura la principal actividad con mayor impacto en la subcuenca, seguida de los usos de pastizales y tierras forestales. Así, la erosión superficial del suelo en la parte alta, contribuyó con más del 50% de los sedimentos a algunos ríos de la parte baja de la subcuenca.

El mayor contribuyente de Carbono en la subcuenca es el sitio NI24 utilizado para el cultivo de maíz.

De los 29 sitios muestreados se encontraron 14 en los que hubo predominio de vegetación  $C_3$ , 13 con predominio de vegetación CAM y dos sitios con vegetación  $C_4$ .

La técnica CSSI fué capaz de proporcionar estimaciones realistas de las proporciones de las fuentes de suelo en la subcuenca ofreciendo la oportunidad de discriminar los usos del suelo y las prácticas agrícolas proporcionando información de la erosión y depósito de sedimentos. Por otra parte, a medida que la técnica de CSSI cuantifica la huella isotópica de los ácidos grasos unidos a los sedimentos proporcionar estimaciones certeras de la sostenibilidad de los suelos superficiales en la subcuenca.

De acuerdo al origen de los sedimentos encontrado en este estudio existen depósitos sedimentarios en los suelos, influenciados por la erosión derivada de determinadas prácticas agrícolas/cultivos por los usos actuales y pasados de la tierra en la subcuenca del Río Tapacalí.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por el apoyo al participar en el Proyecto ARCAL RLA5064 "Fortalecimiento de Estrategias de Conservación de los Recursos Suelo y Agua a Nivel de Cuencas para Fortalecer la Seguridad Alimentaria de América Latina y el Caribe a través de la Aplicación Innovativa

de las Técnicas FRN, CSSI y MIRS y por realizar los análisis y el entrenamiento de manejo de los datos de los Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) correspondientes. Agradecemos además al Centro para la investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por el apoyo brindado para publicar el artículo. Se agradece también a la Dra. Katia Montenegro, Jefa del Área de Investigación y Desarrollo del CIRA/UNAN por las sugerencias y recomendaciones hechas al borrador de este artículo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blake, W., K., Ficken, P., Taylor, Russell, M. & Walling, D. 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology* 139: 322–329. DOI:10.1016/j.geomorph.2011.10.036.
- Bligh, E. & Dyer, W. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology* 37:912–917.
- Carvajal, A. 2008. Relación del Carbono y Nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá, Valle del Cauca. Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de Magíster Scientiae en Ecotecnología. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Maestría en Ecotecnología.
- Christie, W. 1982. *Lipid Analysis*, 2<sup>nd</sup> edn. Pergamon Press: Oxford.
- de los Santos Villalobos, S., M. Ayala, & R. Bórquez. 2016. ESTRATEGIAS PARA LA CONSERVACION DE SUELOS. CIENCIA PARA EL DESARROLLO.
- de los Santos Villalobos, Bravo, C., Dos Anjos, R., Cardoso, R., Max, G., Andrew, S., Mabit, L. & Dercon, G. 2017. The CSSIAR v.1.00 Software: A new tool based on SIAR to assess soil redistribution using Compound Specific Stable Isotopes. *SoftwareX* 6, 13–18.
- Gibbs, M. 2008. Identifying source soils in contemporary estuarine sediments: a new compound-specific isotope method. *Estuaries and Coasts* 31: 344–359. DOI: 10.1007/s12237-007-9012-9.
- Hancock, J. & Revill, T. 2008. Erosion source discrimination in a rural Australian catchment using compound-specific isotope analysis (CSIA).
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2008. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Vol. 1. Roma. Fecha de consulta: 2017-04-24.
- Videla, C. 2008. Aplicación de técnicas de <sup>13</sup>C en estudios de dinámica de materia orgánica del suelo. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP.C.C. 276, 7620 Balcarce. Argentina.

### Bibliografía de Internet

<https://es.scribd.com/document/257612118/Riesgo-Deslizamientos-subcuenca-del-Rio-Tapacali-Madriz-Nicaragua>

Alianza por la resiliencia, 2013. Estudio de Modelación de Riesgos a Deslizamientos de Tierra. Subcuenca del río Tapacalí. Madriz. Nicaragua. Fecha de consulta: 2017-06-04.

<https://es.scribd.com/document/257611926/Plan-de-Manejo-y-Gestion-Integral-de-la-subcuenca-del-Rio-Tapacali-Madriz-Nicaragua>

Alianza por Resiliencia, 2014. Plan de Manejo y Gestión Integral de la Subcuenca del Río Tapacalí. Fecha de consulta: 2017-06-05.

[http://www.edafologia.net/erosion/tema1\\_intro/1\\_intro2010.pdf](http://www.edafologia.net/erosion/tema1_intro/1_intro2010.pdf) IAEA (International Agency Energy Atomic), 2014. First Coordination Meeting of the Regional Project RLA5064 “Strengthening Soil and Water Conservation Strategies at the Landscape Level by Using Innovative Radio and Stable Isotope and Related Techniques”. 28 April – 2 May 2014. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Químicas. Hotel Puerta del Sur.

## ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SÉBACO, NICARAGUA

### HIDROGEOLOGICAL UPDATE AND AVAILABILITY OF THE SÉBACO VALLEY AQUIFER IN NICARAGUA

Delgado Quezada, Valeria<sup>1</sup>; Flores Meza, Yelba del Carmen<sup>2</sup>

#### Resumen

El acuífero del Valle de Sébaco es uno de los más importantes de la Región Central de Nicaragua, entre los Departamentos de Matagalpa, Estelí y León. Se encuentra en la subprovincia hidrogeológica de valles intramontanos; entre las cuencas del Río Grande de Matagalpa y del Río Viejo, cuyas aguas son utilizadas para la generación hidroeléctrica desde su nacimiento en el lago artificial Apanás-Asturias (Planta Centroamérica) hasta salir por el embalse La Virgen (Santa Bárbara). El acuífero presenta una distribución irregular de sedimentos (arcilla, limo, arena, grava y bolones), por lo que es difícil determinar unidades acuíferas y se le considera como una sola unidad heterogénea y anisotrópica. La explotación del acuífero comenzó en 1970 para el consumo humano y agricultura intensiva (arroz por inundación y hortalizas), la cual se ha incrementado con los años, por lo que es posible que el acuífero se encuentre en riesgo de sobreexplotación y contaminación. Este estudio se realizó para actualizar la información hidrogeológica del acuífero y estimar su disponibilidad actual ante la demanda futura de agua. Durante un año hidrológico (marzo a diciembre 2013) se realizó el monitoreo mensual de la red de pozos, determinando la dinámica subterránea. Los descensos en los niveles de agua van desde 3,46 a 15,43 m en los pozos familiares y/o comunales para el mes de abril, de finalización del verano. En el caso de los pozos de ENACAL para suministro de agua potable a la población, en San Isidro (en el norte del valle, en donde se localizan la mayoría de los pozos de producción) se observan descensos van desde 14,80 a 20,23 m (julio 2013, que se corresponde con *la canícula*): y en ENACAL Chagüitillo de 27,01 m (octubre 2013) a 36,26 m (abril 2013). Se observó que la recarga del acuífero responde directamente a la recarga por precipitación, aumentando el nivel freático entre cinco metros en el centro del valle y hasta 10 m en las cercanías de San Isidro y en la entrada de los ríos al valle. El caudal medio anual en el Río Viejo fluctúa de los 0,43 a los 28,47 m<sup>3</sup>/s, esto está en dependencia de la central hidroeléctrica y de las bombas de extracción a lo largo del río; mientras que el Río Grande de Matagalpa tiene un caudal promedio anual de 0.02 a 9.68 m<sup>3</sup>/s. La mayor extracción es de agua subterránea a través de los pozos de producción y los pozos de abastecimiento para consumo humano, estimada en 79,58 Mm<sup>3</sup>, seguida por el bombeo del Río Viejo (64 Mm<sup>3</sup>). El balance hídrico reporta 25,5 Mm<sup>3</sup> de agua disponible en el valle, aporte procedente en su mayoría de la recarga de los ríos (139,75 Mm<sup>3</sup>); la cual es mucho mayor que la recarga potencial por infiltración de precipitación (11 Mm<sup>3</sup>), que es influida notablemente por la evapotranspiración y el tipo de suelo en el valle. Se recomienda disminuir los volúmenes de explotación del acuífero e implementar medidas de protección y recuperación del recurso hídrico.

**Palabras claves:** Nicaragua, Valle de Sébaco, disponibilidad, acuífero, Hidrogeología.

#### ABSTRACT

The aquifer of the Valley of Sébaco, is one of the most important in the Central Region of Nicaragua, between the Departments of Matagalpa, Estelí and León. It is found in the hydrogeological subprovince of intramontane valleys; between the basins of the Rio Grande de Matagalpa and the Rio Viejo, whose waters are used for hydroelectric generation from its source in the Apanás-Asturias artificial lake (Central America Plant) until leaving through La Virgen damming (Santa Bárbara). The aquifer presents an irregular distribution of sediments (clay, silt, sand, gravel and boulders), so it is difficult to determine aquifer units and is considered as a single heterogeneous and anisotropic unit. The exploitation of the aquifer began in 1970 for human consumption and intensive agriculture (rice by flood and vegetables), which has increased over the years, so it is possible that the aquifer is at risk of overexploitation and pollution. This study was carried out to update the hydrogeological information of the aquifer and to estimate its current availability to future water demand. During a hydrologic year (March to December 2013), the monthly monitoring of the well network was carried out, determining the underground dynamics. The declines in water levels range from 3.46 to 15.43 m in the family and/or communal wells for the month of April, at the end of the summer. In the case of ENACAL wells for the supply of drinking water to the population, in San Isidro (in the north of the valley, where most of the production wells are located), there are declines ranging from 14.80 to 20, 23 m (July 2013, corresponding to the heatwave): and in ENACAL Chagüitillo from 27.01 meters (October 2013) to 36.26 m (April 2013). It was observed that the recharge of the aquifer responds directly to the recharge by precipitation,

1 Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Nicaragua. valeria.delgado@cira.unan.edu.ni;

2 Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Nicaragua. yelba.flores@cira.unan.edu.ni



increasing the water table between five meters in the center of the valley and up to 10 meters in the vicinity of San Isidro and at the entrance of the rivers to the valley. The average annual flow rate in the Río Viejo ranges from 0.43 to 28.47 m<sup>3</sup>/s, depending on the hydroelectric power station and the extraction pumps along the river; while the Río Grande de Matagalpa has an average annual flow of 0.02 to 9.68 m<sup>3</sup>/s. The largest extraction of groundwater is through the production wells and the supply wells for human consumption, estimated at 79.58 Mm<sup>3</sup>, followed by the pumping of the Río Viejo (64 Mm<sup>3</sup>). The water balance reports 25.5 Mm<sup>3</sup> of available water in the valley, contribution coming mainly from the recharge of the rivers (139.75 Mm<sup>3</sup>); which is much larger than the potential recharge by precipitation infiltration (11 Mm<sup>3</sup>), which is significantly influenced by evapotranspiration and the type of soil in the valley. It is recommended to reduce aquifer exploitation volumes and implement measures to protect and recover water resources.

**Keywords:** Nicaragua, Valley of Sébaco, availability, aquifer, Hydrogeology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Nicaragua posee una abundancia de recursos hídricos superficiales y subterráneos, en donde la explotación de acuíferos es realizada en las zonas del Pacífico y Central del país; mientras que en el Caribe las aguas superficiales son la principal fuente de agua. La disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos del territorio nacional, es estimada en 2959 Mm<sup>3</sup>/año en la región del Pacífico, de 172.3 Mm<sup>3</sup>/año en la región Central y de 30 Mm<sup>3</sup>/año en la región del Atlántico; mientras que la disponibilidad de agua superficial en el país es de 309 284 Mm<sup>3</sup>/año (Red IANAS y FCCyT 2012).

Sin embargo, ante esta pródiga cantidad, el recurso hídrico está comprometido con los diferentes usos: suministro para la población, irrigación, ganadería, industrias, generación hidroeléctrica y acuicultura; generando conflicto entre los usuarios en algunas zonas del país. Aunado a esto, la región Central, presenta las zonas con menor precipitación del país y por ende son las más vulnerables a los eventos de sequía. En base a esto, el potencial impacto sobre el recurso hídrico ocasionado por el cambio climático, se obtiene de la relación entre la potencial demanda y la disponibilidad del recurso por los usuarios, ya sea actual o futura (MARENA-PNUD, 2000).

La información hidrogeológica del acuífero del Valle de Sébaco ha sido proporcionada a través de (Tahal, 1977); la hidrología isotópica y el balance isotópico de la recarga al acuífero con (Plata, 1988); la disponibilidad de agua y las proyecciones a futuro con (Flores Meza, 2004); y calidad del agua subterránea y superficial con (González Tapia, 2004). A través del uso de un modelo matemático se simuló las condiciones del acuífero para el 2005 y 2010, encontrándose que era necesario incrementar en un 25% la recarga del acuífero para mantener los niveles de agua actuales (Flores Meza, 2004); paralelamente a este estudio (González Tapia, 2004) concluyó que el agua subterránea del Valle de Sébaco que es utilizada para consumo humano, está siendo impactada por las actividades del uso del suelo e industriales. Esta situación ha motivado que diversas Instituciones, Organismos Gubernamentales y Académicos, se comprometan en la protección de los recursos hídricos del país, a

través de la realización de estudios para calcular el potencial de los acuíferos ante las actuales y futuras demandas de agua de la nación. Es por esto que el presente estudio tiene por objeto la actualización y evaluación de las características hidrodinámicas del acuífero del Valle de Sébaco para el año 2013, con el fin de estimar su potencial actual.

Este estudio ha sido realizado conjuntamente por el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y Catholic Relief Services (CRS).

### Área de Estudio

El acuífero del Valle de Sébaco se localiza en la Región Central de Nicaragua, entre las coordenadas UTM 575000-606000 al Oeste y 1399000-1437000 al Norte. Políticamente pertenece a los Departamentos de Matagalpa, Estelí y León. Está compartido entre nueve municipios, abarcando mayor área los de San Isidro, Sébaco y Darío del Departamento de Matagalpa. Presenta una situación geográfica compleja al localizarse entre dos cuencas hidrográficas: la del Río Grande de Matagalpa al Este y la del Río Viejo, afluente del Río San Juan al Oeste. La cuenca de drenaje directa al valle ocupa un área de aproximadamente 652,8Km<sup>2</sup>, mientras que el valle abarca aproximadamente 263,3Km<sup>2</sup> (Figura 1).

Comenzó a ser explotado en 1970 para suministro de agua potable y la irrigación de cultivos de arroz y hortalizas. La siembra de arroz se realiza por inundación (agua subterránea, y superficial proveniente de los Ríos Viejo y Grande de Matagalpa), por lo que los volúmenes de agua utilizados son considerables. Posteriormente da inicio la generación hidroeléctrica en el valle (1972) con la Planta Carlos Fonseca (Santa Bárbara), que utiliza las aguas del Río Viejo (desde su nacimiento en el lago artificial Apanás-Asturias, cuyas aguas generan energía a través de la Planta Centroamérica), hasta salir por el embalse La Virgen (con un área de 6 Km<sup>2</sup>). La planta Santa Bárbara tiene una capacidad para generar 50 megavatios de potencia y una generación bruta anual promedio de 204.000 megavatio-hora(MWH).

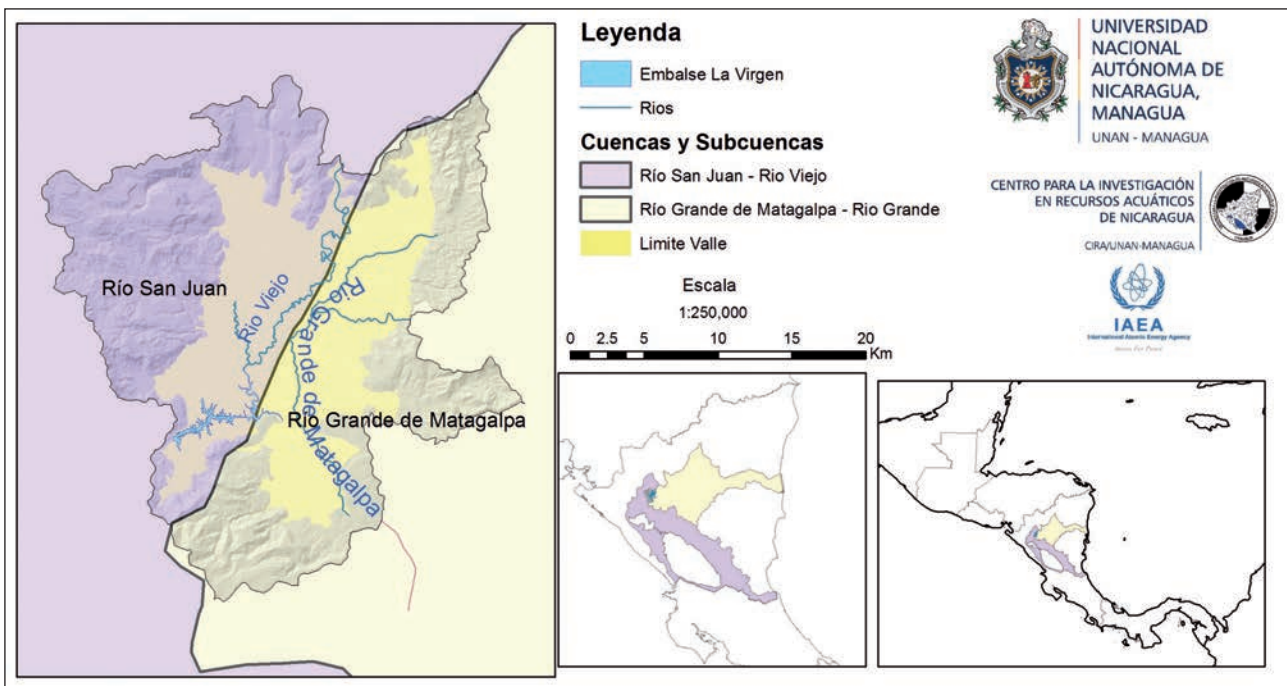


Figura 1. Localización geográfica del Valle de Sébaco

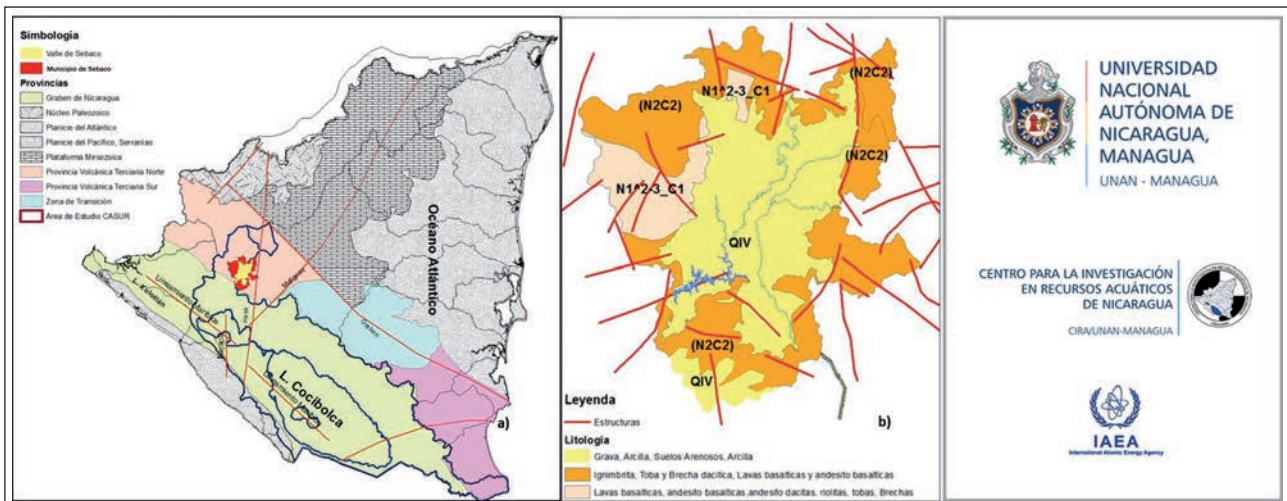


Figura 2a. Ubicación espacial del Valle de Sébaco en las Provincias Geológicas de Nicaragua

Figura 2b. Formaciones Geológicas Valle de Sébaco

**Clima**

El clima de la región se clasifica como tropical de sabana (Köppen, 1936), caracterizado por un régimen de sequía (de noviembre a abril) y un régimen de lluvia (mayo a octubre); en los meses de julio a agosto se da el fenómeno de la *canícula*, en el que predomina la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura. La temperatura media en el valle oscila entre los 21 y 30 °C, con precipitaciones de 800 mm en el centro del valle hasta 2000 mm en la zona montañosa (Flores Meza, 2004).

**Formaciones Geológicas**

Cinco provincias geológicas forman el territorio nicaragüense: La Planicie Costera del Pacífico,

El Graben de Nicaragua, La Provincia Volcánica Terciaria, La Provincia Geológica del Norte y la Planicie Costera del Atlántico.

En los terrenos de la Provincia Volcánica Terciaria, dividida a su vez en Provincia Volcánica del Norte, Zona de Transición y Provincia Volcánica del Sur, se han formado numerosos valles intramontanos (depresiones rellenas con sedimentos aluviales y coluviales), entre los que se destaca el Valle de Sébaco, localizado en la Provincia Volcánica del Norte. Las rocas volcánicas más importantes son tobas, basaltos, andesitas e ignimbritas, agrupadas en los Grupos Matagalpa y Coyol (Figura 2a). Localmente la cuenca de drenaje directa del valle de Sébaco se formó a partir de las rocas volcánicas del Cuaternario. La mayor parte del área está

desarrollada sobre rocas agrupadas en la Formación Coyal, son rocas volcánicas del periodo Terciario. Estas erupciones tuvieron lugar entre las series del

Mioceno-Pleistoceno, con posterior levantamiento debido a las compresiones de las placas Cocco-Caribe (Figura 2b, Tabla 1).

**Tabla 1.** Litoestratigrafía del Área de Estudio

Período	Espesor	Formación	Litología
Cuaternario Sedimentario	Aproximadamente 140 m	Aluvial (QIV)	Se presume que ocupa un pequeño graben, rellenado por los materiales de derrumbe de las montañas y de los aluviales arrastrados por las dos corrientes principales que atraviesan el valle. Está conformado por gravas, guijarros, bolones, arenas, suelos arenosos, arcillas.
Terciario (Pleistoceno)	-	Grupo Coyal Superior (N2C2)	Ocupan toda el área de drenaje directo al Valle de Sébaco. Se desarrolla en las partes altas de la microcuenca. Son rocas ignimbríticas, tobas y brechas dacíticas, lavas basálticas y andesito-basálticas.
Terciario (Mioceno)	-	Grupo Coyal Inferior (N1^2-3_C1)	Afloran al oeste del valle, el terreno superior puede haber sido erosionado durante la compresión. Son lavas basálticas y andesito-basálticas, andesito-dacitas, riódacitas, tobas y brechas tobáceas de riolitas y dacitas: aglomerádicas.

#### Tipo y Uso de Suelo

Los suelos que predominan en el valle son vertisoles, seguidos de molisoles, inceptisoles, alfisoles y entisoles (Tabla 2, Figura 3). Los suelos del valle por las características topográficas y tipo de suelo, son propicios para tierras cultivables (predominio del cultivo de arroz por inundación, con una lámina de agua utilizable de 10cm aproximadamente; y

de hortalizas como zanahorias, chiltomas, tomates y cebollas), llegando a tener un área cultivable de 163,39 km<sup>2</sup> la cual se extiende por todo el centro del Valle de Sébaco; y por la disposición de agua procedente del Río Viejo y del Río Grande de Matagalpa, así como de pozos perforados en todo el valle.

**Tabla 2.** Tipo de Suelo Valle de Sébaco

Orden	Subgrupo	Área (Km <sup>2</sup> )
<b>Inceptisol</b>	Typic Ustropepts	30,61
<b>Molisol</b>	Udic Haplustolls + Pachic Haplustolls	15,04
	Entic Haplustolls + Fluventic Haplustolls + Udorthentic Haplustolls	42,29
	Udic Argiustolls + Pachic Argiustolls	10,47
	Lithic Haplustolls + Lithic Argiustolls	11,84
<b>Alfisol</b>	Udic Haplustalfs + Ultic Haplustalfs	17,57
<b>Vertisol</b>	Typic Pellusterts	152,46
<b>Entisol</b>	Typic Troporthents	3,65

Un total de 118,77 Km<sup>2</sup> del área total del valle está cubierta por vegetación arbustiva, malezas y pastos, ubicados en los márgenes del valle; en éstas predominan las especies arbóreas no mayor de 3 m de alto, así como pastos para follaje de ganado sin manejo alguno, así como las malezas de menos de 1m de alto, distribuidos en las márgenes del valle (Figura 4).

#### Hidrología

El Valle de Sébaco está ubicado en la parte baja de la Subcuenca Río Viejo (ocupa 149,45 km<sup>2</sup>), y en las subcuencas Matagalpa (58,54 km<sup>2</sup>) y Laguna

de Moyuá-Las Playitas (75,93 km<sup>2</sup>; Figura 5). El Río Viejo atraviesa el valle con una longitud de 40,38 km, con pendiente media de su cauce de 21%; entra al valle por el sitio denominado La Perla en la parte Noroeste, hasta salir por el embalse La Virgen en la parte Suroeste, el cual fue creado para la generación hidroeléctrica Carlos Fonseca (Santa Bárbara), luego de la cual abandona el valle para depositar sus aguas en el Lago Xolotlán. El Río Grande de Matagalpa, con una longitud dentro del valle de 29,10 km, inicia en la ciudad de Sébaco al Noreste saliendo del valle en Ciudad Darío al Sureste, con una pendiente del cauce de 18%.



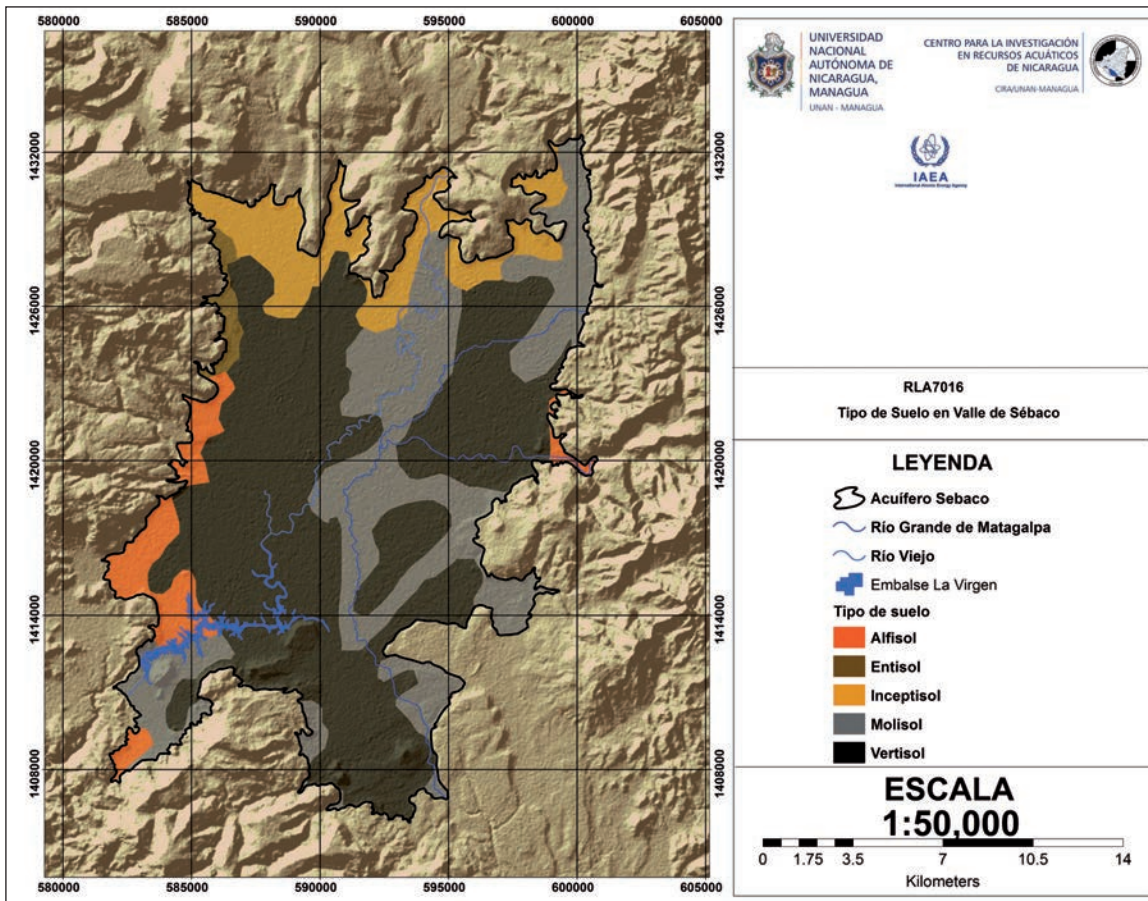


Figura 3. Tipo de suelo en el Valle de Sébaco

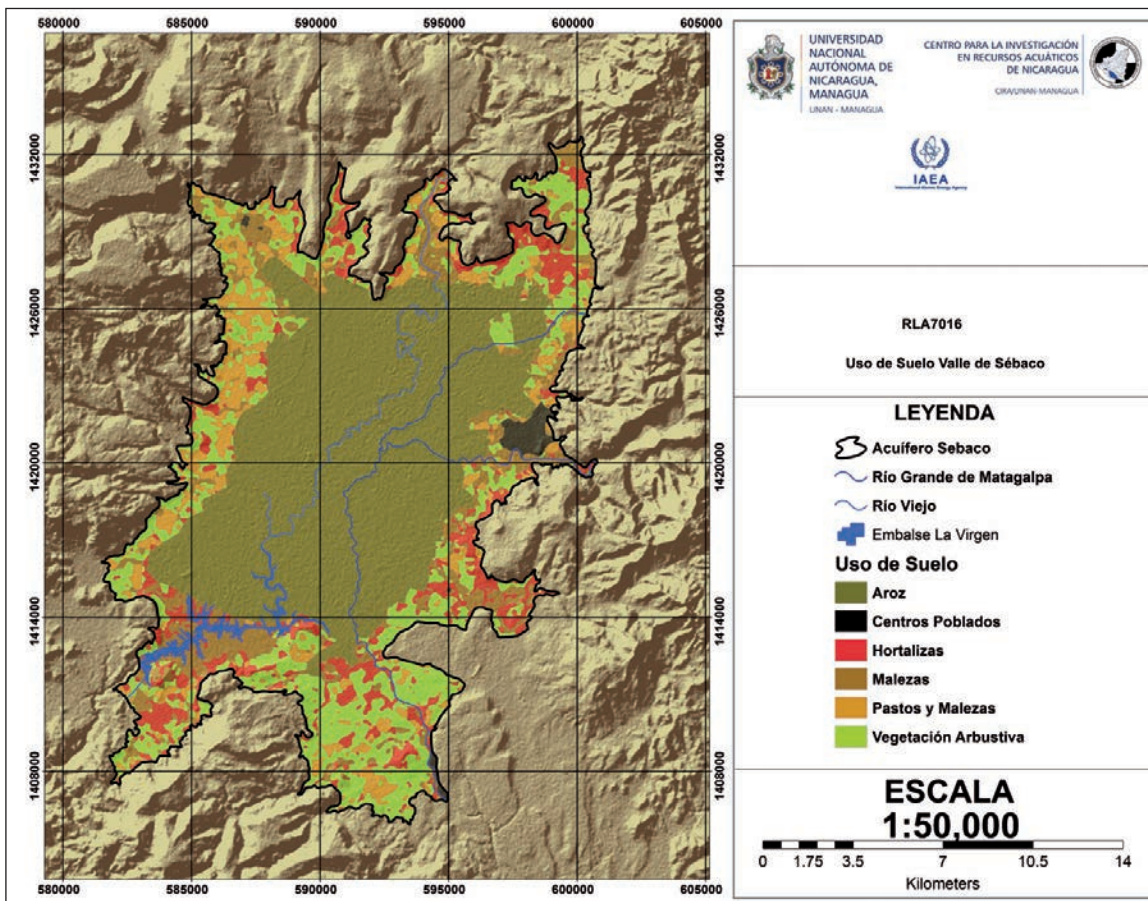


Figura 4. Uso de Suelo Valle de Sébaco

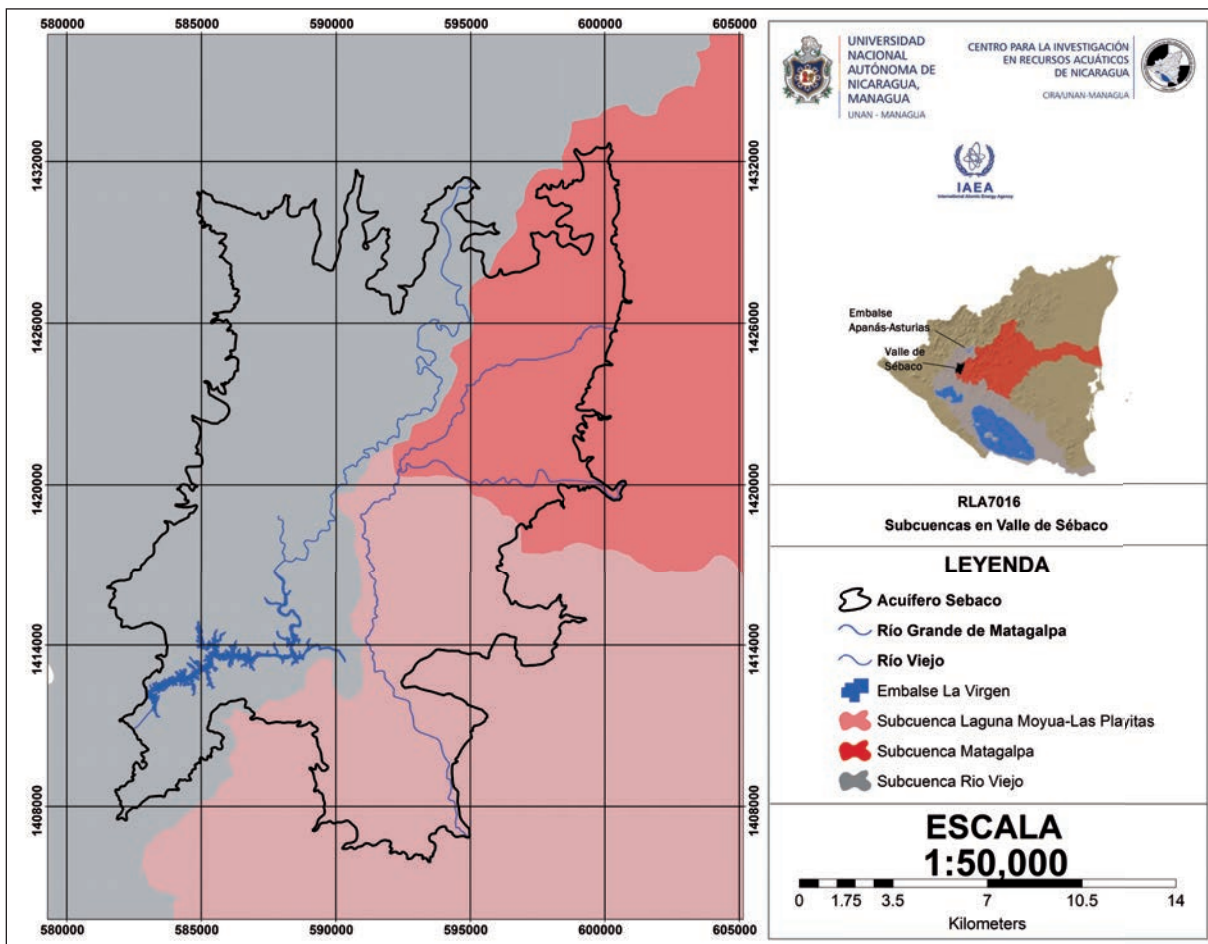


Figura 5. Subcuencas Río Viejo, Matagalpa y Moyúa-Las Playitas en Valle de Sébaco

El trascurso del Río Viejo por el Valle de Sébaco es con flujo a régimen permanente, influenciado por la descarga de la Planta Centroamérica; por lo cual es utilizado para la agricultura intensiva para irrigar los campos de cultivo de arroz y hortalizas. En cuanto al Río Grande de Matagalpa, es común encontrar seco su cauce en época seca, producto de las bombas instaladas en el mismo para irrigar los cultivos de arroz y hortalizas.

Estos ríos han excavado su cauce dentro del valle en una capa superficial de arcilla que forma el estrato superior de los materiales aluviales. Esta capa dificulta la infiltración del agua, la cual se produce de forma preferencial en las zonas donde falta dicha capa o donde su espesor es más reducido (Plata, 1988).

### Hidrogeología

El acuífero del Valle de Sébaco se desarrolla en una fosa cuya superficie se muestra aproximadamente rectangular, elongada en dirección NNE-SSW. En profundidad se ha descrito como un trapecio delimitado por sistemas de falla. La reconstrucción geológica presenta bloques escalonados que formaron la depresión, posteriormente rellenada. Se calcula una extensión de 263,33Km<sup>2</sup> en superficie. En profundidad el acuífero presenta un espesor

máximo de 110m, según un pozo de investigación (Tahal, 1977). Los bloques entre fallas forman montañas de rocas volcánicas terciarias las que se suponen impermeables cuando no han sufrido ninguna alteración. En la periferia del valle los pozos alcanzan la formación rocosa a unos pocos metros. En el centro del Valle las rocas han sido alcanzadas por debajo de los 100m.

Sedimentos de diferente granulometría conforman el acuífero del Valle de Sébaco: arcillas, limos, arena, gravas y bolones. De acuerdo con los registros litológicos, la distribución de estos sedimentos es irregular, por lo que es difícil determinar unidades acuíferas; por lo tanto, se toma el acuífero como una sola unidad heterogénea y anisotrópica, con una capa superior semiconfinante (conformada por limo-arcilla) seguida de una capa acuífera cuaternaria de 110m de espesor, compuesta por formaciones arenosas, interdigitada con limo y arcilla fina, y una capa de basamento impermeable. La penetración de los pozos de explotación en el acuífero oscila entre los 40 y 80 metros sin llegar a penetrar el basamento. Presenta condiciones de acuífero libre en unas zonas de los bordes Este y Oeste del valle (Flores Meza, 2004).

La explotación del acuífero puede decirse que comenzó en 1969. El volumen total de agua extraída hasta finales de 1987 puede estimarse en unos



350 Hm<sup>3</sup>. La tasa de extracción de los últimos años es del orden de 40 Hm<sup>3</sup>/año. La transmisibilidad del acuífero es muy variable de unos puntos a otros, variando entre unas pocas decenas de m<sup>2</sup>/día hasta casi 3000 m<sup>2</sup>/día. No se tiene información directa sobre el coeficiente de almacenamiento y su valor se estima que puede estar comprendido entre 0,1 y 0,3 (Plata, 1988).

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), a través del Proyecto “Red Hidrogeológica Nacional”, realiza el monitoreo de los niveles estáticos de agua (NEA) en el país. Para el Valle de Sébaco, se tiene información desde mayo 2003 a febrero 2012, obtenida de una red de monitoreo conformada por 33 pozos. En la Tabla 3, se reportan los mínimos y máximos para este periodo de medición (INETER, 2009), (INETER, 2012).

**Tabla 3.** Mínimos y máximos de NEA (m), de mayo 2003 a febrero 2012.

Fecha de medición	Mínimo	Máximo
may-03	4,50	39,86
mar-04	5,50	40,12
jul-04	6,17	44,48
oct-04	2,85	40,72
feb-05	6,06	41,30
jun-05	5,05	49,00
nov-05	3,80	45,50
may-06	5,75	38,85
oct-06	5,67	43,13
mar-07	5,25	43,70
jun-07	5,90	43,80
oct-07	2,52	42,70
jun-08	4,50	43,07
sep-08	4,27	42,36
oct-08	4,15	46,99
may-09	5,51	42,40
jul-09	5,40	42,30
sep-09	5,25	41,70
mar-10	4,76	43,46
jun-10	3,99	42,87
ago-10	3,47	42,72
sep-10	1,00	41,87
feb-11	1,03	31,52
feb-12	3,66	30,65
Mayo 2003- febrero 2012	1,00	49,00

## 2. METODOLOGÍA

La metodología implementada para cumplir con los objetivos del estudio se basa en: 1) recopilación de información secundaria (estudios realizados previamente en la zona, e información generada por las instituciones y organismos tomadores de decisiones en el valle); y 2) generación de información primaria. Dentro de este último componente, fue a partir de enero 2013 que se iniciaron las actividades de campo de este estudio, dentro de las cuales se realizaron reconocimientos Geológico, Hidrogeológico e Hidrológico.

Para el reconocimiento hidrológico se realizaron mediciones de caudales en tres sitios tanto en el Río Viejo como en el Río Grande de Matagalpa: la entrada del río al Valle, en la parte intermedia y en la salida del mismo del valle (Figura 6 y Tabla 4). Las mediciones se realizaron en una base mensual durante el periodo comprendido de enero a diciembre 2013, con excepción del mes de febrero. Se utilizó un molinete Gurley 627.

**Tabla 4.** Sitios de aforo en el Valle de Sébaco

No.	Fuente	Sitio	Coordenadas		
			Este	Norte	Elev. (m)
1	Río Viejo	La Perla	544280	1428697	471
2		Paso Real	589841	1419493	463
3		La Majadita	587666	1416858	451
4	Río Grande de Matagalpa	Puente Sébaco	597426	1420273	482
5		Paso Real	592152	1419962	474
6		El Zarzal	597425	1420067	476

El reconocimiento hidrogeológico incluyó la dinámica del agua subterránea la que se determinó a través del levantamiento de 162 objetos hidrogeológicos en el Valle de Sébaco, de los cuales 60 ya fueron clausurados o se encuentran abandonados o aterrados; quedando en uso 20 pozos excavados y 82 pozos perforados. De estos se seleccionó una red de monitoreo de 27 pozos (11 pozos excavados y 16 pozos perforados; Tabla 5, Figura 7). Los pozos perforados son mayoritariamente para irrigación de cultivos y un mínimo porcentaje para el suministro de agua potable a la población (pozos de ENACAL y comunales).

Se realizó la medición mensual (abril a diciembre 2013) de los niveles de agua de la red de pozos establecida. Se utilizó una sonda para medir niveles de agua, marca Solinst modelo 102.



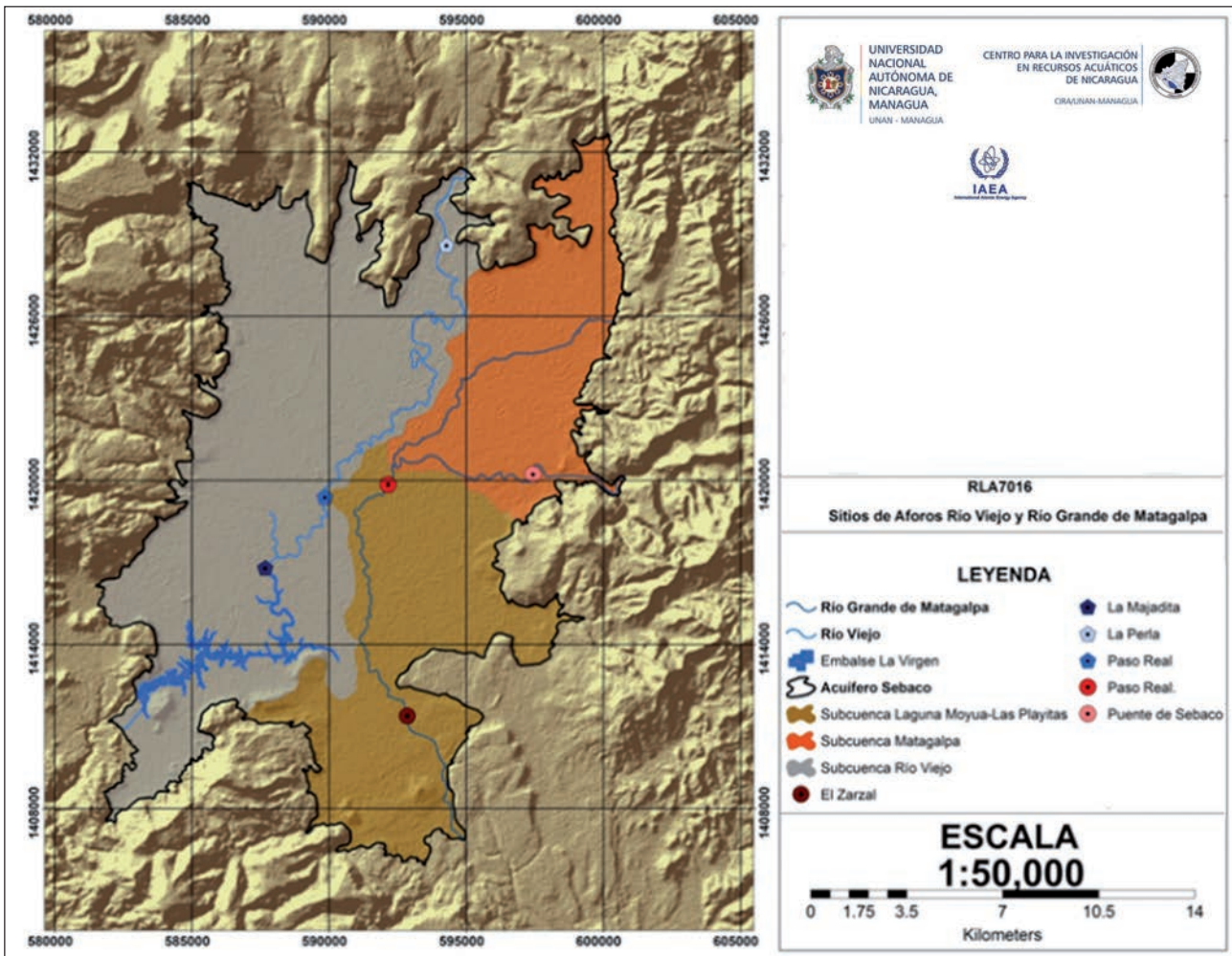


Figura 6. Sitios de Aforo en el Valle de Sébaco

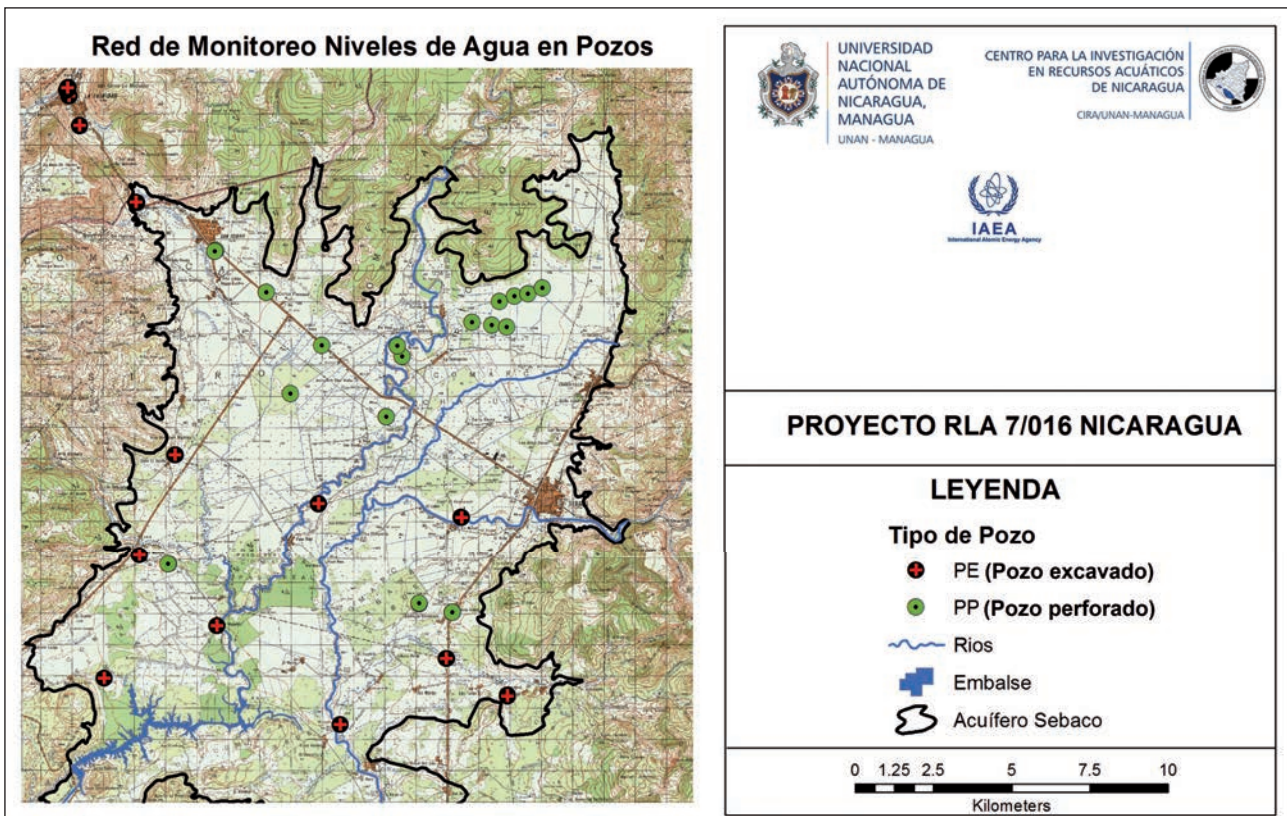


Figura 7. Red de monitoreo de pozos

**Tabla 5.** Red de monitoreo de pozos en el Valle de Sébaco, 2013

No.	Lugar	Propietario	Tipo	Este	Norte	Elev. (m)
1	San Isidro	ENACAL (Nº5)	PP	587605	1428859	488
2	San Isidro	ENACAL (Nº 7)	PP	587578	1428814	488
3	San Isidro	INATEC	PP	589217	1427504	461
4	Santa Rita-Sébaco	Samuel Mansen	PE	590875	1420759	458
5	La Central-Sébaco	José María Lira Moncada	PP	589984	1424281	467
6	El Jocote-Sébaco	Comunitario	PE	586294	1422326	473
7	Las Mangas	Hermenegildo Vílchez Lazo	PE	585153	1419088	468
8	Las Mangas	Acueducto ASOCAR	PP	586084	1418797	469
9	La Majadita	Virgilio Valdivia	PE	587631	1416807	453
10	Real de La Cruz	Vicitación Rojas	PE	584039	1415123	456
11	Sébaco	AGRICOR	PP	593054	1423539	471
12	Las Brisas del Río Viejo	Pozo comunal 1	PP	593565	1425462	479
13	Las Brisas del Río Viejo	Pozo comunal 2	PP	593403	1425792	453
14	Chagüitillo	ENACAL (S-3)	PP	596430	1426472	470
15	Chagüitillo	ENACAL (S-2)	PP	595799	1426555	472
16	Chagüitillo	ENACAL (S-4)	PP	596903	1426404	469
17	Chagüitillo	ENACAL (S-6)	PP	596679	1427218	469
18	Chagüitillo	ENACAL (S-7)	PP	597151	1427346	472
19	Chagüitillo	ENACAL (S-8)	PP	597579	1427463	471
20	Chagüitillo	ENACAL (S-10)	PE	598049	1427646	472
21	Sébaco	Berta Sánchez	PE	595447	1420326	451
22	Palos Verdes	Luis Zelaya Escalante	PE	591570	1413674	468
23	Santa Isabel	Pozo Comunal	PP	594094	1417530	463
24	Santa Isabel	Pozo Comunal	PE	595165	1417235	461
25	Quebrada Grande	Virgilio Flores Pérez	PE	594966	1415764	482
26	Apompuá	Tina Mairena	PE	596915	1414584	487
27	Santa Isabel	Pozo comunal (abandonado) 2	PP	595165	1417235	490
PP: pozo perforado			PE: pozo excavado			

Para determinar la disponibilidad hídrica en el Valle de Sébaco, se realizaron los balances hídricos superficial y subterráneo. La recarga potencial del acuífero se calculó mediante un balance hídrico de suelo, siguiendo la metodología matemática propuesta por Schosinsky y Losilla en el año 2000. Este método fue desarrollado para estimar la recarga de los acuíferos de Costa Rica. La ecuación desarrollada permite estimar la infiltración potencial (infiltración debida únicamente a la intensidad de lluvia y a la textura del suelo), integrando la interceptación de lluvia en las hojas, la infiltración básica del suelo, cobertura de la superficie y la topografía, para cada uno de estos lugares, mediante un coeficiente de infiltración. Este coeficiente, se determina mediante correlaciones de los datos obtenidos del análisis de bandas. Simplifica enormemente el procedimiento para el cálculo de la

precipitación que infiltra, la que es necesaria conocer, para determinar la recarga a los acuíferos, utilizando la infiltración básica de los suelos y la precipitación mensual de la zona. El no contar con dicha ecuación, implicaría realizar análisis diarios de las bandas pluviográficas. Esta ecuación, posiblemente puede utilizarse en algunas regiones de Centro América, donde el clima es similar (Schosinsky & Losilla, 2000).

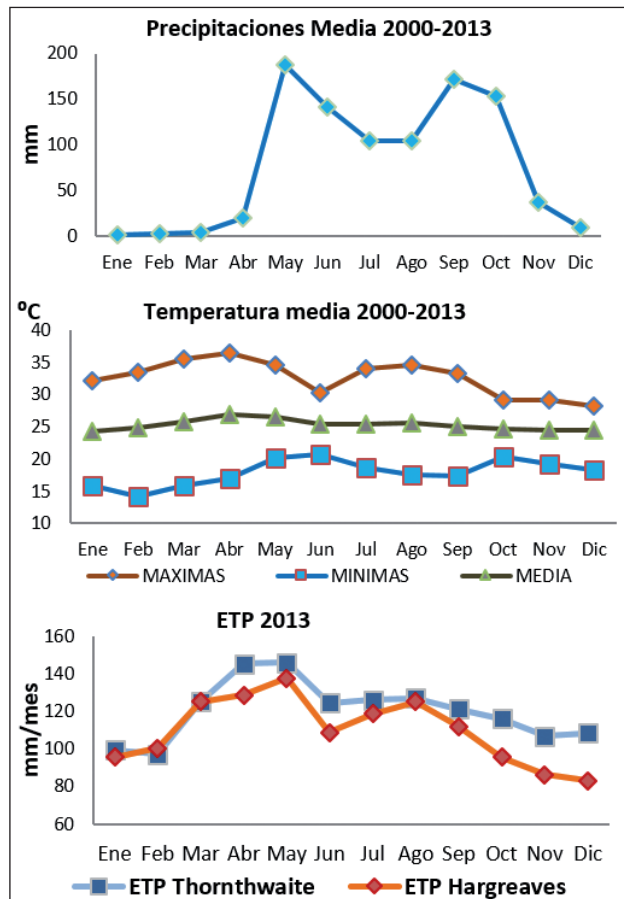
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### *Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración*

Las precipitaciones en el valle para el periodo 2000-2013, presentan una media anual de 940,59 mm; en los meses de julio-agosto se observa la disminución en la precipitación (105,10 y 104,73 mm, respectivamente).



La temperatura en el Valle de Sébaco, oscila la media entre 23 y 27°C para la serie de datos del 2000-2013, con máxima de 36,4°C para abril 2013. La evapotranspiración potencial fue calculada utilizando el método de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985), teniendo como resultado 1315,73 mm, respectivamente en el periodo 2000-2013. Los meses de marzo a junio presentan la mayor evapotranspiración potencial correspondiéndose con las mayores temperaturas (Figura 8).



**Figura 8.** Datos de precipitación media, temperatura media y ETP calculada en el periodo 2000-2013. Datos obtenidos de estación meteorológica Raúl Gonzales/San Isidro 69132

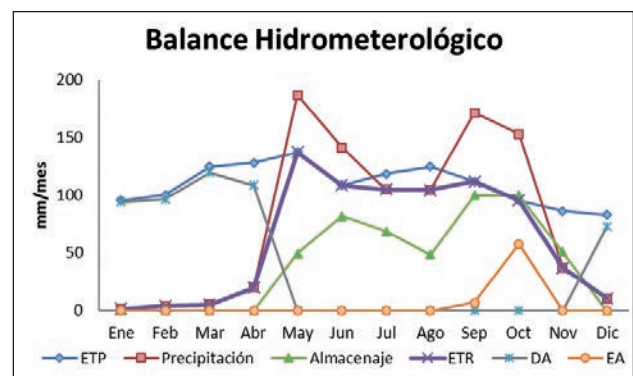
**Balance Hidrometeorológico**

Para el balance hidrometeorológico se utilizó la serie de datos de precipitación y temperatura del 2000-2013, y el valor de la ETP calculada por el método de Hargreaves. Para el cálculo de la escorrentía se utilizó la expresión matemática ( $E=(31.536 \times Q) / A$ ), que relaciona el caudal y el área de drenaje de cada microcuenca. La escorrentía esta expresada en mm/año.

En los meses de enero, febrero, marzo y abril el almacenamiento de agua es cero, debido a que las precipitaciones son prácticamente nulas.

La demanda de agua (por el tipo de suelo predominante) para estos mismos meses está en el

orden de 93 a los 125 mm; la ETP es mayor que las precipitaciones por lo cual la demanda de agua en el área de estudio tendrá que ser suplida con sistema de riego tanto de pozos como con la de los propios ríos. Los meses subsiguientes que están comprendidos en la época de mayores regímenes lluviosos (de mayo a octubre) las precipitaciones son mayores a la ETP, generando una diferencia entre estos (P-ETP) de 317,66 mm que podrán ser utilizados por las plantas, como escorrentía sub-superficial o recarga al acuífero. En este periodo la ETP es igual a la ETR, por lo que no hay excedentes ni déficits, salvo en los meses de septiembre y octubre que se sule la totalidad del almacenaje donde el agua no será infiltrada y esta se pierde por escorrentía superficial (64,7 mm). En los meses de noviembre y diciembre, en los cuales ha terminado el periodo lluvioso e inicia del periodo seco, las precipitaciones son menores a la ETP dando como resultado que la vegetación comienza utilizar el agua almacenada disminuyéndolas en un 69,82%; en el mes de octubre y en el mes de diciembre se habrán agotado las reservas existentes, iniciando la demanda de agua en 72,67mm (Figura 9).



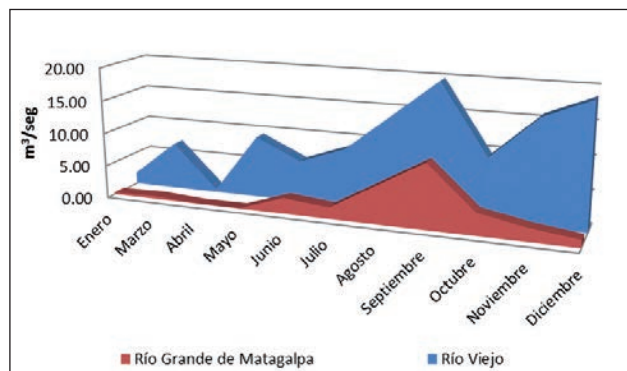
**Figura 9.** Comparación de las variables Evapotranspiración Potencial, Precipitación, Demanda Agua, Exceso de agua, Almacenaje, Evapotranspiración Real a partir de datos climáticos del periodo 2000-2013. Datos obtenidos de estación meteorológica Raúl Gonzales/San Isidro 69132. ETP: Evapotranspiración Potencial. ETR: Evapotranspiración Real. DA: Demanda de Agua. EA: Exceso de Agua.;

**Caudal Superficial**

Los sitios de afloras para el Río Viejo presentaron regímenes de escurrimiento bien definidos, con crecidas en varios meses del año de acuerdo con las precipitaciones y descarga desde el embalse de Apanás. Los caudales del Río Viejo (Figura 10) fluctúan en dependencia de la planta hidroeléctrica Centroamérica, y de las bombas instaladas en a lo largo del recorrido del río por el valle. Datos por la empresa hidroeléctrica HIDROGESA, contabilizan unas 180 a 200 bombas extrayendo agua en su mayoría para irrigar las áreas destinadas al cultivo de



arroz y en menor cantidad para las áreas destinadas a las hortalizas. El Río Viejo tiene un caudal medio anual que fluctúa de los 0,43 m<sup>3</sup>/s a los 28,47 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, en su entrada al valle (sitio La Perla) su caudal medio es de 9,17 m<sup>3</sup>/s; en la parte central en la estación de aforo Paso Real tiene 11,09 m<sup>3</sup>/s; y en La Majadita, en la entrada del embalse La Virgen, 12,66 m<sup>3</sup>/s. La diferencia de caudal medio del Río Viejo entre su entrada al valle y su salida, corresponde a 3,15 m<sup>3</sup>/s; esto se explica por los caudales generados dentro del valle producto del drenaje producido por la cuenca y de las áreas de cultivo.



**Figura 10.** Caudales medio (m<sup>3</sup>/s) del Río Viejo y Río Grande de Matagalpa, periodo 2013

El Río Grande de Matagalpa, escurre con caudales muy variados a través del año, que van de 0,02 a 9,68m<sup>3</sup>/s. La estación de aforo ubicada en Puesto de Sébaco en la entrada del Valle tiene caudales promedio 3,39 m<sup>3</sup>/s, en Paso Real de 2,11 m<sup>3</sup>/s y en El Zarzal de 1,98 m<sup>3</sup>/s. En esto destaca la reducción del caudal a cero para los sitios Paso Real y El Zarzal para los meses de marzo a mayo el cual está influido los materiales en el lecho del mismo, que permiten la infiltración (río influente o perdedor); y también las pozas realizadas por los agricultores en las orillas del río, a través de las cuales bombean agua para irrigar sus campos de cultivos (Figura 10).

**Dinámica de flujo subterráneo**

Para la determinación de la dinámica subterránea se midieron mensualmente los niveles de pozos durante un año hidrológico, desde marzo hasta diciembre del año 2013. Durante el mes de marzo se describe una descarga del agua subterránea hacia la parte central del valle en dirección al embalse La Virgen (Figura 11a). Para el mes de abril 2013 es evidente la influencia del bombeo con una disminución del nivel freático de 10m en el área del Río Grande de Matagalpa y en el norte del valle. En el campo de pozos de ENACAL en Chagüitillo, se registró un descenso de 36,26 metros (abril 2013). La descarga se realiza principalmente en dirección al Río Grande de Matagalpa (Figura 11b). Durante el mes de mayo 2013 se intensifica el bombeo. Se produce recarga

desde el embalse La Virgen a los pozos cercanos (Figura 11c). En junio 2013 puede verse la influencia de la recarga desde las partes altas, los niveles freáticos aumentan hasta 10m en las cercanías de San Isidro y cerca de la entrada de los ríos. Las curvas piezométricas se suavizan describiendo un flujo horizontal de agua (Figura 11d). Con *La Canícula* (de julio a agosto), se observaron descensos desde 14,80 hasta 20,23 metros en San Isidro, donde se localizan la mayoría de los pozos de explotación para riego de arroz. Los meses de septiembre a diciembre 2013, los pozos familiares se comportan de la misma manera, respondiendo directamente a la recarga por precipitación aumentando en 5m el nivel freático en el centro del valle (Figura 11e). En Chagüitillo, el nivel descendió hasta 27,01 m (octubre 2013).

**Balance Hídrico y Disponibilidad en el Valle de Sébaco**

El Balance Hídrico de una cuenca, se basa en el cálculo de las entradas y salidas del agua durante un período de tiempo determinado, así como también del almacenamiento al inicio y al final del periodo. La ecuación general es la siguiente:

$$\Sigma Entradas - \Sigma Salidas = \Delta Almacenamiento$$

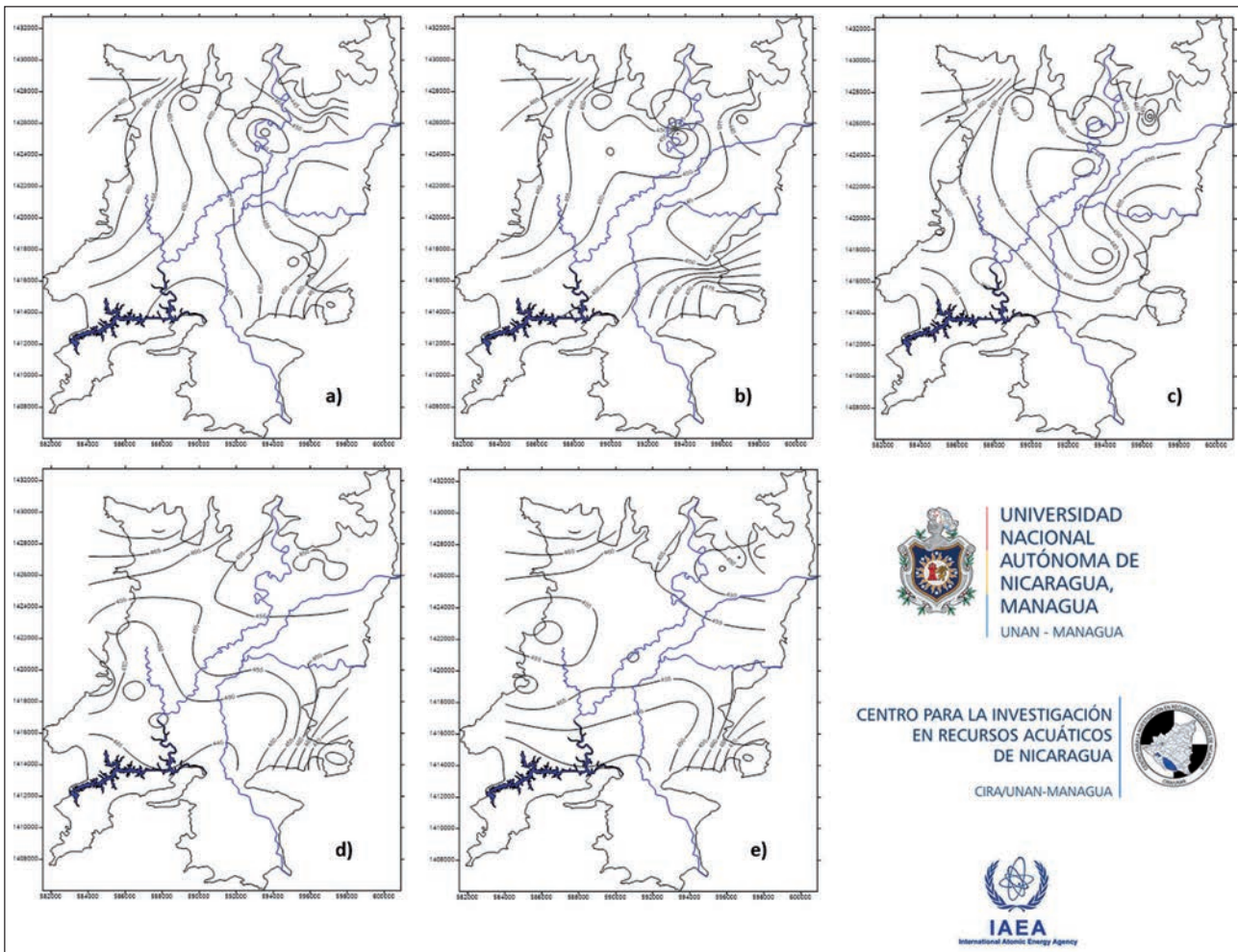
Donde la **ΣEntradas** comprende: la recarga potencial, el retorno por bombeo de ríos y pozos, y la recarga por los lechos de los ríos. La incluye: el bombeo del acuífero para suministro de consumo humano e irrigación, y de los ríos.

**Recarga potencial**

La recarga potencial fue calculada por balance hídrico de suelo, siguiendo la metodología matemática propuesta por (Schosinsky & Losilla , 2000), en la cual se toman condiciones del medio como son tipo de suelo, vegetación, precipitación, pendiente, infiltración básica, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real. El balance de suelo indica una recarga de 11 Mm<sup>3</sup>/año para el valle (Tabla 6). La recarga ocurre en las márgenes noroeste, oeste y sureste del mismo.

**Tabla 6.** Recarga Potencial, por balance hídrico de Suelo en el Valle de Sébaco 2013. Método (Schosinsky & Losilla , 2000).

Tipo de suelo	Recarga Potencial (mm)	Área (Km <sup>2</sup> )	Rp ( Mm <sup>3</sup> /año)
Vertisol	0,00	152,46	0,00
Inceptisol	0,17	30,31	5,20
Entisol	0,21	3,65	0,78
Alfisol	0,29	17,57	5,03
Molisol	0,00	79,65	0,00
Total			11,00



**Figura 11.** Niveles freáticos en el Valle de Sébaco.  
 a) marzo 2013; b) abril 2013; c) mayo 2013; d) junio 2013; e) de julio-diciembre 2013.

*Recarga por retorno de extracciones de pozos y ríos*

Los datos obtenidos de extracción por bombeo de pozos fueron obtenidos de fuentes secundarias, las cuales dan un estimado de las extracciones reales que se dan dentro del valle. De la escorrentía del Río Viejo que fluye en el tramo comprendido dentro del Valle de Sébaco, se extraen unos 64 Mm<sup>3</sup> para riego de arroz y hortalizas, esencialmente; mientras que del Río Grande de Matagalpa se extraen unos 2.7 Mm<sup>3</sup> para el mismo fin. De todos los pozos del valle, se estima una extracción de 6,09 Mm<sup>3</sup> para el suministro de agua potable para consumo humano, y de 73,49 Mm<sup>3</sup> para irrigar los cultivos.

La recarga generada por el retorno por bombeo (Tabla 7) tanto de ríos como por pozos para la irrigación, se estimó en base al 15% de las extracciones realizadas. Se tiene que las extracciones de ríos 10,00 Mm<sup>3</sup>. De las extracciones por pozos sólo se calcula el retorno en base al riego agrícola ya que no se conoce cuáles son las pérdidas por filtraciones en el sistema de distribución de agua para consumo humano, de esto se tiene que 11,02 Mm<sup>3</sup> que retorna por infiltración. El retorno puede ocurrir tanto por infiltración de río como de los campos de irrigación.

**Tabla 7.** Extracciones por bombeo de pozos y ríos para irrigación, y cálculo de la recarga por retorno de dichas extracciones.

Detalle	Extracción (MMC/Año)	Área Regada (Km <sup>2</sup> )	Total recarga de Retorno (Mm <sup>3</sup> /año)
Extracción Bombeo en pozos	73,49	174,73	11,02
Extracción Bombeo Río Viejo	64	61,5	9,6
Extracción Bombeo Río Grande de Matagalpa	2,7	-	0,40
Total			21,02

**Recarga por infiltración de los Ríos Viejo y Grande de Matagalpa**

La recarga producida por los ríos se realizó partiendo de su carácter de influentes y que ambos atraviesan todo el valle. Por las estaciones de aforo se conoció la dinámica de flujo que predomina en los ríos; por los

materiales predominantes en ambos ríos (bolones y arena gruesa) se obtuvo un coeficiente de infiltración de 0,2. El cálculo se obtiene en base a 702,47 Mm<sup>3</sup> que escurren tanto el Río Viejo como Río Grande de Matagalpa. Lo que da una recarga total de 139,75 Mm<sup>3</sup> anuales (Tabla 8).

**Tabla 8.** Recarga por infiltración de Ríos Viejo y Grande de Matagalpa

Sitio	Longitud (km)	Ancho (km)	Recarga por infiltración en Río (Mm <sup>3</sup> )	Recarga Total (Mm <sup>3</sup> /año)
Río Viejo	40,38	0,03	107,41	130,12
Río Grande de Matagalpa	29,10	0,01	33,08	9,63
			<b>Total</b>	<b>139,75</b>

**Balance Hídrico**

De los ingresos al sistema se obtienen 171,78 Mm<sup>3</sup> procedentes en su mayoría de la recarga por los Ríos Viejo y Grande de Matagalpa, producto que estos han: a) excavado la capa superficial de arcilla, b) han llegado a capas donde ésta es más reducida o c) llegado a capas de mayor permeabilidad aumentando la infiltración y por ende la recarga, de lo cual fue mucho mayor que la recarga potencial por infiltración de lluvia; ésta es influida notablemente por la evapotranspiración potencial y el tipo de suelo predominante en el valle.

Las salidas cuantificadas tanto por bombeo de pozos para irrigación y para consumo humano, y propiamente del bombeo de ambos ríos fue cuantificada en 146,28 Mm<sup>3</sup> anuales. Cabe mencionar que los valores de extracción se obtuvieron de información secundaria, la cual nos da solo un estimado de las extracciones reales en el valle; de lo cual se tiene un excedente disponible en el valle de 25,50 Mm<sup>3</sup> (Tabla 9).

**Tabla 9.** Balance Hídrico Valle de Sébaco

<b>Entradas</b>	<b>Mm<sup>3</sup></b>
Recarga potencial (Rp)	11,00
Retorno Bombeo Río Viejo	9,6
Retorno Bombeo Río Grande de Matagalpa	0,40
Retorno Bombeo de pozos	11,02
Recarga por lechos de Ríos	139,75
<b>Total</b>	<b>171,78</b>
<b>Salidas</b>	<b>Mm<sup>3</sup></b>
Bombeo pozos (consumo humano)	6,09
Bombeo Río Viejo	64,00
Bombeo Río Grande de Matagalpa	2,70
Bombeo en Pozos (irrigación)	73,49
<b>Total</b>	<b>146,28</b>
<b>Disponibilidad (ΔV)</b>	<b>25,50</b>

**4. CONCLUSIONES**

En los meses de enero, febrero, marzo y abril las precipitaciones en el valle son mínimas y la ETP es mayor (correspondiéndose con las mayores temperaturas), por lo que el almacenamiento de agua es cero y la demanda tendrá que ser suplida con los sistemas de pozos y bombeo de ríos. En los meses de mayo a octubre, las precipitaciones son más abundantes por lo que habrá una recarga al acuífero, con excepción de los meses de septiembre y octubre en donde el excedente se perderá como escorrentías superficiales.

Los caudales del Río Viejo dependen de la descarga de la planta hidroeléctrica Centroamérica y de la extracción que realizan las bombas instaladas a lo largo del río. El ligero incremento de caudal del Río Viejo a su entrada en el Valle de Sébaco con respecto a su salida, es producido por el drenaje de la cuenca y las áreas de cultivo. En cuanto al Río Grande de Matagalpa, los caudales son muy variados durante el año, debido a la recarga por infiltración y a la irrigación de cultivos; reduciéndose a cero en la parte media y a la salida del río en el valle en los meses de marzo a mayo.

Los descensos en los niveles de agua van desde 3,46 a 15,43 m en los pozos familiares y/o comunales para el mes de abril, de finalización del verano. En el caso de los pozos de ENACAL para suministro de agua potable a la población, en San Isidro (en el norte del valle, en donde se localizan la mayoría de los pozos de producción) se observan descensos van desde 14,80 a 20,23 m (julio 2013, que se corresponde con *la canícula*): y en los pozos de ENACAL Chagüitillo de 27,01 m (octubre 2013) a 36,26 m (abril 2013).

La actualización hidrogeológica indica un cambio en la dirección del flujo subterráneo y la disminución en los niveles de agua del acuífero, conforme la estación del año. La mayor explotación subterránea se localiza en el centro del valle, en donde se encuentran ubicados los pozos de explotación agrícola, y en el campo de pozos de Chagüitillo, utilizado para el suministro de la población de la ciudad de Matagalpa.



La recarga por retorno por bombeo de los pozos es similar a la recarga potencial por precipitación. La recarga efectiva al acuífero es a través de las contribuciones por infiltración de los lechos de los ríos, principalmente del Río Viejo a través de las descargas de la planta Centroamérica.

La mayor extracción en el valle se realiza por el bombeo de los pozos para irrigación (73,49 Mm<sup>3</sup>), y sólo 6,09 Mm<sup>3</sup> se extrae del acuífero para consumo humano; por lo que la explotación del agua subterránea ha sobrepasado la recarga directa por precipitación, y por ende lo que se está extrayendo es parte de las reservas del acuífero, complementada con el bombeo de los ríos y el retorno por riego.

En 2002, se concluyó que para minimizar el rebajamiento del acuífero se debe mantener la explotación actual de 72 Mm<sup>3</sup>; cifra que en el 2013 es 2,03 veces mayor (146,28 Mm<sup>3</sup>); por lo que se recomienda disminuir los volúmenes de explotación e implementar medidas de protección y recuperación del recurso hídrico, debido a que el volumen disponible (25,5 Mm<sup>3</sup>) equivale a un 17.43% del volumen total de agua (superficial y subterránea) considerada como salidas del balance hídrico.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al Organismo Internacional de Energía Atómica, a través del Proyecto RLA/7/016 "Empleo de isótopos para la evaluación hidrogeológica de los acuíferos excesivamente explotados en América Latina (CXXVII)". Informe de Nicaragua: "Balance Isotópico e Hidrogeológico del Acuífero del Valle de Sébaco, Nicaragua".

A Catholic Relief Services (CRS), por su colaboración en la realización de este estudio; en especial a los Ingenieros Juan Adrián Riveray Ariel Espinoza, por su acompañamiento durante las campañas de monitoreo mensual y muestreo realizadas para la ejecución de este estudio.

A la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), delegación departamental de Matagalpa, por su colaboración al permitirnos monitorear los campos de pozos Chagüitillo y Santa Isabel, que proveen el suministro potable para consumo humano de Matagalpa y Ciudad Darío, respectivamente. Así como también del campo de pozos de San Isidro, que abastece al municipio de San Isidro.

Al personal del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), en especial a todo el personal del **Laboratorio de Hidrogeología**, quienes realizaron

todas las actividades de campo, monitoreo mensual, muestreo hidroquímico e isotópico, así como la redacción del informe. Al MSc. Yader Caballero del Laboratorio de Radioquímica Ambiental por su colaboración durante el muestreo isotópico; al Laboratorio de Aguas Naturales y Aguas Residuales por los análisis hidroquímicos de las muestras de agua, y al Laboratorio de Contaminantes Orgánicos por la custodia de las muestras isotópicas.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Flores Meza, Y. 2004. *Criterios Hidrogeológicos para la Formulación del Plan de Gestión en el Acuífero del Valle de Sébaco*. Managua: Tesis de Maestría.

González Tapia, R. M. 2004. *Estudio sobre la calidad del agua y peligro de contaminación de los pozos de abastecimiento público, ríos Viejo y Grande de Matagalpa en el Valle de Sébaco, Matagalpa*. Managua: Tesis de Maestría.

Hargreaves, G., & Samani, Z. 1985. *Crop evapotranspiration from ambient air temperature*. American Society of Agricultural Engineers.

INETER. 2009. *Proyecto "Red Hidrogeológica Nacional"*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Departamento de Hidrogeología. Managua: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

INETER. 2012. *Proyecto "Red Hidrogeológica Nacional"*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Departamento de Hidrogeología. Managua.

Köppen, W. 1936. *Updated Köppen-Geiger climate map of the world*. Obtenido de The University of Melbourne: <http://people.eng.unimelb.edu.au/mpeel/koppen.html>

MARENA-PNUD. 2000. *Evaluación de la vulnerabilidad y adaptación de los recursos hídricos de Nicaragua ante el cambio climático*. Managua.

Plata, A. 1988. *Hidrología Isotópica del Acuífero Aluvial del Valle de Sébaco. Proyecto NIC/8/002*. Viena: Sección de Hidrología Isotópica, Organismo Internacional de Energía Atómica.

Red IANAS y FCCyT. 2012. *Diagnóstico del Agua en las Américas*. México.

Schosinsky, G., & Losilla, M. 2000. Modelo Analítico para Determinar la Infiltración con Base en la Lluvia Mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23: 43-55,.

Tahal, C. E. 1977. *Estudio Hidrológico del Valle de Sébaco*. Managua.

## ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS PARA PROTEGER LA VIDA ACUÁTICA: EL RÍO SONORA DESPUÉS DEL DERRAME MINERO DE 2014

### ANALYSIS OF CRITERIA TO PROTECT AQUATIC LIFE: THE SONORA RIVER AFTER THE 2014 MINING SPILL

Díaz Caravantes, Rolando E.<sup>1</sup>; Duarte Tagles, Héctor<sup>2</sup>; Pallanez Murrieta, Maribel<sup>2</sup>; Moreno Vázquez, José Luis<sup>1</sup>; Mejía Santellanes, Javier Alberto<sup>1</sup>; Durazo Gálvez, Francisco<sup>2</sup>

#### Resumen

Cuando los sistemas de agua se contaminan, la seguridad hídrica se ve seriamente amenazada. Un caso reciente es el derrame de 40,000 metros cúbicos de lixiviado ácido vertidos al río Sonora, México, el 6 de agosto del 2014. Lamentablemente, los estudios acerca de los ecosistemas acuáticos después de este evento son numéricamente limitados.

De esta insuficiencia de investigaciones se desprende el objetivo de analizar los casos de muestreos de calidad de agua superficial que cumplan o estén fuera de los criterios de protección a la vida acuática de acuerdo con los registros de la base de datos del monitoreo del Fideicomiso Río Sonora.

Para lograr esto, se realizó una revisión de la literatura sobre la calidad del agua en el río Sonora. Aunque desde el 2012 existe una norma mexicana para el caudal ecológico, ésta es de carácter voluntario y además no presenta una guía detallada respecto de la calidad de agua necesaria para la protección a la vida acuática. Puesto que en la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales* sí se especifican estos valores, acudimos a ésta para comparar los registros de los muestreos de agua superficial para los 38 sitios observados durante el período agosto 2014-septiembre 2015. Con dicha información se constituyó una base de datos de la cual se obtuvieron frecuencias por mes y por sitio para cada uno de los parámetros de estudio. Finalmente se mapearon los sitios de muestreo con la frecuencia obtenida durante el período estudiado.

Entre los resultados, en primer lugar señalamos que en la base de datos se encontró una nomenclatura: NE (análisis no efectuado), cuyo significado e implicaciones no se especifican en la página del Fideicomiso. En el trabajo también se indica que en dicha ley existen dos conjuntos de criterios de calidad de agua: los lineamientos para determinar a qué usuario se puede exceptuar del pago de derechos de agua nacionales, y los límites máximos permisibles, que señalan los valores para exceptuar la obligación del pago de derecho de las descargas de aguas residuales. Los umbrales de los lineamientos son más rigurosos que los límites máximos y por esta razón existe un número considerablemente mayor de casos que exceden el criterio de éstos, en comparación con los límites máximos permisibles. Aun con la relevancia que puedan tener estos hallazgos para el diseño de una adecuada protección a la vida acuática, este ejercicio académico tiene sus límites, ya que los criterios de calidad del agua de la citada ley tienen un objetivo eminentemente recaudador.

**Palabras clave:** calidad del agua, protección de la vida acuática, río Sonora.

#### Abstract

When water systems become contaminated, water safety is seriously threatened. A recent case is the spill of 40,000 cubic meters of acid leachate discharged into the Sonora River, Mexico, on August 6, 2014. Unfortunately, studies about aquatic ecosystems after this event are scarce.

This lack of research reveals the importance of analyzing cases of surface water quality samples that comply or not with the criteria for aquatic life protection according to the records of the monitoring database of the *Fideicomiso Río Sonora*.

To achieve this goal, we conducted a review of the literature on water quality in the Sonora River. The 2012 Mexican standard for ecological flows is not mandatory and it does not either provide a detailed guidance on the quality of water suitable for the protection of aquatic life. Since this guidance is included in the federal law: *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*, we use it to compare the data of surface water samples for the 38 sites observed during the period from August 2014 through September 2015. We created a database from information about monthly frequencies per sites for each of the study parameters. Finally, the sampling sites were mapped using the frequency obtained during the period under study.

As an underlying result, we found a two-letter symbol in the database without a specified meaning or implications of this category on the webpage of the *Fideicomiso Río Sonora*: NE (analysis not performed). In this work, we also remark that this federal law provides two sets of criteria: the guidelines, which are set to determine who can be exempted from payment of national water rights, and the maximum permissible limits, which indicate the values under which anyone would be exempted of paying fees and rights for wastewater discharges. The thresholds of the guidelines are more rigorous than the maximum permissible limits and, for this reason, there is a greater number of cases that exceed this former criteria as compare to the maximum permissible limits. In spite of the relevance that these findings may have for the protection of aquatic life, this academic exercise has its limitations, since the water quality criteria of this law is for tax collection purposes.

**Key words:** water quality, water protection of aquatic life, Sonora River

<sup>1</sup> El Colegio de Sonora. México. rdiaz@colson.edu.mx;

<sup>2</sup> Universidad Estatal de Sonora. México. hector.duarte@unison.mx;

## 1. INTRODUCCIÓN

El 6 de agosto de 2014, la mina Buenavista del Cobre derramó alrededor de 40,000 metros cúbicos de lixiviado ácido a uno de los arroyos que alimenta al río Bacanuchi, afluente a su vez del río Sonora. Reportes de dependencias federales indican que el derrame fue causado por la falla de un amarre en un tubo de polietileno en una de las piletas de lixiviados, así como por la falta de una válvula en la piletta de demasías (SEMARNAT, 2014).

A raíz de este evento, el 15 de septiembre de 2014 se conformó el Fideicomiso Río Sonora, cuya finalidad es atender las consecuencias del derrame. Este fideicomiso creó un portal electrónico accesible a través de internet, en el que se presenta la información oficial sobre las acciones que se han implementado para atender el problema de la contaminación del río Sonora derivado del derrame, entre éstas el monitoreo de calidad del agua (SEMARNAT, 2015). De la base de datos de monitoreo de agua subterránea se han desprendido algunos análisis que comparan los valores de la calidad del agua con la normatividad oficial mexicana, respecto al agua potable, NOM 127-SSA1-1994 (DOF, 2000) y las guías sugeridas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011).

El impacto de la calidad del agua en la salud humana es de suma importancia. Sin embargo, el estudio de la protección a la vida acuática es también fundamental ya que, como algunos estudiosos de la relación entre el agua y los ecosistemas afirman, la visión conceptual dominante en la sociedad moderna considera a los ecosistemas de agua dulce como recursos que deben ser explotados para el crecimiento económico, y no reconoce ni especifica las necesidades de agua por parte de la naturaleza (Postel & Richter, 2003); razón por la cual, estos autores reclaman un cambio hacia una nueva mentalidad, que haga de la preservación de la salud del ecosistema un objetivo explícito del desarrollo y la gestión del agua.

El objetivo de investigación del presente trabajo se centró en analizar si la calidad del agua superficial del río Sonora, después del derrame, cumple con los criterios para la protección de la vida acuática establecidos por la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Para este fin, se confrontaron los valores reportados por el Fideicomiso Río Sonora (período agosto 2014- septiembre 2015) con los criterios de calidad del agua disponibles en dicha ley.

El artículo presenta, en la sección de antecedentes, una revisión de los estudios documentados acerca de los impactos de la actividad minera sobre la calidad del agua en la cuenca del río Sonora. Posteriormente se describen los materiales y métodos utilizados para este estudio: 38 sitios de muestreo de agua

superficial de 19 parámetros reportados durante el período de Agosto de 2014 a Septiembre de 2015, y la mencionada ley con sus criterios de calidad del agua: "Lineamientos de Calidad del Agua" (LCA) y "Límites Máximos Permisibles" (LMP) (SEMARNAT, 2016). A continuación, se presentan los resultados de la comparación de los valores de calidad del agua y los criterios de esta ley, primero contrastado con los LCA, seguido de la comparación con los LMP. Finalmente se discuten los hallazgos y se examinan los alcances y limitaciones que tiene el actual marco legal mexicano, con el fin de asegurar la calidad del agua necesaria para proteger la vida acuática, y buscando que éste se convierta en una herramienta más integral y no sólo con fines recaudatorios.

## 2. ANTECEDENTES

En el 2012 se emitió la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 "Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas" (DOF, 2012). De acuerdo con esta norma, el caudal ecológico: "[e]s la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales" (DOF, 2012).

El hecho de que se incluya la calidad del agua dentro de la definición de caudal ecológico es de suma importancia, porque los servicios ambientales hidrológicos que suministran las cuencas sostienen beneficios relacionados con la provisión del agua, la regulación de los flujos pluviales, la purificación del agua, la regulación de la erosión, etcétera. Beneficios que sólo pueden proveerse bajo condiciones de un buen funcionamiento ecosistémico de la cuenca, lo que incluye la interacción adecuada de los procesos naturales y sociales implicados en la misma (Madrid, 2011, p. 53).

No obstante esta relevancia, las metodologías enfocadas al estudio de los caudales ecológicos indicadas en la norma NMX-AA-159-SCFI-2012: hidrológicas, de simulación de hábitat y holísticas, están enfocadas principalmente en determinar la cantidad de agua necesaria para mantener los ecosistemas, mientras el tema de la calidad del agua es escasamente abordado: solamente en una de las seis metodologías, la holística, es considerada la calidad del agua, y esto sin llegar a un nivel de detalle que sirva como guía práctica (DOF, 2012)<sup>3</sup>.

La ley que sí permite cierto nivel de especificidad sobre el tema, aunque no con el fin de determinar el caudal ecológico, sino para la recaudación fiscal, es la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Es esta ley la que utilizaremos para nuestro ejercicio académico, como se verá más adelante.

3 Además, el cumplimiento de dicha norma mexicana es de ámbito primordialmente voluntario. Esto se manifiesta en su nomenclatura NMX, pues las normas oficiales mexicanas llevan la nomenclatura NOM, y son de carácter obligatorio.



Los impactos generados por la actividad minera en los ambientes dulceacuícolas ilustran la importancia de vigilar no solo la cantidad, sino también la calidad del agua necesarios para la salud de los ecosistemas. Estos impactos en la cuenca del río Sonora han sido estudiados por Gómez y colaboradores (1990, 1993), quienes determinaron la concentración de metales pesados en el agua y en los sedimentos, relacionada con los vertimientos e infiltraciones de desechos ácidos provenientes de la entonces denominada Compañía Minera de Cananea S.A. Los contaminantes, incluidos metales, con los niveles más altos, detectados en el agua de los ríos Sonora y Bacanuchi fueron cobre, plomo, zinc, hierro, manganeso y sulfatos, cuyas concentraciones excedieron los valores máximos permisibles. En la presa Abelardo L. Rodríguez, las concentraciones de metales fueron inferiores a estos valores. En cuanto a los sedimentos, en las estaciones de muestreo más cercanas a los represas de desechos ácidos de la empresa minera, se encontraron concentraciones altas de cobre, hierro y manganeso.

Posteriormente, un estudio del Instituto Tecnológico de Sonora (2008) determinó una concentración elevada, y por encima de la norma, de hierro y manganeso en el agua superficial y subterránea de la cuenca alta y media, sobre todo al finalizar el periodo de lluvias. Además, se analizaron siete metales pesados en flora, fauna y sedimentos en cinco sitios seleccionados en el cauce del río Sonora. Respecto a flora y fauna acuática, el fierro presentó la concentración más alta en el puente La Junta, y en cuanto a sedimentos, el mismo metal en el Rancho Ojo de Agua (cerca de la presa de jales de Buenavista del Cobre) y en la presa El Molinito (cerca de la ciudad de Hermosillo), es decir, en la parte alta y baja de la cuenca, respectivamente.

Sobre la calidad del agua y la distribución de metales pesados en la presa Abelardo L. Rodríguez y su relación con la influencia de la zona urbana e industrial de la ciudad de Hermosillo, Gómez y colaboradores (1997) concluyeron que los contenidos de hierro, níquel y manganeso excedieron los límites permitidos, por lo que el agua de la presa no era adecuada para el abastecimiento de agua potable. En cuanto a los sedimentos, Villalba y colaboradores (1997) observaron que el contenido de los nueve metales analizados fue comparable con lo reportado en otros ríos que han sido considerados como contaminados. Asimismo, Gómez y colaboradores (1997) encontraron metales pesados en la población de tilapia en la citada presa. Por último, Gómez y colaboradores (2011), reportaron altos niveles de metales pesados en los sedimentos de la presa, contaminados por cadmio, cobre y plomo, y severamente contaminados por fierro.

Por otra parte, se han realizado otros estudios para identificar la influencia de la actividad minera y las descargas de aguas negras de la ciudad de Cananea sobre la calidad del agua superficial en la cuenca

del río San Pedro, que se comparte con Estados Unidos. Gómez y colaboradores (2004) observaron valores elevados de algunos metales pesados (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn), conductividad eléctrica y sulfatos, así como valores bajos de potencial de hidrógeno (pH) en las estaciones de muestreo más cercanas a la explotación minera (depósito de la concentradora vieja). Dichos valores fueron superiores a los máximos permitidos establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua de 1989 (DOF, 1989). Esta contaminación ha ocasionado problemas a nivel internacional, con el vecino estado de Arizona, ya que los desechos ácidos llegaron al río Gila provocando una gran mortandad de peces. Recientemente, Gómez y colaboradores (2014) concluyeron que los valores anteriores también exceden los máximos permitidos en los Criterios de Calidad del Agua de la EPA de 1986. Estos resultados son importantes porque el río San Pedro representa la fuente principal de agua para las ciudades situadas a lo largo de su cauce, incluyendo el agua que es usada para la agricultura y la ganadería en la frontera México-Estados Unidos. Recomendaron al gobierno federal y estatal promover la construcción de una planta tratadora de aguas residuales en Cananea.

Después del derrame de agosto de 2014, tres trabajos han analizado la calidad del agua y otros componentes ambientales en el río Sonora. Gutiérrez y Romero (2015) concluyeron que: a) el agua superficial afectada con el derrame ácido ya se había neutralizado ocho días después del accidente y a los tres meses las concentraciones de metales totales —con excepción del Al, Fe y Mn que están formando coloides en suspensión—, eran menores a los límites señalados en la NOM-127 para agua potable (DOF, 2000); b) las concentraciones de Al, Fe y Mn fueron similares a las reportadas para los cuerpos de agua de la región antes del accidente; y c) se ha informado la presencia de Fe, As, Mn, Pb y V en sedimentos, relacionada con anomalías naturales y, posiblemente, con la minería histórica, cuya influencia debe ser tomada en cuenta. Las fuertes precipitaciones ocurridas en la zona fueron un factor que favoreció la difusión y dilución de los contaminantes, mientras la construcción de una barrera y la adición de cal a los cuerpos afectados —actividades realizadas por la compañía minera—, contribuyeron a la contención del agua acidificada, al aumento rápido del pH y a la precipitación de los metales solubles.

Por su parte, el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad del Instituto de Ecología de la UNAM (2016), concluyó que las evidencias concretas de daño al ambiente dentro de la fase crónica exacerbada son: a) alteración adversa del estado base de los ecosistemas, que se manifiesta en las concentraciones de metales pesados mayores a los valores de fondo en suelo y sedimento en el río Bacanuchi, a seis meses y un año después del derrame, y el patrón de concentraciones máximas de

metales pesados que se trasladan de norte a sur a lo largo del cauce del río Bacanuchi y del río Sonora, durante un período de 70 días posteriores al derrame; b) afectación adversa al hábitat acuático, que se manifiesta en el cambio de la estructura poblacional de especies de peces endémicas y amenazadas; el cambio en la estructura poblacional se observa con la ausencia de estadios juveniles un año después del derrame; y c) deterioro de los ecosistemas ribereños, que se manifiesta en la alta mortalidad de árboles ribereños sobre el arroyo Tinaja 1, a 13 km al sur del represo Tinajas, un año después del derrame.

A su vez, mediante el análisis de la base de datos del monitoreo del agua subterránea reportados por el Fideicomiso Río Sonora en su página de internet, Díaz Carvantes y colaboradores (2016) detectaron la falta de consistencia en la captura de datos del monitoreo implementado desde que ocurrió el derrame. En la base de datos, durante seis meses, de enero a junio de 2015, no hay registros de muestreo alguno; además, por un período de tres meses, de julio a septiembre de 2015, no se observan valores numéricos para la mayoría de los metales estudiados, sino solamente la abreviatura "NE", cuyo significado no se especifica en la página de internet; asimismo, la frecuencia de captura varía para ciertos parámetros en días, semanas y hasta meses, como es el caso de sulfatos, turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica, pH y temperatura. No obstante la falta de consistencia de esta base de datos, los autores

destacan que utilizando la guía de la Organización Mundial de la Salud para el caso del arsénico (0.01 mg/L) en lugar de la norma mexicana NOM 127-SSA1-1994 (0.025 mg/L), este elemento rebasó el límite de la guía en 120 ocasiones, principalmente en la parte baja de la cuenca del río Sonora.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Sonora se localiza en el noreste-centro de Sonora, México, con un área total de 30,913 kilómetros cuadrados, cerca del 15% del área estatal. El gradiente altitudinal de la cuenca va desde 2,620 msnm en las partes altas hasta 0 msnm en la costa (CONAGUA, 2013). La precipitación media anual de la cuenca es de 376 mm (Romo et al., 2014). El río Sonora fluye hacia el suroeste, primero hacia la presa Rodolfo Félix Valdéz (El Molinito), con una capacidad de almacenamiento de 150 hm<sup>3</sup>, y 23 km después, hacia la presa Abelardo L. Rodríguez, adyacente a la ciudad de Hermosillo con una capacidad de almacenamiento de 219.5 hm<sup>3</sup> (Romo et al., 2014). De acuerdo a información hidrométrica de la estación El Orégano, el río Sonora ha pasado de un flujo perenne, en 1960-1995, a un régimen efímero, de 1995 a 2015 (CONAGUA, 2013). En esos dos períodos, el escurrimiento anual disminuyó de un promedio de 134 hm<sup>3</sup> del período 1960-1995 a 34 hm<sup>3</sup> en el posterior.

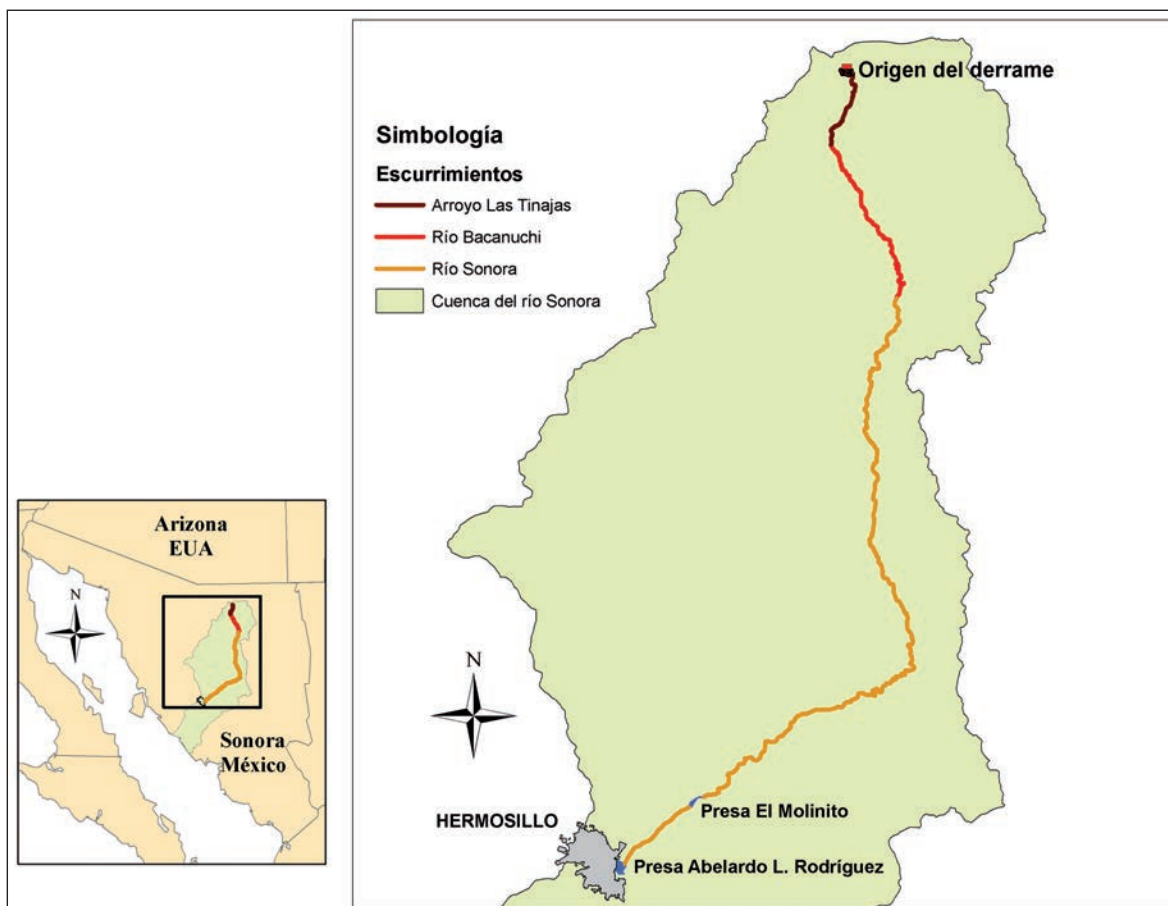


Figura 1. Recorrido del derrame en el río Sonora

La Figura 1 ilustra la ruta del derrame de la mina Buenavista del Cobre el 6 de agosto del 2014. Este empezó en el represo mostrado como 'Origen del derrame' desde donde se trasladó cerca de 22 kilómetros por el arroyo Las Tinajas, fluyendo cerca de 58 kilómetros dentro del río Bacanuchi hasta encontrarse con el río Sonora, dentro del cual recorrió 206 kilómetros hasta llegar a la presa El Molinito.

La fragilidad ecológica del río Sonora tiene implicaciones mayúsculas, ya que se sitúa en una región semiárida y suele ser la única fuente de agua superficial para los organismos acuáticos y terrestres, además de ser la fuente primaria para las actividades productivas (Bogan et al., 2014, p. 2705). A pesar de que el río Sonora se encuentra en los límites de distribución de especies boreales y neotropicales que sugieren una alta biodiversidad, la abundancia y riqueza de sus especies ha sido poco estudiada. Uno de los trabajos pioneros en la zona determinó la existencia de al menos ocho órdenes, 34 familias y 30 géneros de insectos acuáticos; además de una ictiofauna mayormente representada por las especies *Agosia chrysogaster*, *Catostomus wigginsi* y *Poeciliopsis occidentalis* (Chávez et al., 1989, p. 21), especies endémicas que actualmente se encuentran listadas como amenazadas y bajo régimen de protección según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010). En 2013 se presentaron los resultados de una investigación de la ictiofauna en el río Sonora, cuyos hallazgos mostraron que las especies arriba mencionadas como sujetas a protección especial, presentan una alta tolerancia a los factores ambientales de sequía y lluvia, siendo incluso más abundantes durante el período de estiaje (Chávez et al., 2013, p. 258).

#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se analizó la base de datos del monitoreo de la calidad del agua que aparece en el portal electrónico del Fideicomiso Río Sonora (SEMARNAT, 2015), con el fin de examinar los resultados de los 38 sitios de muestreo superficial de cada uno de los 19 parámetros reportados durante el período de Agosto de 2014 a Septiembre de 2015 (aproximadamente un año después del derrame). Los parámetros reportados durante ese período son: aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio, níquel, plomo, zinc, sulfatos, turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica, pH y temperatura.

Los valores reportados se confrontaron con los criterios de calidad del agua disponibles en la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016* (la cual a partir de aquí sólo llamamos Ley Federal). En dicha ley se establecen dos conjuntos de indicadores de calidad del agua: "Lineamientos de Calidad del Agua" (LCA)

y "Límites Máximos Permisibles" (LMP) (SEMARNAT, 2016).

Los LCA, como se establece del artículo 222 al 224, indican el grado de calidad que deberá presentar el agua que sea vertida al destino inmediato posterior a su "explotación, uso o aprovechamiento", ya sea por una persona, física o moral, para poder exceptuarlo del pago de derechos de agua nacionales con las cuotas señaladas en el artículo 223-B (SEMARNAT, 2016, pp. 14–24). En la tabla de LCA se incluyen 30 parámetros inorgánicos, 80 orgánicos, 11 físicos y un parámetro microbiológico; además se especifican cuatro usos, uno de ellos es "Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales" (SEMARNAT, 2016, pp. 20–24); el conjunto de parámetros para este uso será el examinado en este estudio. Algunos de estos parámetros son iguales a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989).

Los LMP, como se establece del artículo 276 al 282, señalan los valores para exceptuar la obligación del pago de derecho federal "por uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales..." (SEMARNAT, 2016, p. 50). En los límites se incluyen 12 parámetros inorgánicos y 5 físicos. Estos parámetros tienen como referencia la NOM-001-SEMARNAT-1996: "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" (SEMARNAT, 2003). En la tabla de LMP se especifican los criterios para "Protección de Vida Acuática" en "Ríos" (SEMARNAT, 2016, p. 81).

Para acceder a la base de datos del Fideicomiso Río Sonora es necesario ingresar a su página oficial [www.fideicomisoriasonora.gob.mx](http://www.fideicomisoriasonora.gob.mx) (SEMARNAT, 2015), después a la opción de "Monitoreo de agua" y posteriormente a "Gráficas calidad del agua". En la página se observan las gráficas del monitoreo con diversas opciones: tipo de muestreo, sitio de muestreo, elemento muestreado y período de muestreo.

En cuanto a las aguas superficiales, en el tipo de muestreo hay varias opciones: Superficial compuesta total, Superficial compuesta soluble, Superficial total, Superficial total soluble, Superficial medio total, Superficial media soluble, Superficial fondo total y Superficial fondo soluble. Puesto que los límites máximos de la Ley Federal son para muestras "medidas de manera total" y compuestas (promedio diario) (SEMARNAT, 2016, p. 81), se escogió el tipo Superficial compuesta total para este análisis.

Existen dos opciones para descargar la información del monitoreo: como un archivo de imagen de la gráfica y como base de datos numérica. Para este estudio escogimos esta última opción. Los archivos originales son del tipo *Comma-Separated Values* (CSV), los cuales fueron organizados en *Excel*® y



posteriormente convertidos al formato del programa SPSS® para la obtención de las frecuencias de los parámetros de estudio. Asimismo, algunos de los archivos de SPSS fueron convertidos en *shapefile* para mapear los casos según el sitio de muestreo utilizando el programa ArcMap®. La ubicación geográfica de los sitios de muestreos se obtuvo de la página del Fideicomiso Río Sonora (SEMARNAT, 2015).

## 5. RESULTADOS

### *Sobre los Lineamientos de Calidad del Agua*

Al contrastar los valores de los muestreos de agua superficial compuesta total de todos los sitios, para el período Agosto 2014-Septiembre 2015, con los parámetros de los LCA para la protección de la vida acuática, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Muestreos de agua superficial compuesta total contrastados con los LCA de la Ley Federal para la protección a la vida acuática

Parámetro medido	Lienamiento	Unidad	Total de Registros	Registros con valor numérico	Registros fuera del lineamiento	Registros dentro del lineamiento	Registros "ND"	Registros "NE"
Aluminio	0.05	mg/L	2438	2198	1925	273	5	235
Aluminio	0.09	mg/L	2436	1122	0	1122	1079	235
Arsénico	0.02	mg/L	2438	1312	30	1282	891	235
Bario	0.01	mg/L	2438	2197	2194	3	6	235
Cadmio	0.004	mg/L	2437	1124	221	903	1078	235
Cobre	0.05	mg/L	2437	1698	624	1074	504	235
Cromo	0.05	mg/L	2438	1349	156	1193	854	235
Hierro	1	mg/L	2438	2201	855	1346	1	236
Mercurio	0.0005	mg/L	2438	1554	277	1277	639	245
Níquel	0.06	mg/L	2404	1270	26	1244	899	235
Plomo	0.03	mg/L	2438	1251	401	850	952	235
Zinc	0.02	mg/L	2391	1976	1068	908	180	235
pH	6.5 - 8.5	UpH	874	639	70	569	0	235

### *Parámetro*

En la Tabla 1 se muestran los parámetros indicados como LCA en la Ley Federal en comparación con los registrados en el Fideicomiso: 13 de 19. Llama la atención el gran número de casos fuera del lineamiento en muchos de los parámetros: en bario y aluminio son casi el total de los casos; mientras que en zinc, fierro y cobre son entre la mitad y una cuarta parte de casos fuera del lineamiento, del total de registros.

Conviene aclarar que "ND" "significa que el resultado del análisis es un valor menor al expresado en la celda LDM [Límite de Detección del Método]"<sup>4</sup>. Asimismo, "NE" significa "Análisis no efectuado" (CONAGUA, 2016). Una vez aclarado lo anterior, en la Tabla 1 destaca que en todos los parámetros medidos existen entre 235 y 245 NE, que en la mayoría de éstos son alrededor del 10% del total de registros y en el caso del pH, representan cerca del 27%. Asumiendo que "ND" equivale a no detectable, de aquí en adelante, consideraremos que ND significa que está dentro del lineamiento o límite permisible.

Para analizar la tendencia mensual, en la Figura 2 se muestran los siete parámetros que tuvieron más casos fuera del lineamiento: aluminio (Al), bario (Ba), cobre (Cu), fierro (Fe), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn). Los valores son el resultado de la suma de todos los sitios de muestreo de todas las muestras realizadas por mes para estos siete parámetros. La barra "Dentro del lineamiento" es la suma de todos los valores que cayeron en este rango de los siete parámetros; de forma similar, los "NE" es la suma de los casos con análisis no efectuado en estos parámetros.

En la Figura 2 se observa que la mayor parte de los muestreos, 51% de los 17,018 del período examinado, se realizaron entre agosto y septiembre de 2014. Entre octubre de 2014 y mayo de 2015, el número de muestreos por mes disminuyó y no fue hasta el período junio-agosto de 2015 cuando aumentó la frecuencia de muestreos.

También resalta que en agosto y septiembre de 2014 fueron poco más de la mitad de casos fuera del LCA en estos siete parámetros. En enero de 2015 hicieron

<sup>4</sup> Esta información no aparece en la página de internet del Fideicomiso Río Sonora; por lo que ésta fue solicitada por los autores y recibida a través del sitio INFOMEX, dirigido por el Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales.

su aparición los “NE”. En el período de junio a agosto de 2015, si se suman los casos fuera del lineamiento y los “NE”, éstos reúnen poco más de la mitad del total de muestreos durante ese período.

La misma información de los registros durante el período de agosto de 2014 a septiembre de 2015, por sitio de muestreo, se mapeó en la Figura 3.

En la Figura 3 se observa también el gran número de casos que están fuera del lineamiento: más de una cuarta parte en todos los sitios y poco más de la mitad en algunos de ellos.

### Sobre los Límites Máximos Permisibles

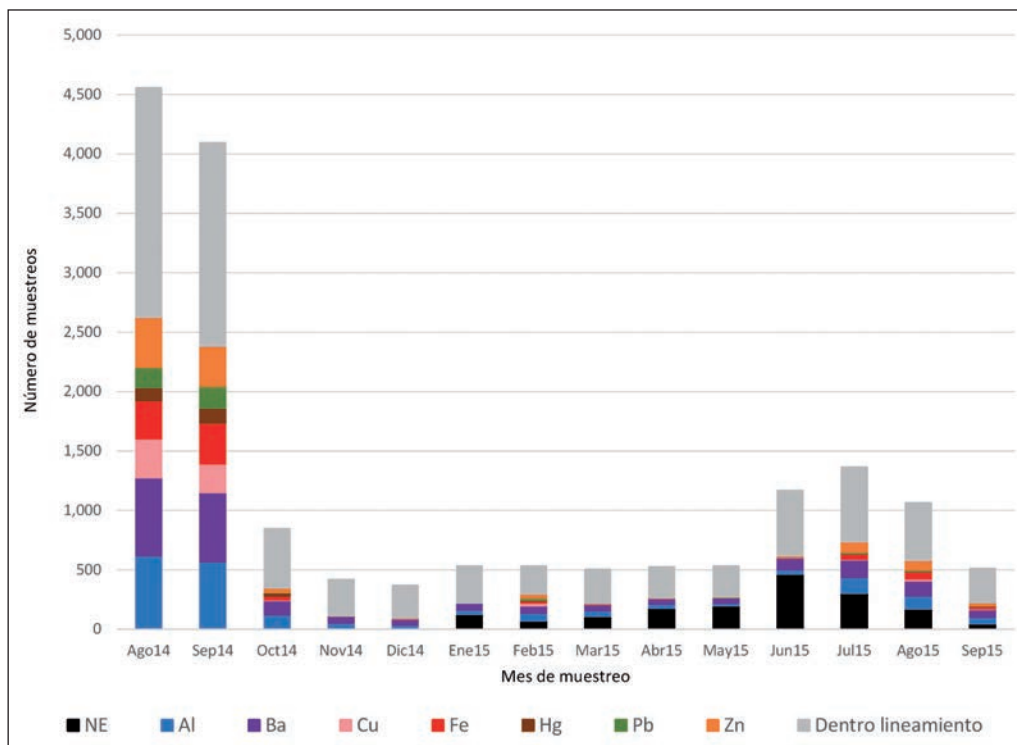
Los valores reportados fueron contrastados con los LMP para metales pesados y cianuros que cuentan con un criterio para el caso de protección a la vida acuática (SEMARNAT, 2016, p. 81), los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. Es importante anotar que las mediciones que reporta el Fideicomiso son sobre la calidad del agua del río, no sobre la calidad de la descarga residual la cual, seguramente, tendría una concentración mucho mayor.

Lo primero que destaca en la Tabla 2 es que casi la mitad de los parámetros son los especificados como LMP en comparación con los registrados en el Fideicomiso: 9 de 19. De acuerdo al límite de estos parámetros, son un mínimo de casos los que exceden o están fuera del límite con respecto a los que están dentro del mismo, 4% o menos en todos los casos.

En búsqueda de un patrón temporal de estos registros, en la Figura 4 se muestran los resultados por parámetro según el mes de muestreo. Los parámetros que se muestran son aquellos que tuvieron uno o más casos fuera del límite: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn). Al igual que la Tabla 1, los valores son la suma de todos los sitios de muestreo de todas las muestras realizadas por mes; la barra “Dentro del límite” es la suma de todos los valores que se situaron en este rango de estos parámetros, y “NE” es la suma de los casos con análisis no efectuado en estos siete parámetros.

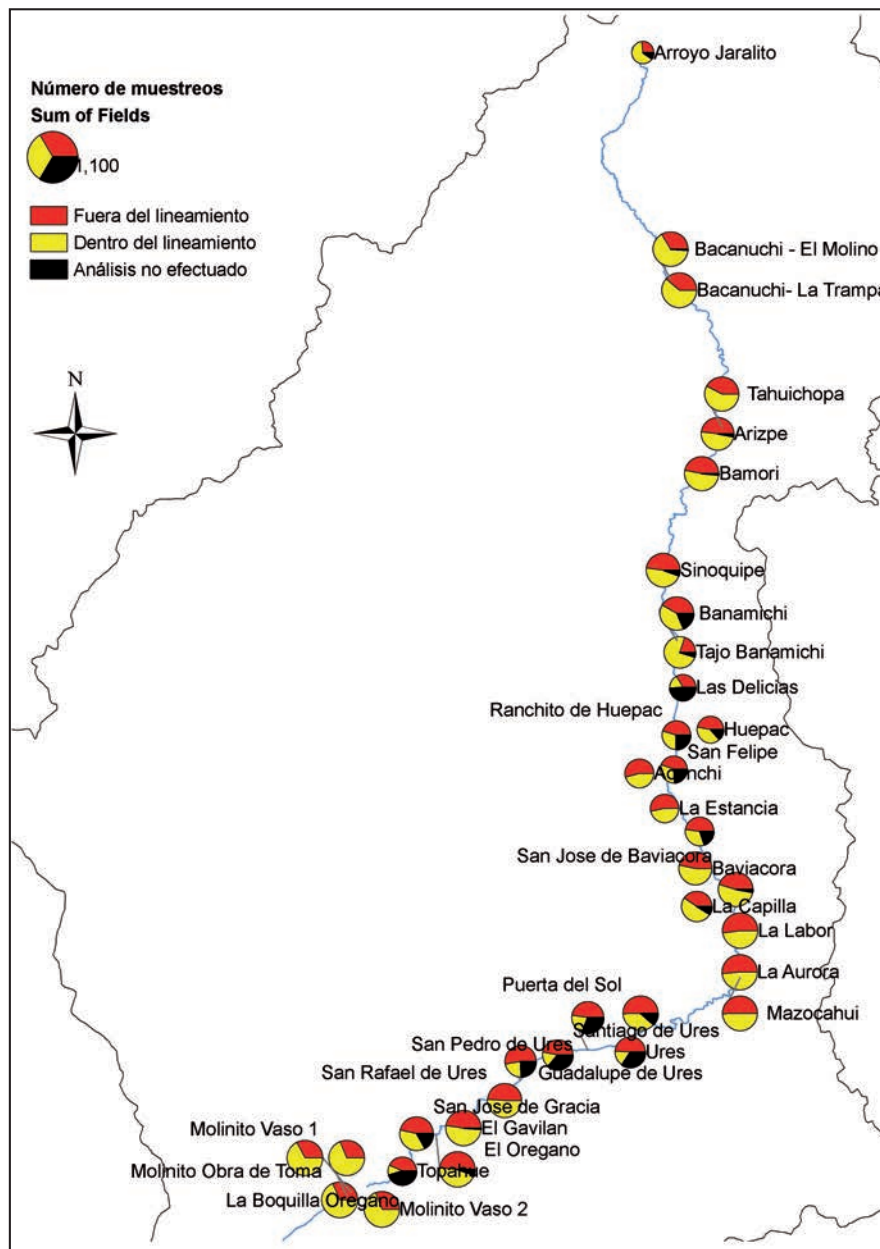
Como se observa en la Figura 4, la mayor parte de los casos fuera del LMP se presentaron en agosto de 2014: 148 sumando los siete parámetros. También en este mes se realizó un mayor número de muestras en los parámetros observados: 4551. En el período mostrado en la Figura 4 se realizaron alrededor de 17,000 muestreos para estos siete parámetros, de los cuales el 51% se concentró en agosto y septiembre de 2014. Entre octubre de 2014 y mayo de 2015, el número de muestreos por mes bajó drásticamente a aproximadamente 500 en un período. Fue en enero de 2015 cuando aparecieron los “NE”, que alcanzaron una tercera parte entre abril y julio de 2015; en agosto continuaron, hasta prácticamente desaparecer en septiembre de 2015.

Estos mismos muestreos para los siete parámetros de agosto de 2014 a septiembre de 2015 se graficaron por sitios en la Figura 5.



**Figura 2.** Distribución mensual de la suma de muestreos superficiales de siete parámetros (Al, Ba, Cu, Fe, Hg, Pb y Zn) fuera y dentro del lineamiento y NE

Fuente: Elaboración propia con base en página oficial del Fideicomiso Río Sonora



**Figura 3.** Muestreo de siete parámetros según los LCA (Al, Ba, Cu, Fe, Hg, Pb y Zn) por sitio de muestreo, entre agosto 2014 y septiembre 2015

Fuente: Elaboración propia con base en página oficial del Fideicomiso Río Sonora

**Tabla 2.** Muestrados de Superficial compuesta total contrastados con los LMP de la Ley Federal para la protección a la vida acuática

Parámetro medido	Lienamiento Máximo Permissible	Unidad	Total de Registros	Registros con valor numérico	Registros fuera del límite	Registros dentro del límite	Registros "ND"	Registros "NE"
Arsénico	0.2	mg/L	2438	1312	30	1282	891	235
Cadmio	0.2	mg/L	2437	1124	43	1081	1078	235
Cobre	6	mg/L	2437	1698	48	1650	504	235
Cobre	1	mg/L	2438	1349	1	1348	854	235
Mercurio	0.01	mg/L	2438	1554	2	1552	639	235
Níquel	4	mg/L	2404	1270	0	1270	899	235
Plomo	0.4	mg/L	2438	1251	29	1222	952	235
Zinc	20	mg/L	2391	1976	31	1945	180	235
Temperatura	40	°C	874	639	0	639	0	235



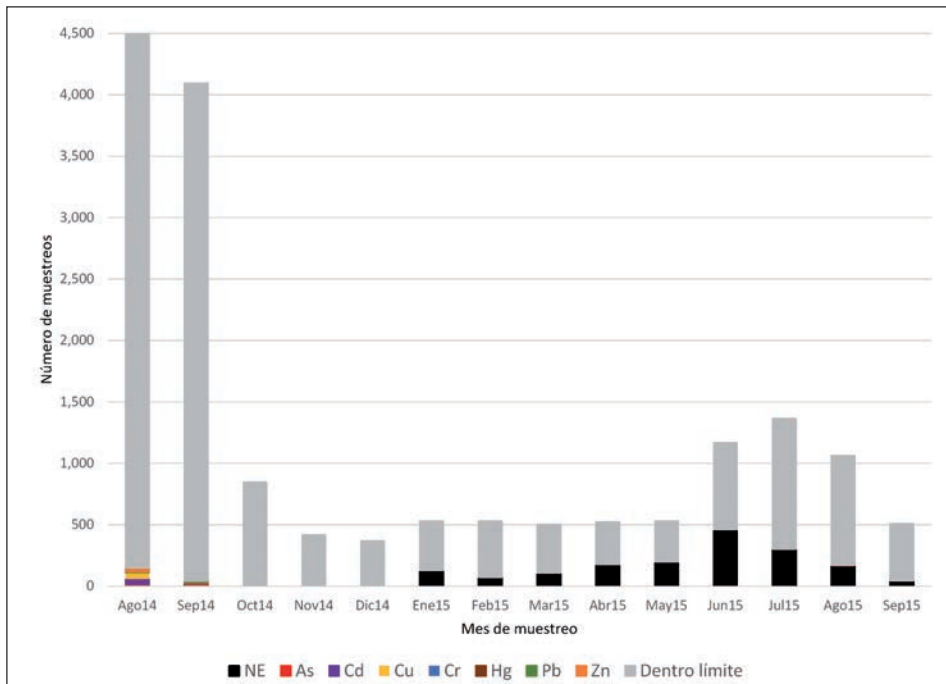


Figura 4. Distribución mensual de la suma de muestreos superficiales de siete parámetros (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn) fuera y dentro del límite y NE

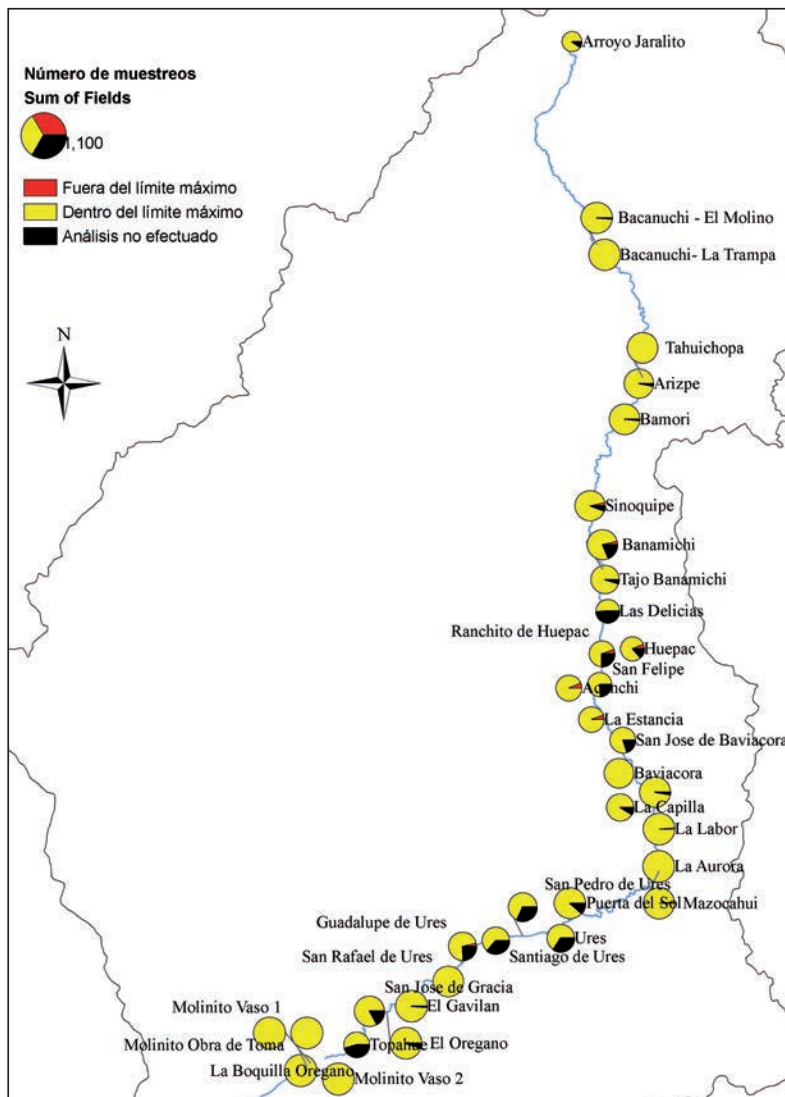


Figura 5. Muestreo de siete parámetros según el LMP (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn) por sitio de muestreo durante agosto 2014 y septiembre 2015

Como se observa en la Figura 5, el número de muestreos por sitio para estos siete parámetros está distribuido uniformemente (los tamaños de los círculos son similares), con un promedio de 448 muestreos por sitio. Un caso que destaca por tener un número de muestreos muy por debajo del promedio es el de Arroyo Jaralito (al norte de la cuenca), que solo tuvo 217 muestreos durante ese período para los 7 parámetros en cuestión.

Asimismo, se observan dos agrupaciones espaciales de los NE (análisis no efectuado): entre Sinoquipe y San José de Baviácora y entre Puerta del Sol y Guadalupe de Ures. Además San José de Gracia y Topahue contienen un buen número de NEs.

## 6. DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente, los LMP en una descarga de agua (“acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita”, Art. 277, fracción VII de la Ley Federal) se establecieron para efecto de tener parámetros que, en caso de ser excedidos, hagan exigible el pago de derechos a las personas físicas o morales responsables por el hecho. Una vez que una persona física o moral utiliza, explota o aprovecha aguas nacionales, está obligada al pago de derechos sobre agua (Art. 222, Ley Federal). Sin embargo, cuando la persona física o moral cumple con los LCA para el destino inmediato posterior de ésta en su descarga, puede estar exenta de pago (Art. 224, fracción V, Ley Federal). Para esto tendrá que cumplir con varios requisitos, entre los que destaca el contar con un certificado de calidad de agua el cual expedirá CONAGUA, observando lo establecido por el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.

Dicho lo anterior, es necesario señalar que estamos conscientes de que ambos conjuntos de parámetros, LCA y LMP, tienen un objetivo eminentemente recaudador, pero al observar información detallada sobre los límites de calidad del agua en la Ley Federal, decidimos emprender este ejercicio académico tomando como referencia dicho marco legal.

De los resultados, en principio destaca que los LCA contienen más parámetros que los LMP: los primeros son un total de 122, incluyendo los parámetros inorgánicos, orgánicos, físicos y microbiológicos; mientras que los segundos son un total de 17. Mientras en los LMP son 9 de los 19 parámetros incluidos en la base de datos del Fideicomiso, en los LCA son 13. Además, cabe cuestionarse por qué no se monitorearon, o por lo menos no aparecen en la base de datos del Fideicomiso, los más de 100 parámetros restantes de los LCA; es posible que esto obedezca a que el monitoreo haya sido diseñado para proteger la salud humana y no la vida acuática, lo cual le daría la razón a Postel y Richter (2003), cuando establecen que los ecosistemas no son una prioridad en nuestra visión moderna.

Específicamente en los LCA, a diferencia de los LMP, se incluyen aluminio, antimonio, bario, fierro y pH. Lo primero que llama la atención es que en los límites máximos de la Ley Federal no se incluye el pH, a pesar de que se basó en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que sí lo establece; esta omisión probablemente se deba a que este valor viene señalado en el texto de la norma (art. 4.1: “El rango permisible del potencial hidrógeno-sic- (pH) es de 5 a 10 unidades”) mas no en la tabla de valores (SEMARNAT, 2003). El caso de la exclusión del aluminio de los LMP también resulta inexplicable, ya que es identificado como un metal de alta toxicidad para los peces y que, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del agua, puede generar lesiones histopatológicas en las branquias de los peces que derivan en hiperplasia e hipertrofia (Domitrovic, 1997, p. 37). De igual forma, el bario es tóxico para las microalgas de agua dulce, que son alimento para los peces (Borgmann et al., 2005).

Como también se observa en los resultados, todos los parámetros, con excepción del arsénico, son mucho menos permisibles en los LCA que en los LMP (comparar Tabla 1 y 2). Esto hace que en los LCA haya un número mucho mayor de casos que en los LMP: de los aproximadamente 17,000 muestreos de los parámetros mostrados en las Figuras 2 y 4 respectivamente para el período 2014-2015, el 43% está fuera del LCA, mientras que tan sólo el 1% está fuera del LMP.

La Ley Federal no explica la razón de la discrepancia en el número de parámetros entre los LMP y los LCA, aunque se advierte que en general los valores son más altos para el caso de los primeros; es decir, se espera que las concentraciones de contaminantes en aguas residuales de descarga sean por naturaleza altas. Sin embargo, asegurar que una vez mezcladas con las aguas presentes en el cuerpo receptor, sus concentraciones bajarán a niveles compatibles con los lineamientos, es tan riesgoso como incierto. La combinación final dependerá de los volúmenes mezclados de agua, del flujo final, la velocidad de mezcla y de los componentes fisicoquímicos y microbiológicos contenidos en el agua del cuerpo receptor al momento de la descarga, ya que esto podría originar la formación de compuestos diferentes a los metales pesados originalmente drenados, implicando quizás mayor toxicidad. Por citar un ejemplo, si el cuerpo de agua receptor tiene un volumen relativamente bajo, no tendrá la capacidad suficiente para diluir las concentraciones de metales a niveles aceptables, como los establecidos por los lineamientos para proteger la vida acuática.

También sobresale de los resultados el gran número de ocasiones en que aparecen en la base de datos las nomenclaturas ND y NE. Como se señaló, ND puede ser asumido como no detectable, lo que para nuestro ejercicio se traduce en que se considera dentro del lineamiento o límite permisible. La nomenclatura que es más ambigua es la NE: “Análisis no efectuado”

(CONAGUA, 2016), la cual podría asumirse que se debe a lo efímero que actualmente es el río Sonora; sin embargo, como fue registrado por Díaz y colaboradores (2016), también la base de datos de agua subterránea presenta este problema, lo cual es inesperado en ese caso, ya que de los pozos se puede obtener agua prácticamente durante todo el año. Esta falta de consistencia es más extraña por el hecho de que los meses de julio, agosto y septiembre reflejan un buen número de NE, a pesar de ser el tiempo en que el escurrimiento comienza a fluir debido a las lluvias del Monzón Norteamericano. Además, el gran número de NE durante los meses de verano dificulta la comparación entre el 2014, cuando ocurrió el evento, con el 2015, un año después.

El caso estudiado en el río Sonora ejemplifica varios de los aspectos señalados por Gutiérrez y Emanuelli (2010) sobre las problemáticas en torno a la aplicación de las normas oficiales mexicanas y su ineficacia para supervisar los niveles de calidad del agua, así como por Ibarra y Moreno (2017), respecto a la ineficacia de los mecanismos existentes en la legislación mexicana para que la población afectada por el derrame de 2014 pueda acceder a la justicia ambiental.

El denominado por Aboites (2009) modelo mercantil-ambiental en el manejo del agua, instaurado desde mediados de la década de 1980 en México, y cuyo propósito era valorizar el agua y entregarla al mercado para hacer más eficiente su uso y forma de distribución, a través de instrumentos como la Ley Federal, no ha promovido el cuidado ambiental, ni el aumento de la inversión pública y privada en el sector.

Así pues, en el afán de mercantilar la naturaleza, pareciera que un pago económico es suficiente para resarcir la falta de protección a la vida acuática. Si asumimos que los servicios ambientales hidrológicos que proveen los ríos sostienen beneficios que sólo pueden suministrarse bajo condiciones de buen funcionamiento ecosistémico, es decir, con la interacción adecuada de los procesos naturales y sociales (Madrid, 2011, p. 53), el principio de “el que contamina paga” es un esquema que permite evadir la responsabilidad social del cuidado y la conservación de los recursos naturales ante eventos antropogénicos. En el río Sonora, hasta este momento, la protección a la vida acuática es considerada una externalidad ambiental negativa en la que las autoridades no han reparado lo suficiente y que los investigadores no pueden medir con las metodologías enfocadas al estudio de los caudales ecológicos.

De esta manera, el mensaje que se emite a la sociedad, en torno al cuidado de nuestros recursos naturales y los beneficios que éstos nos prestan, es que la persona jurídicamente física o moral que pague económicamente la descarga

de agua de insuficiente calidad a los ecosistemas naturales podrá realizarlo dentro de la ley. Esto está evidenciado en el estudio de percepción de los habitantes del río Sonora afectados por el derrame, quienes centran las consecuencias del daño ambiental en la indemnización y apoyos económicos obtenidos por el mismo (Ortiz et al., 2016, p. 8) y no en las afectaciones al sistema hidrológico y su vida acuática.

## **7. CONCLUSIONES**

El contrastar la base de datos del monitoreo de calidad del agua realizado por el Fideicomiso Río Sonora con los LMP y los LCA establecidos en la Ley Federal, si bien es sólo un ejercicio académico, nos da pauta para evidenciar el estado de amenaza y vulnerabilidad en el que se encuentra la vida acuática en el río Sonora.

En los resultados se pueden observar algunos aspectos críticos, como la diferencia en número y permisibilidad de los lineamientos en comparación con los límites máximos permisibles. Esta diferencia en el número de parámetros es inexplicable, aún más por tratarse de parámetros fundamentales para la protección de la vida acuática. Acerca de la permisibilidad de los parámetros, en los resultados queda manifiesto que esto repercute en los casos que exceden el umbral aceptable: mientras del total de las muestras graficadas el 43% está fuera del LCA, únicamente el 1% está fuera del LMP. Las fallas en la consistencia de la base de datos, como quedó reflejado en el caso de los valores NE, es también un tema significativo.

Adicionalmente, remarcamos que el hecho de que ambos conjuntos de parámetros (LCA y LMP) aparezcan en la Ley Federal, con un objetivo eminentemente recaudador es, por lo menos, un indicio de que en México impera un paradigma mercantilista del agua. Este paradigma podrá abonar a tener finanzas más sanas en la recaudación fiscal mexicana; sin embargo, dado su laxo énfasis en la protección de los servicios ambientales, puede contribuir a la pérdida de éstos mediante el fomento de una cultura en la que se acepta, sin mayores repercusiones que las pecuniarias, el hecho de pagar por contaminar y no garantizar la supervivencia de la vida acuática y la no acumulación de los metales pesados en la biota del lugar.

Es necesario avanzar hacia cambios paradigmáticos que contemplen el cambio en la representación del entorno natural y la creación de metodologías más sustentadas e inscritas como normas oficiales mexicanas de observancia obligatoria, a fin de contar con mecanismos específicos que permitan visualizar las implicaciones ambientales reales de las prácticas políticas y económicas en las que involucramos a nuestros ecosistemas.



## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado para la realización de este estudio por el Instituto

Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN3056, que a su vez es apoyado por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (Grant GEO-112804). También agradecemos la colaboración de *Lloyd's Register Foundation*, una fundación de caridad que ayuda a proteger la vida y la propiedad mediante el apoyo a la educación relacionada con la ingeniería, la participación pública y la aplicación de la investigación.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboites, L. 2009. *La decadencia del agua de la nación*. El Colegio de México.

Bogan, M. T., Noriega-Felix, N., Vidal-Aguilar, S. L., Findley, L. T., Lytle, D. A., Gutiérrez-Ruacho, O. G., ... Varela-Romero, A. 2014. Biogeography and conservation of aquatic fauna in spring-fed tropical canyons of the southern Sonoran Desert, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 23(11): 2705–2748.

Borgmann, U., Couillard, Y., Doyle, P., & Dixon, G. 2005. Toxicity of sixty-three metals and metalloids to *Hyalella Azteca* at two levels of water hardness. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24(3): 641–652.

Chávez Toledo, C., Macías, A., Gutiérrez, Ó. G., Mercado, M. G., Bustamente, A. K., & Duarte, H. 2013. Análisis estacional de factores ambientales y su influencia sobre la ictiofauna del río Bacanuchi. *Contaminación Y Ambiente*, (29): 258.

Chávez Toledo, C., Rodríguez, J. C., & Rojero Díaz, Elvira. 1989. Resultados preliminares del Estudio de Macroinvertebrados Acuáticos y Peces del Río Sonora y su afluente el Río Bacanuchi. *Vinculación*, 1(14): 21–28.

CONAGUA. 2013. Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Ecológica del Río Sonora. Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. 2016. MEMORANDO No. 800.7.00.00.01.-319. Comisión Nacional del Agua.

Díaz Caravantes, R. E., Duarte Tagles, H., & Durazo Gálvez, F. M. 2016. Amenazas para la salud en el Río Sonora: análisis exploratorio de la calidad del agua reportada en la base de datos oficial de México. *Revista Salud UIS*, 48(1), 91–96.

DOF. 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la federación. Recuperado de [www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989)

DOF. 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para

uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de La Federación*.

DOF. 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la federación.

DOF. 2012. NMX-AA-159-SCFI-2012. “Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.” Diario Oficial de la federación. Recuperado de <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166834/NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf>

Domitrovic, H. A. 1997. El empleo de peces autóctonos para la realización de ensayos de toxicidad: evaluación de la especie *Aequidens portalegrensis* (Hensel, 1870). *Ictiología*, 5(1–2): 37–42.

Gómez Álvarez, A., Grijalva, J. M., & Aguirre, J. C. 1997. Estudio de la calidad físico-química del agua de la presa Abelardo L. Rodríguez, Sonora. *Boletín Del Departamento de Geología*, 14(1): 47–62.

Gómez Álvarez, A., Meza, D., Valenzuela, J., Villalba, A., & Ramírez, J. 2014. Behavior of Metals Under Different Seasonal Conditions: Effects on the Quality of a Mexico-USA Border River. *Water Air Soil Pollut*, 225, p. 2138.

Gómez Álvarez, A., Valenzuela, J., Villalba, A., Meza, D., Almendariz, F., Whitaker, T., ... Ochoa, L. 2011. Distribution of heavy metals and their chemical speciation in sediments from the Abelardo L. Rodríguez Dam, Sonora, México. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 23(4): 201–212.

Gómez Álvarez, A., Villalba, A., Acosta, G., Castañeda, M., & Kamp, D. 2004. Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro durante los años 1997 y 1999. *Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1): 1–8.

Gómez Álvarez, A., Villalba Atondo, A., Grijalva Chon, J. M., & Yepiz Velazquez, L. M. 1994. Diagnóstico y evaluación de los parámetros físico-químicos en agua y sedimento, así como la determinación de metales pesados en la población de tilapia (*Oreochromis sp*) en la presa Abelardo L. Rodríguez. CICTUS, Universidad de Sonora.

Gómez Álvarez, A., Yocupicio, M. T., & Ortega, P. 1990. Niveles y distribución de metales pesados en el río Sonora y su afluente el río Bacanuchi, Sonora, México, 1(2): 10–20.

Gómez Álvarez, A., Yocupicio, M. T., & Ortega, P. 1993. Concentraciones de Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los sedimentos del río Sonora y de su afluente

- el río Bacanuchi, Sonora, México. *Boletín Del Departamento de Geología*, 10(1): 49–62.
- Gutiérrez, M., & Romero, F. 2015. Valoración del daño ambiental en la Cuenca del Río Sonora, asociado al derrame del 06 de agosto de 2014 de Buena Vista del Cobre. In *Memorias de la XXXI Convención Internacional de Minería* (pp. 604–616). Acapulco, Guerrero, México: AIMMGM.
- Gutiérrez, R., & Emanuelli, M. S. 2010. Régimen jurídico del agua continental en México: un análisis crítico. In B. Jimenez, M. L. Torregrosa, & L. Aboites (Eds.), *El Agua en México. Cauces y Encauces* (647–679). Academia Mexicana de Ciencias.
- Ibarra, F., & Moreno Vázquez, J. L. 2017. La justicia ambiental en el río Sonora. *Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 10(9), En prensa.
- Instituto Tecnológico de Sonora. 2008. *Informe Final para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora, del proyecto de investigación: Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora* (No. CEA-ED-PR-EST-08-013). Hermosillo, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Madrid Ramírez, L. 2011. Los pagos por servicios ambientales hidrológicos: Más allá de la conservación pasiva de los Bosques. *Investigación Ambiental Ciencia Y Política Pública*, 3(2): 52–58.
- Ortiz Valdez, A., Tapia Fonllem, C., & Rascón Arriaga, F. 2016. *Percepción acerca de la contaminación del Río Sonora, en habitante de los pueblos cercanos*. Presented at the Primer congreso nacional de educación ambiental para la sustentabilidad, Chiapas, México.
- Postel, S., & Richter, B. 2003. *Rivers for life: managing water for people and nature*. Washington, D.C: Island Press.
- Romo León, J. R., Castellanos Villegas, A., & Méndez Estrella, R. 2014. *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía - Consejo de Cuenca Alto Noroeste* (Reporte Técnico). México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2014. Derrame de sulfato de cobre en el Río Bacanuchi (afluente del Río Sonora). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2015. Fideicomiso Río Sonora. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [www.fideicomisoriosonora.gob.mx/](http://www.fideicomisoriosonora.gob.mx/)
- SEMARNAT. 2016. Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- UNAM. 2016. *Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental*. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, UNAM.
- Villalba Atondo, A., Gómez Álvarez, A., & Gallegos, G. 1997. Distribución de metales pesados en el sedimento de la presa Abelardo L. Rodríguez, Hermosillo, Sonora, México. *Boletín Del Departamento de Geología*, 14(1), 1–12.
- WHO. 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). Switzerland: World Health Organisation.

## CAUDALES DE CONSERVACION DE LOS ECOSISTEMAS FLUVIALES DEL RÍO FRÍO EN COLOMBIA, TRAMO CAJICÁ, CHÍA

### CONSERVATION FLOWS OF RIVER ECOSYSTEMS OF THE FRIO RIVER IN COLOMBIA, ANALYSIS SECTION CAJICA, CHIA

Agualimpia Dualiby, Yolima del Carmen<sup>1</sup>; Castro Méndez, Carlos Enrique<sup>2</sup>

#### Resumen

La determinación del caudal ecológico sin considerar los riesgos de las especies involucradas en el ecosistema es una decisión incompleta y de alguna manera arriesgada. La propuesta del caudal de conservación de los ecosistemas fluviales tuvo como objetivo conocer el grado de integración existente entre especies involucradas en el sistema natural ambiental y sus requerimientos de agua. La introducción de especies exóticas es un inconveniente para el desarrollo de las especies autóctonas, que afectan el último eslabón de la cadena trófica como es el caso del pez Capitán de la Sabana (*Eremophilus mutisii*) que se encuentra amenazado.

El método incluyó los análisis de movimiento de agua en los suelos y el inventario de especies introducidas y nativas, confrontados con los requerimientos de hábitat en condiciones mínimas de agua que puede soportar el pez y los volúmenes máximos de agua tolerados por el mismo. Se realizó el análisis hidráulico del río complementado mediante modelación para la conversión de los niveles de éste a caudales, la determinación de las secciones que se desbordan y en algunos casos permiten el desarrollo de hábitat para esta especie del río.

**Palabras claves.** Ecosistemas fluviales, caudales de conservación, vegetación riparia y prácticas de manejo.

#### Abstract

The determination of the ecological flow without considering the risks of the species involved in the ecosystem is an incomplete and some risky decision. The proposal of the flow of conservation of the fluvial ecosystems had as objective to know the degree of integration existing between species involved in the natural environmental system and its water requirements. The intrusion of exotic species is a disadvantage for the development of native species, which affect the last link in the food chain, as is the case of the fish Capitán de la Sabana (*Eremophilus mutisii*) that is threatened.

The method included analyzes of water movement in the soils, the inventory of introduced species and the local species confronted with the minimum water requirements of the fish and the maximum tolerated by the fish. The hydraulic analysis of the river was complemented by modeling for the conversion of the river levels to flows, the determination of the sections that overflow and in some cases allow the development of habitat for this species of the river.

**Key words.** Fluvial ecosystems, conservation flows, riparian vegetation and management practices.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de planificación local tienen inconvenientes en llevarse a la práctica pues la mayoría de información con la que se cuenta proviene de niveles de aplicación general que poco ayudan en la toma de decisiones. Los planes de ordenamiento y gestión integral de las cuencas hidrográficas que se utilizan en Colombia dejan por fuera del diagnóstico y las aplicaciones a los sectores más pequeños dentro de un municipio. Tal es el caso de la subcuenca del río Frío que de acuerdo con información de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) tiene una extensión de 20.160 km<sup>2</sup> y representa el 3,4% de la cuenca del río Bogotá que se encuentra en estudio (CAR, 2006). El proceso de ocupación de tierras en la sabana afecta los planos de inundación del río Frío que es un afluente del

Bogotá; el establecimiento de cultivos de flores en la proximidad del río que hace parte de la zona en estudio se convierte en una amenaza seria para los caudales superficiales, ya que se hace extracción tanto de agua superficial como subterránea para fines domésticos y agrícolas. En los sectores de Canelón, Fagua, y fincas campestres del río Frío abundan urbanizaciones formales e informales que impactan e recurso hídrico superficial y según la CAR en el tramo Cajicá - Chía hay 60 concesiones para aprovechamiento de agua subterránea que corresponde a un punto de extracción por cada 200 m de tramo de río analizado.

El objetivo de la investigación fue analizar el grado de integración que hay entre especies mediante un método holístico que involucra paisajes, suelos, vegetación y comunidades ícticas. A partir de este

1 Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. yagualimpiadualiby@gmail.com

2 Grupo de investigación PROGASP. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.



análisis se identificaron los caudales necesarios para la conservación de los ecosistemas fluviales.

Los resultados de la presente investigación tienen su aplicación en el contexto local puntual ajustado

a ríos de sabana que presentan períodos de desbordamiento que garantiza el hábitat de las especies ribereñas, para el disfrute de un ambiente sano por parte de pobladores cada vez más próximos al cauce.

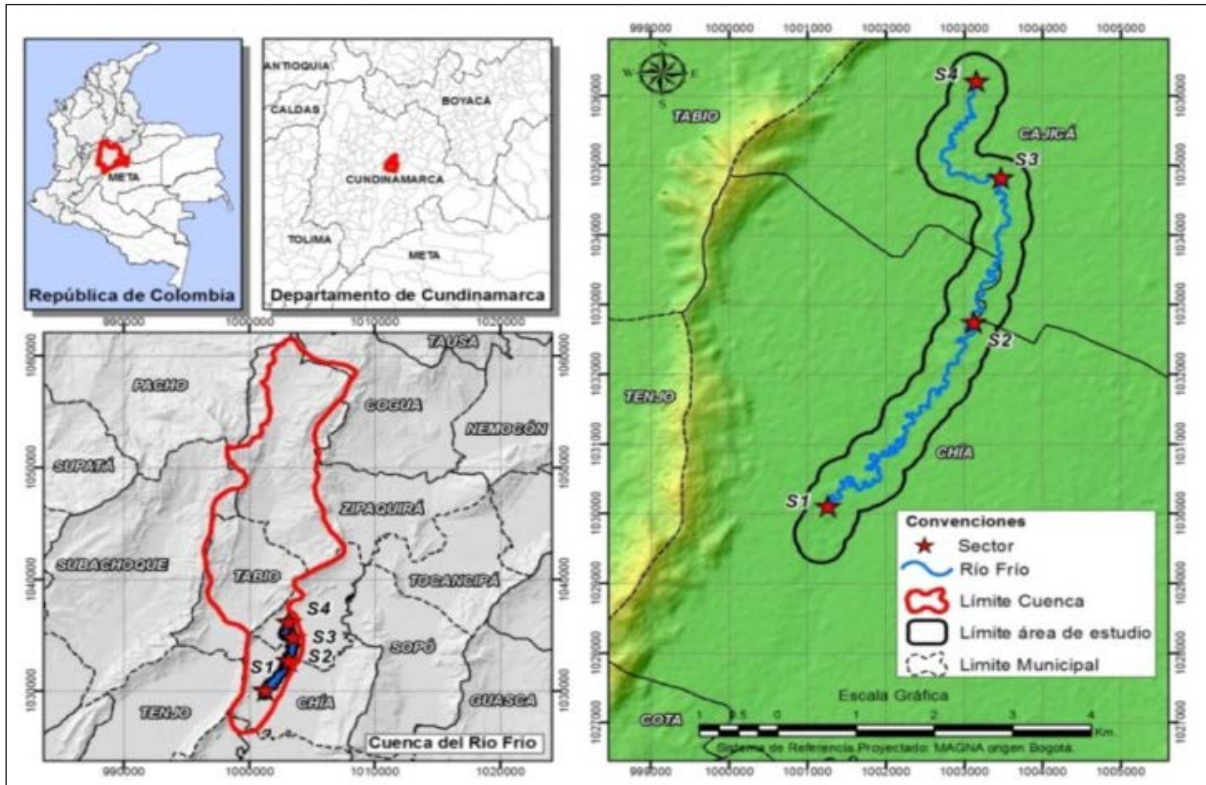


Figura 1. Localización general de la cuenca y del tramo de estudio – Río Frio

Fuente: Aqualimpia, 2015

## 2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

El río Frío nace en los cerros situados al noroeste de Zipaquirá (Páramo de Guerrero) y recorre parte de los municipios Tabio, Cogua, Cajicá, Chía y Zipaquirá hasta desembocar en el río Bogotá. La cuenca del río Frío es de 20.160 km<sup>2</sup> y las coordenadas geográficas que la limitan son: 4°50'00" y 5°10'00" latitud norte y 74°2'30" y 73°58'00" longitud oeste de Greenwich. El tramo de estudio, con una longitud aproximada de 14.030 m, está localizada en el altiplano Cundiboyacense y va desde Golpe de Agua -S4- en Cajicá hasta Puente Cacique -S1- en Chía (Figura 1). Este río cuenta con información secundaria como cartografía básica (planchas 208-IV-D, 209-III-C, 227-II-B, 227-II-D y 228-I-C) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). De igual forma en el tramo de estudio está instalada una estación limnigráfica (Puente la Virginia) manejada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) con cuyos datos diarios se calculó un caudal máximo mensual de 6.23 m<sup>3</sup>/s, un caudal medio 1.56 m<sup>3</sup>/s y un caudal mínimo de 0.56 m<sup>3</sup>/s.

En Colombia se han desarrollado investigaciones con respecto a las especies piscícolas y sus requerimientos de hábitat en ríos ubicados en

diferentes partes del país; aproximadamente el 42% de los peces que presenta alguna amenaza está ubicado en la cuenca del río Magdalena de la cual hace parte el río Frío, cuyas tierras según investigación realizada en la Universidad Santo Tomás de Aquino, USTA (2004), tienen gran presión por el recurso hídrico debido a la alta densidad poblacional. El aprovechamiento de los recursos naturales que existen en la subcuenca del río Frío ha modificado de manera significativa el estado original de éste. (Venegas, 2013).

Cuando se degrada el hábitat de las especies, se afecta el desarrollo de las mismas y se presenta en ellas un grado de amenaza; según el *Libro rojo* de los peces dulceacuícolas amenazados, se encuentra en dicha situación el Capitán de la Sabana (*Eremophilus mutisii*) (Mojica, Castellanos, Usma & Álvarez, 2002) entre otros.

En un sector del río Frío que pasa por el municipio de Cajicá el cual a su vez hace parte del tramo de estudio, se analizó la calidad del agua encontrándose que aparentemente no presenta contaminación, lo cual es un indicador de la *capacidad de respuesta del río* a las acciones humanas. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en tres sitios de muestreos según Venegas (2013).

**Tabla 1.** Parámetros físico-químicos en tramo del río Frío localizado en Cajicá

PARÁMETRO	UNIDAD	SITIO MUESTREO 1	SITIO MUESTREO 2	SITIO MUESTREO 3
Temperatura	°C	13.8	14.1	14.5
Grado de acidez o basicidad (pH)		7.2	7.3	7.29
Alcalinidad	mg/l	6	10	15.3
Cloruros	mg/l	2.5	6.1	12.6
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	53.7	77.4	112.5
DBO5	mg/l	5.2	4.4	2.1
Oxígeno disuelto	mg/l	6.7	13.9	6.7
Saturación	%	87.6	101.3	66.8
Conductividad	µs/cm	84.6	183.3	152.1
Turbidez	NTU	10.63	5.97	5.26

Fuente: Venegas (2013)

### *Métodos aplicados en la determinación del caudal ambiental y su relación con la normatividad vigente*

Existen varias denominaciones para referirse al caudal (mayormente conocido como ecológico o ambiental) que debe dejarse en una fuente hídrica para la propia subsistencia de esta y todo lo que conlleva; de igual manera existen múltiples métodos para la determinación del mencionado caudal, lo cual puede ser interpretado como que es difícil generalizar en este sentido. Diferentes autores han agrupado de varias maneras los métodos existentes teniendo en cuenta el tipo de información requerida,

las variables utilizadas o los objetivos pretendidos Palau, (2003), Agualimpia y Castro (2006). Díez y Burbano (2006), clasifican los métodos de acuerdo con el enfoque de los mismos en: hidrológicos, hidráulicos, multivariados y ecohidráulicos.

### *Descripción de los métodos utilizados en Colombia*

El caudal ecológico se implementó en Colombia a partir del Estudio Nacional del Agua elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (IDEAM, 2000). Aunque no



se tenía un cubrimiento uniforme de estaciones, se aplicó el método hidrológico o de caudales históricos estableciendo porcentajes de la oferta bruta. Según IDEAM (2004) y Díez y Burbano (2006), inicialmente se adoptaron métodos que determinan un caudal mínimo relacionado con el 90% del tiempo de permanencia determinados en la curva de duración de caudales, la ocurrencia de un caudal con un tiempo de retorno de 2.3 años, o el valor de caudal correspondiente al 25% del caudal mínimo mensual multianual. En la versión siguiente el Estudio Nacional del Agua define que para el nivel local o regional es necesario evaluar la forma apropiada en la determinación del caudal ecológico de acuerdo con la gestión integrada que se tenga prevista para el recurso hídrico (IDEAM, 2010).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible desde la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, desarrolló en unión con un grupo de investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, una propuesta metodológica para la determinación de caudales ambientales que permitan garantizar la conservación y utilización del recurso hídrico en ríos regulados; la metodología muestra una interrelación de cuatro componentes que son el hidrológico, hidráulico, ecología acuática y calidad de agua, la cual se convierte en una variable que incide en los caudales de oferta para aprovechamiento, debido a su variabilidad y difícil control espacio-temporal (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2013).

En la reciente versión del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2014), se avanza en la determinación del caudal ambiental a escala nacional, mediante la implementación de un nuevo determinante de la cantidad de agua que debe permanecer en los cauces naturales, el cual permite ajustar también indirectamente la oferta neta de agua. Se trata del índice de regulación natural de agua, cuyo valor depende del análisis de variabilidad del caudal diario representado en curvas. El IDEAM (2014) consideró como punto de inflexión un índice de 0,70 para decidir, en la curva de duración, si se aplica una permanencia de 75% ( $Q_{75}$ ) cuando los índices de regulación son menores a 0,70 y un valor de caudal en la curva de duración de 85% ( $Q_{85}$ ) cuando el río presenta variaciones mínimas diarias en su caudal, es decir índices de regulación mayores a 0,70. De acuerdo con los resultados del Estudio Nacional del Agua el río Frío configura un índice de regulación y retención de agua entre 0,5 y 0,65; según este método el caudal ambiental se determina en la gráfica por la permanencia del 75% del caudal, es decir se debe dejarla cuota de caudal más alta (Figura 2).

De acuerdo con el procedimiento propuesto por el IDEAM (2014) el caudal ambiental obtenido en la curva de duración con una permanencia del 75% para el río frío es de 1,54 m<sup>3</sup>/s (Figura 2).

Agualimpia (2015) comienza a trabajar los caudales de conservación de los ecosistemas fluviales basados en la sostenibilidad efectiva del recurso hídrico, es decir en el mantenimiento de los caudales de conservación de los ecosistemas fluviales basados en especies indicadoras de cantidad de agua. En este nuevo enfoque se tiene en cuenta las actividades que realizan los seres humanos que incide en la transformación del paisaje, y sus efectos negativos, los cuales pueden remediarse a través de la aplicación de medidas de control de escorrentía con el mejoramiento de la infiltración de agua en el suelo, se muestra la importancia que cumple el suelo en la regulación de los caudales de conservación. La implementación de prácticas de conservación de coberturas y de manejo de unidades de tierras como parte integral de los ecosistemas fluviales (Agualimpia & Castro, 2012).

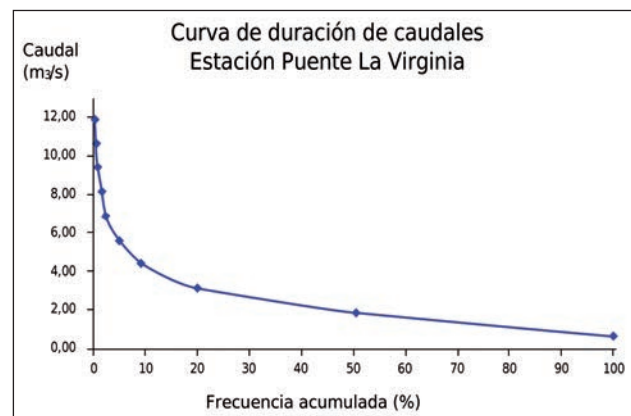


Figura 2. Frecuencia acumulada de caudales del río frío

La disponibilidad de agua para los ecosistemas fluviales depende de la escala temporal medida en la distribución de las lluvias y de las condiciones físicas relacionadas con la captación de las lluvias (tamaño y forma de la cuenca), condiciones hidráulicas y distribución hídrica en una zona hidrográfica en particular, pendiente del sector (factor relieve) y densidad de drenajes cuya variable permite estudiar los niveles de desalojo de las aguas de escorrentía. Estas variables caracterizan los elementos hidráulicos pertinentes a considerar en los estudios de caudales de conservación de los ecosistemas fluviales (Agualimpia & Castro, 2013).

Con el análisis de variables del suelo como profundidad efectiva, densidad aparente, humedad aprovechable (diferencia entre agua retenida a capacidad de campo y punto de marchitez permanente) junto a la presencia de capas compactadas, se puede argumentar que los suelos de la sabana de Bogotá (Altiplano cundiboyacense) poseen alta capacidad de almacenamiento, regulación de aguas y minimización del riesgo a la desertización en estas tierras; de igual forma, como los índices de escurrimiento son menores en los paisajes de



altiplanicie que en las montañas, estos últimos tienen mayor sensibilidad a la desertificación debido a los altos niveles de escurrimiento, en contraposición en los paisajes de sabana hay fenómenos inducidos por el hombre tales como la implantación de coberturas vegetales exóticas que interfieren en la biota natural. (Aqualimpia y Castro, 2013).

En Colombia se tiene preferencia por caudales ecológicos basados en enfoques holísticos; entre ellos se encuentra el calculado para el río Quindío en el tramo Boquía - Puente Balboa (Monsalve y Bustamante, 2009); en las cuencas media y baja de los ríos Timba, Claro, Amaime, Tuluá y Pescador en el departamento del Valle del Cauca (Vásquez, Ramírez, Blanco, Navarrete, Cantera y Montoya, 2009) y el río Meléndez en el mismo departamento (Zúñiga, 2009).

- **Marco legal y normativo mundial sobre el caudal ecológico.** Algunos países latinoamericanos han utilizado metodologías de enfoque hidrológico a manera de sugerencia que establece cual puede ser el caudal mínimo que hay que dejar en el río; sin embargo, no cuentan con una normatividad que legisle sobre el uso del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Universidad Nacional de Colombia, 2013).
- **Marco legal y normativo sobre el recurso hídrico en Colombia.** En la Tabla 2 se presenta una síntesis normativa colombiana referida al recurso hídrico, aunque en algunas, solo se hace mención de forma tangencial o esta norma puede homologarse a la conservación de los caudales ecológicos.

**Tabla 2.** Marco legal y normativo en Colombia, sobre el recurso hídrico

Organismo o institución	Documento
Presidencia de la República de Colombia	Constitución Política de la República de Colombia: Título I - Capítulo I - Artículo 8, Título I - Capítulo II - Artículo 58, Título II - Capítulo III - Artículo 78 a 82, Título XI Capítulo III - Artículo 313 - numerales 7 y 9
Congreso de la República de Colombia	Leyes 19 de 1958, 23 de 1973, 2811 de 1974, 10 de 1978, 99 de 1993, 142 de 1994, 152 de 1994, 165 de 1994, 373 de 1997, 388 de 1997, 614 de 2000 y 1151 de 2007
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Decreto 1640 de 2012
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Decretos 3930 de 2010, 4728 de 2010, 2350 de 2009, 3600 de 2007, 1480 de 2007, 1324 de 2007, 1323 de 2007, 2570 de 2006, 1900 de 2006, 4742 de 2005, 3440 de 2004, 1443 de 2004, 1200 de 2004, 155 de 2004 y 3100 de 2003. Resoluciones 872 de 2006, 2145 de 2005, 865 de 2004, 240 de 2004 y 0463 de 2005; y la Resolución 2115 de 2007 en unión con el Ministerio de Protección Social
Ministerio de la Protección Social	Decreto 1575 de 2007
IDEAM	Decreto 1729 de 2002.
Ministerio del Medio Ambiente	Decretos 1604 de 2002, 1791 de 1996, 1933 de 1994, 1600 de 1994 y 622 de 1977. Resolución 104/03
Ministerio de Agricultura	1594 de 1984, 1449 de 1977 y 2811 de 1974
Departamento Nacional de Planeación (DNP) - Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES)	Política Nacional de Biodiversidad
Ministerio de Desarrollo Económico	Resolución 1096 de 2000
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca	Resolución 3194 de 2006 y Acuerdo 16/98

Fuente: Aqualimpia, 2015.

El marco legal y normativo permitió contextualizar en Colombia lo existente con respecto a eventos extremos ya que solo se menciona el concepto de ronda hidráulica (hasta 30 m) en el Código Nacional de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente que podría ser un mecanismo de control para pérdidas por inundaciones, sin embargo las generalizaciones no son prudentes en este sentido, más aún cuando esa margen históricamente ha sido sobrepasada durante las épocas de crecientes en ríos de planicie.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se propone la aplicación de un *método holístico de conservación de ecosistemas fluviales* para lo cual se tuvo en cuenta el caudal del río en el tramo estudiado, las exigencias de caudal de la especie piscícola más crítica o con mayor requerimiento dependiente de este, la vegetación ribereña y el suelo circundante al río, en lo que se refiere a infiltración y conductividad hidráulica.

Para evaluar la condición hidráulica del sector del río se realizaron 200 secciones transversales; las secciones tipo se muestran en la Figura 3.

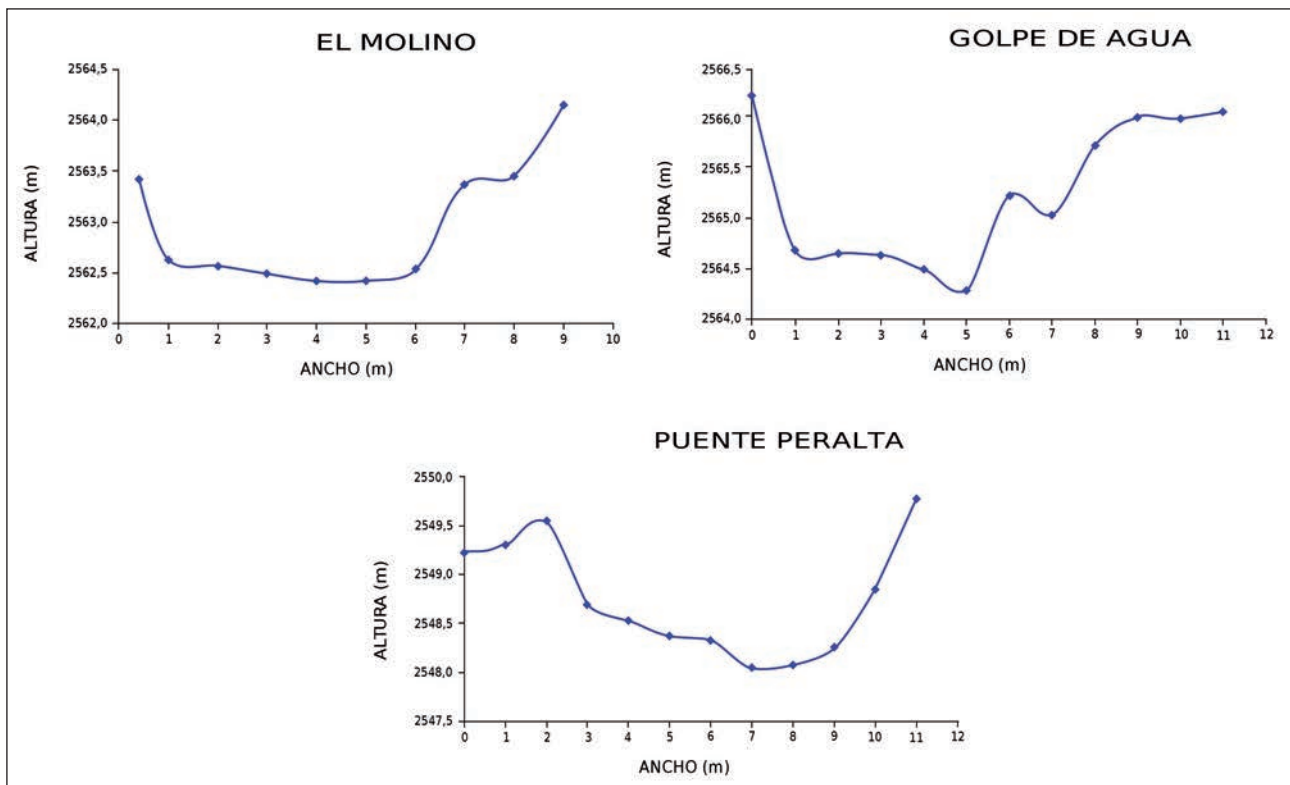


Figura 3. Secciones transversales del río frío en sectores alto, medio y bajo del tramo de estudio

Para el estudio de la vegetación ribereña se realizó un muestreo de vegetación en cuatro sectores del río para identificar las especies presentes en los bosques de galería; se encontró mayor diversidad en los sectores altos del río Frío y a medida que se descendió por la rivera del mismo comienzan a dominar las especies introducidas, lo cual muestra los procesos de intervención de los seres humanos y una degradación de la biodiversidad florística en los sectores más bajos del tramo estudiado.

En términos generales la biodiversidad se encuentra amenazada por especies arbóreas y herbáceas en 25% de las especies identificadas. Las especies introducidas en orden de importancia son: cuatro tipos de Acacia (*Acacia cultriformis*, *Acacia melanoxylon*, *Acacia decurrens*, *Albizia lophanita*); entre las especies arbóreas se encontraron: Chicalá (*Tecoma stans*), Ciprés (*Cupressus lusitanica*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Eucaliptos plateado (*Eucalyptus cinerea*), Urapán (*Fraxinus chinensis*) y Cucubo (*Solanum ovalifolium*). Los planos de inundación estaban invadidos de cuatro tipos de gramíneas: Pasto azul (*Dactylis glomerata*), Pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), Pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y Pasto ryegrass (*Lolium multiflorum*). Estas especies arbóreas al ser introducidas cambian el hábitat para la supervivencia de los peces y no proporcionan las condiciones adecuadas para la permanencia de ellos en la fuente hídrica. Por lo anterior, es importante conservar las especies nativas en la búsqueda de la restauración del medio natural decisivo para el ciclo de vida.

Las especies de sabana que merecen conservarse (Figura 4) con la aplicación de los caudales ambientales son: Alcaparro arbóreo (*Senna viarum*), Aliso (*Alnus acuminata*), Árbol loco (*Smilax pyramidale*), Arrayán (*Myrcianthes leucocoxyla*), Bejuco colorado (*Muehlenbeckia tamnifolia*), Borrachero blanco (*Brugmansia candida*), Carretón blanco (*Trifolium repens*), Carretón rosado (*Trifolium pratense*), Carrizo (*Arundo donax*), Cedrillo (*Phyllanthus salviifolia*), Chilco (*Baccharis latifolia*), Chilco colorado (*Escallonia floribunda*), Ciro (*Baccharis macrantha*), Coronó (*Xylosma speculiferum*), Cucharó (*Myrsine guianensis*), Diente león (*Taraxacum officinale*), Espino (*Duranta mutissi*), Falsa poa (*Holcus lanatus*), Fucsia silvestre (*Fuchsia boliviana*), Guabas (*Fitolaca bogotensis*), Guayacán de Manzales (*Lafloensia acuminata*), Hierba mora (*Solanum nigrum*), Higuerrilla (*Ricinus communis*), Huesito o jazmín de monte (*Pittosporum undulatum*), Laurel de cera (*Morella pubescens*), Lengua de vaca (*Rumex obtusifolius*), Madreselva (*Lonicera caprifolium*), Mano de oso (*Oreopanax floribundum*), Membrillo o mimbres (*Salix viminalis*), Mora silvestre (*Rubus floribundum*), Ojo de poeta (*Thunbergia alata*), Ortiga (*Urtica urens*), Pecositas o corta pico (*Bomarea caldasi*), Sangreado (*Croton bogolense*), Sauce llorón (*Salix humboldtiana*), Sauco (*Sambucus peruviana*), Sauco de monte (*Viburnum triphyllum*), Suelda con suelda (*Commelina* sp.), Trompeto (*Bocconia frutescens*), Tuno esmeraldo (*Miconia squamulosa*) y Uruapo o garagay (*Citharexylum subflavescens*).



Figura 4. Especies vegetales que se encuentran amenazadas en la Sabana de Bogotá

Tabla 3. Leyenda de suelos en el tramo de estudio río Frío

Forma de terreno	Conductividad hidráulica (cm/h)	Infiltración (cm/h)	Clasificación
Eje de explayamiento	5.71	4.68	Moderada
Plano nivel medio	1.46	7.14	Moderadamente rápida
Plano de desborde	6.64	4.68	Moderada

En cuanto al análisis del suelo circundante en la Tabla 3 se presenta la leyenda de las áreas que cercanas al tramo de estudio del río.

En estos resultados se observa que hay una adecuada relación agua aire en el suelo que permite un movimiento regular de humedad, bueno para el desarrollo de las especies vegetales por lo que no requiere de prácticas de manejo especiales y éste se concreta específicamente a la restauración de coberturas nativas identificadas en la región. La relación entre geometrías de poros macro, meso y micro no muestran evidencias de uso intensivo del suelo, por tanto las tierras analizadas no tienen fenómenos visibles de compactación y la porosidad se encuentra acorde con la granulometría presente en los suelos.

Para realizar la propuesta de prácticas de manejo en los suelos se tuvieron en cuenta tres variables cuantitativas: la pendiente del sector (leída en sentido horizontal) y la interpretación de las coberturas vegetales a través del índice de protección hidrológico ponderado (leído en el sentido de la guía); la tercera variable utilizada fue la infiltración de agua (Figura 5), la cual depende del suelo y muestra la condición de movimiento de agua en el mismo; la entrada de agua al suelo en su primer momento es importante porque indica el efecto de las coberturas vegetales, la composición textural de los suelos, la consistencia y el grado de humedad. Los intervalos de valores considerados para la pendiente de la unidad de tierra, el índice de protección hidrológica ponderado y la infiltración se tomaron de IGAC (1990). La información sobre coberturas vegetales se obtuvo de IGAC (2006) y CAR (2006). La valoración dada a cada cobertura vegetal se realizó con base en la metodología del IGAC (2010). Finalmente

se obtuvieron prácticas de manejo muy intensas, intensas, moderadas y mínimas.



Figura 5. Pruebas de infiltración en zona circundante del tramo de estudio en el río Frío

Con respecto a la especie piscícola se tomó en cuenta el requerimiento de la que se encuentra en peligro de extinción descrita en el Libro rojo de especies dulceacuícolas y es el pez Capitán de la Sabana (*Eremophilus mutisii*), información confirmada en campo con los nativos quienes manifestaron de su escasa presencia en este río. La exigencia del pez crítico fue dada en altura de la lámina de agua con un intervalo entre 0.1 m y 0.9 m, por tal razón fue necesario conocer la sección transversal del cauce y a través de simulación realizada con el software libre Hec Ras, determinar el caudal que para las condiciones específicas del tramo corresponden estas alturas. Esta simulación



se realizó con secciones transversales medidas en campo y calibración del coeficiente de rugosidad trabajado para una mayor confianza en la respuesta. Los valores obtenidos fueron 0.1 m<sup>3</sup>/s y 1.0 m<sup>3</sup>/s que corresponden a los caudales de conservación ya que incluyen además del mínimo requerido, el máximo tolerado por la especie.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES EN EL CASO DE ESTUDIO

El estudio de caudales de conservación es un esfuerzo académico y científico realizado al contexto local en aproximadamente 14 kilómetros del sistema hídrico del río Frío, cuyo Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) se encuentra actualmente lo ejecuta la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Esta investigación se llevó a cabo al mismo tiempo que se realizaban los estudios detallados del suelo por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a solicitud de la misma corporación y en compañía del Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial, y la Gobernación de Cundinamarca.

La sabana de Bogotá por la que pasa el sistema hídrico del río Frío presenta un alto impacto a los ecosistemas naturales debido a que en ella se asientan varios poblados. Las especies ícticas están en peligro de extinción y aún pueden rescatarse con la restauración de la vegetación ribereña que hace parte de la estructura ecológica y depende de los pulsos de inundación que ocurren año tras año. Como parte de este proceso es necesario buscar el equilibrio entre el aprovechamiento del agua superficial y el agua subterránea que se extrae para uso doméstico y agrícola.

El ordenamiento del uso del agua es una problemática que debe resolverse desde las autoridades locales; para el caso que se trabajó, serían las alcaldías de los municipios de Cajicá y Chía. El estudio detallado de suelos a escala 1:10.000 se consideró un referente importante para el ejercicio local, su inclusión en el análisis de los caudales de conservación corresponde a una aplicación de la cual se beneficiaría la población ribereña y a su vez aportaría elementos de decisión para la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca que es la entidad que mantiene el control de la extracción de agua del río Frío realizada por las empresas que cultivan flores.

#### 5. CONCLUSIONES O CONSIDERACIONES FINALES

El método de la curva de duración determina la cantidad de agua que debe permanecer en el cauce, no considera caudales para períodos de estiaje, cuyo valor puede ser inferior a ese dato, la premisa que se aplica es a mayor variabilidad mayor cantidad de agua que fluye por el cauce, no tiene en cuenta

ciclos vitales y el caudal tiende a regularse en una cantidad media.

Se obtuvo un intervalo de caudales necesario para garantizar el hábitat del pez capitán de la sabana específicamente para el tramo de estudio y cuyo valor oscila entre 0,1 (inferior a los caudales medio y base del río) y 1 m<sup>3</sup>/s que implica algunas zonas de desborde, los caudales de concesión varían en el año.

El ecosistema se puede restaurar o conservar con el fin de mantener regulados los caudales de conservación. No solo se da un valor de caudal requerido por la especie sino que, a partir del análisis, se proponen una serie de prácticas de manejo y conservación necesarias para mantener los ecosistemas fluviales en un estado tal que pueda garantizarse la vida en el río, tomando en consideración una especie indicadora que pueda monitorearse o establecer la condición mínima para el repoblamiento.

Al analizar los ecosistemas fluviales desde sus elementos constitutivos, se permite conocer en dónde puede estar la amenaza a los ecosistemas fluviales y posible disminución en la regulación de la función de transferencia de agua desde el paisaje ribereño hasta el cauce.

En el tramo estudiado los suelos presentaban buena relación agua – aire, adecuada relación entre poros macro, meso y micro, lo cual pudo verificarse mediante la aplicación de pruebas de infiltración y conductividad en las unidades de tierras calificadas con un movimiento de agua entre moderado y moderadamente rápido. Este resultado y la generalización de un relieve plano, determina que las prácticas de manejo de suelos para regular los flujos hipodérmicos hacia el río sean de categoría mínima.

La amenaza al ecosistema fluvial se identificó con la disminución del área de los bosques riparios de sabana seca, que aun alberga especies dignas de conservar. Las especies arbóreas introducidas de variedades de acacias tuvieron una participación del 25% de las especies identificadas en los tres tramos estudiados. Las prácticas que se recomiendan para garantizar el caudal de conservación de la especie indicadora en el cauce, debe implementar la permanencia de las especies naturales y erradicación de las especies introducidas que tienden a reseca los suelos.

#### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agualimpia, Y. 2015. Caudales de Conservación de Los Ecosistemas Fluviales en Tramos de los ríos Cuja y Frío. Tesis doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
- Agualimpia, Y. y Castro, C. 2006. Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. Revista

- Tecnogestión vol. 3 (1) Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Agualimpia, Y. & Castro, C. 2012. Aprovechamiento responsable del recurso hídrico fluvial – Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental - Vol. XXXIII, No. 3, Set - Dic 2012, p. 18-32 - [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382012000300002&lng=pt&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000300002&lng=pt&nrm=iso)
- Agualimpia, Y. y Castro, C. 2013. Capacidad de reserva de agua en los suelos del borde norte de Bogotá - Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias - Universidad Agraria de la Habana - Formato papel: ISSN-1010-2760, versión electrónica: ISSN-2071-0054 – 22 (1): 2013. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542013000100010&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542013000100010&script=sci_arttext)
- CAR 2006. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Bogotá. 104.
- Diez, J y Burbano, L. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. Ingeniería e Investigación, vol. 26, núm. 1, abril, 2006, pp. 58-68. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326107>
- IDEAM. 2000. Estudio Nacional del Agua, pp. 14-16. Extraído de: <http://www.ibcperu.org/doc/isis/7561.pdf> en junio de 2012.
- IDEAM. 2004. Estudio Nacional del Agua 2004. Extraído de: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=874&conID=910>
- IDEAM. 2010. Estudio Nacional del Agua 2010. Extraído de: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?IServicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&IFuncion=loadContenidoPublicacion&id=1507>, en marzo de 2011.
- IDEAM. 2014. Estudio Nacional del Agua (ENA). Bogotá-Colombia: 493.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1990). Propiedades Físicas de los suelos, Bogotá: 813.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 2006. Levantamiento de la Cobertura Vegetal y Uso del Suelo del Área de Jurisdicción CAR. Escala 1:25.000. Bogotá: 243.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2010. Zonificación Ambiental de Cuencas hidrográficas. Imprenta Nacional de Colombia. 616.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. 2013. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Bogotá, D.C.
- Mojica, J., Castellanos, C., Usma, J. y Álvarez, R. (eds.). 2002. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia y Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia.
- Monsalve, E. y Bustamante, C. 2009. Determinación de las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía – Puente Balboa. pp. 285-302. Caudal ambiental, Conceptos, Experiencias y Desafíos. Editorial Universidad del Valle. Cali – Colombia.
- Palau, I. 2003. Régimen ambiental de caudales: estado del arte. In proceedings: Régimen ambiental de caudales. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología, E.U.I.T., Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Cuenca. España.
- USTA. 2004. Diagnóstico y alternativas de solución para mejorar el rendimiento y la calidad del recurso hídrico en la cuenca media del río Sumapaz. Tesis de especialización. Bogotá, Colombia.
- Vásquez, G., Ramírez, J., Blanco, J., Navarrete, A., Cantera, J. y Montoya, P. 2009. Determinación de los caudales ecológicos para el normal desarrollo de la biota acuática en las cuencas media y baja de los ríos Timba, Claro, Amaime, Tuluá y Pescador en el departamento del Valle del Cauca. pp. 311-325. Caudal ambiental, Conceptos, Experiencias y Desafíos. Editorial Universidad del Valle. Cali – Colombia.
- Venegas, C. E. 2013. Estudio Preliminar de la subcuenca del río Frío en el tramo comprendido por el municipio de Cajicá. Tesis especialización. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Extraído de: [http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11079/1/Entrega%20Final\\_Estudio%20Preliminar%20Estado%20del%20R%C3%ADo%20Fr%C3%ADo\\_Cesar%20Venegas.pdf](http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11079/1/Entrega%20Final_Estudio%20Preliminar%20Estado%20del%20R%C3%ADo%20Fr%C3%ADo_Cesar%20Venegas.pdf) 2017.
- Zúñiga, M. 2009. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental: caso del río Meléndez (Valle del Cauca, Colombia). pp. 311-325. Caudal ambiental, Conceptos, Experiencias y Desafíos. Editorial Universidad del Valle. Cali – Colombia.

## EL AGUA, EL INGRESO Y LA POBREZA

### WATER, INCOME AND POVERTY

Vargas Hidalgo, Alberto<sup>1</sup>; Martínez Austria, Polioptro<sup>1</sup>

#### Resumen

El acceso al agua potable no sólo depende de la condición geográfica o de desarrollo del lugar donde se habite, sino que también depende también del nivel de ingresos. La pobreza afecta negativamente el acceso al agua potable, se habite en una ciudad o en una zona rural. Así lo han reconocido las Naciones Unidas en la definición del Derecho Humano al Agua, de aquí la importancia de conocer los ingresos por deciles y confrontarlos con las tarifas de agua, para establecer los criterios que permitan a los estratos más pobres tener acceso al agua potable. La política económica actual del país y los bajos ingresos que percibe la mayoría de la población hacen que para muchos cada día sea más difícil tener acceso al agua potable. Es importante conocer los ingresos de los diferentes deciles de la población y compararlos con las tarifas de agua para establecer una política pública basada en la justicia social, que permita establecer un pago asequible por el agua de acuerdo a los ingresos de la población, privilegiando a los que menos tienen, bajo el marco establecido por la Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos de la ONU. Para tal efecto se hizo uso de los datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, del Dictamen 142 del H. Congreso del Estado de Puebla (Municipal 2014) y del Plan Municipal de Desarrollo del Municipio de Puebla. La investigación mostró que el cobro del agua no es homogéneo en todos los deciles, así en los deciles I, VI, VII, VIII y IX la tarifa del agua está siempre por encima del límite recomendado por la ONU, situación agravante para el decil I, que es el de menores ingresos (2,572.00 \$/mes-hogar). Para alcanzar el criterio de asequibilidad del derecho humano al agua, así como por justicia social, es necesario establecer subsidios cruzados, aumentar el costo de los servicios de agua a los deciles IX y X que son los de mayores ingresos para subsidiar a los deciles I, II, III, y IV, además de replantear la tarifa del servicio de agua a los deciles V y VII.

**Palabras clave:** ingreso, tarifa de agua, pobreza.

#### Abstract

Access to drinking water depends not only on the geographic or developmental condition of the place where it is inhabited, but also on the level of income. Poverty negatively affects access to drinking water, whether it lives in a city or in a rural area. This has been recognized by the United Nations in the definition of the Human Right to Water; hence the importance of knowing the incomes of different social classes and comparing them with water tariffs, in order to establish the rules that allow the poorest population to have access to drinking water. The country's current economic policy and the low incomes of the majority of the population make it, for many, increasingly difficult to access drinking water. It is important to know the income of different population deciles and compare them with water tariffs to establish a public policy based on social justice, which allows establishing an affordable payment for water according to the income of the population, privileging Those who have the least, under the framework established by the Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights. For that purpose, statistical data was used by the National Institute of Statistics, Geography and Informatics and the National Council for Evaluation of Social Development Policy, Opinion 142 of the H. Congress of the State of Puebla (Municipal 2014) and the Municipal Plan Of Development of the Municipality of Puebla. The research showed that the water tariff is not homogeneous in all the deciles, as in I, VI, VII, VIII and IX the water tariff is always above the limit recommended by the UN, an aggravating situation for decile I, Which is the lowest income decile (\$ 2,572.00 / month home). To achieve the criterion of affordability of the human right to water, as well as social justice, it is necessary to make cross subsidies, increase the cost of water services to the IX and X deciles that are the highest income to subsidize the I , II, III, and IV, in addition to restating the tariff of the water service to V and VII.

**Key words:** income, water rate, poverty.

1 Universidad de las Américas Puebla. México. alberto.vargasho@udlap.mx.



## 1. INTRODUCCIÓN

*“El agua es la cosa más necesaria para la vida, pero es fácil corromperla... Por ello necesita que la ley venga en su auxilio. La ley que yo propongo es: aquel que corrompa el agua ajena, agua de manantial o de lluvia, o la desvíe de su cauce, además de la reparación del daño tendrá que limpiar la fuente o depósito conforme a las reglas prescritas por los intérpretes, según las exigencias de los casos y las personas”. Platón<sup>2</sup>*

A pesar de los avances registrados en las metas del milenio, entre las cuales se encuentra incrementar el acceso a las fuentes seguras de agua y el saneamiento (ONU, 2015), en el mundo todavía 780 millones de personas carecen de acceso a fuentes seguras de agua potable (i.e. (UNICEF and World Health Organization, 2015), (UN-WATER, 2017)).

En América Latina y el Caribe, la cobertura de agua potable alcanzó el 93 %, lo que implica que aún 34 millones de personas no tienen acceso al agua potable (Soulie Faure y otros, 2013). Estas cifras que podrían parecer halagüeñas, esconden la relación entre agua y pobreza. En efecto, de los 34 millones de personas sin acceso a agua potable en la región, 21 millones se encuentran en el medio rural (Banco de Desarrollo de América Latina, 2017). La situación en México no es diferente: con una cobertura global del 92.4%, en el medio rural ésta es de 82.9% (CONAGUA, 2015).

Por otra parte, el acceso al agua potable no sólo depende de la condición donde se habite, ya sea rural o urbana, sino que depende también del nivel de ingresos. La pobreza afecta negativamente el acceso al agua potable, se habite en una ciudad o no. Así lo han reconocido las Naciones Unidas en la definición del Derecho Humano al Agua, que establece que para lograr la plena vigencia de este derecho, ésta debe ser asequible, lo que implica que *“los hogares más pobres no deberían cargar con una parte desproporcionadamente alta de los gastos en agua y saneamiento* (Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos, ONU, 2011”).

La relación entre el acceso al agua y la pobreza ha sido bien establecida (i.e. Poverty-Environment Partnership, 2006, Asian Development Bank, 2004). Es una relación que se retroalimenta: los pobres tienen menos acceso al agua, y la falta de agua es un factor que aumenta la pobreza (Baker, Koppen & Shah, 2000, Guevara Sanginés & Lara Pulido, 2015).

El objetivo de este artículo es analizar de manera detallada, incorporando la distribución del ingreso por deciles, la relación entre la pobreza, el ingreso y el acceso al agua, haciendo recomendaciones sobre la mejor manera de garantizar el acceso al agua a los más pobres.

El análisis teórico que se presenta es en la ciudad de Puebla y consiste en comparar el ingreso de la población contra la tarifa del agua, si bien el ingreso y la

pobreza la estudia el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el gobierno federal determinó que las cifras oficiales sean las proporcionadas por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), que es la encargada de medir la pobreza y evaluar los programas y políticas sociales del gobierno federal. En algunas ocasiones, por razones metodológicas se han encontrado diferencias entre las cifras reportadas por CONEVAL al ser comparadas con otras instituciones. En cuanto al ingreso se consideró tomar registros desde los 80's pero por el cambio de metodologías para su medición y la creación del CONEVAL ocasionaron que los datos no sean uniformes, por lo que se consideró los últimos reportados por CONEVAL.

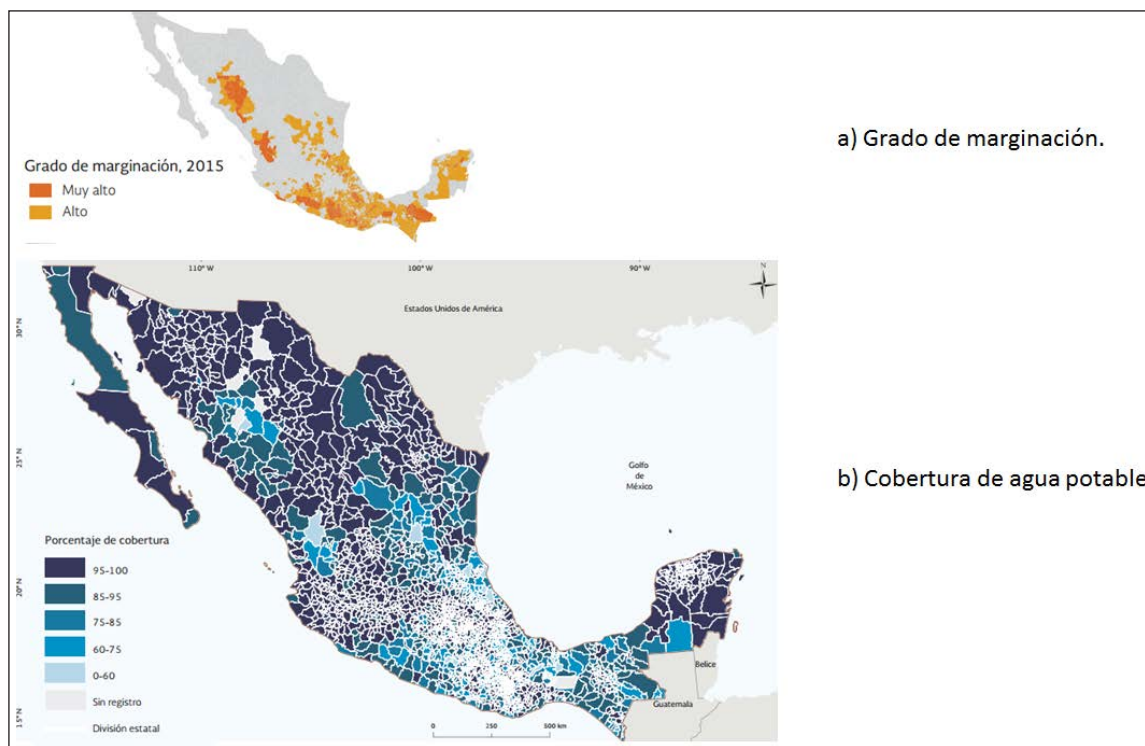
En cuanto a los salarios, estos los fija la Comisión Nacional de Salarios Mínimos del Congreso Federal, los que siempre están por debajo de la inflación y no cubren las necesidades de la población. Para el desarrollo del ejercicio se supuso que para los próximos 12 años no habrá cambios macroeconómicos importantes, con un elemento primordial, salarios bajos para ser competitivos en el ámbito global, y de esta manera atraer inversiones extranjeras que generen empleos. También se supuso que existe agua abundante para la oferta, que el servicio es continuo, y que la calidad del agua está dentro de las normas de calidad potable.

## 2. AGUA Y POBREZA EN MÉXICO

En el caso de México, la política económica que se ha implantado durante las últimas décadas bajo el modelo neoliberal, ha generado que el acceso al agua potable con un servicio de calidad, sea cada vez más difícil para las familias con menos ingresos. En el informe final de su visita a México, el Relator Especial sobre los derechos humanos al agua y saneamiento de las Naciones Unidas establece que *“funcionarios a menudo me reportaron estadísticas de que 94% de la población mexicana tiene acceso al agua potable y 93% al saneamiento. Sin embargo, es importante subrayar que dichas cifras, si bien son impresionantes, solo reflejan la existencia de alguna forma de infraestructura y definitivamente no se traducen en acceso real al agua y al saneamiento en las casas de las personas, que es dramáticamente inferior (Heller, 2017)”*.

En la Figura 1 se muestran dos gráficas: la primera ilustra la ubicación de los municipios con alto y muy alto grado de marginación en México; y la segunda los porcentajes de cobertura de agua potable. Como puede observarse, existe una elevada correlación entre la pobreza municipal y la baja cobertura de agua potable. De hecho, en algunos de los municipios con mayor marginación, no se reportan datos.

2 Platón, Las leyes, libro VIII.



**Figura 1.** Grado de marginación y cobertura de agua potable en México (construida con gráficas de (CONAGUA 2016))

Considerando las ciudades, no se cuenta con datos diferenciados sobre la asequibilidad del servicio para los más pobres. Sin embargo, aún dentro de las ciudades se registra desigualdad en el suministro. Por ejemplo, en su informe final de visita a México, el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para el derecho humano al agua y saneamiento, señala que “Incluso dentro de la Ciudad de México, el panorama es sumamente variable e incluye la no disponibilidad de servicios de agua continuos y confiables para la mayoría de la población. De acuerdo con la Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 70% de la población recibe agua durante menos de 12 horas al día” (Heller, 2017).

De acuerdo a los datos proporcionados por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) los resultados de la medición de pobreza en México en 2014 (Hernández Licona, 2016) indican que había 55.3 millones de pobres, es decir que casi el 50% de la población del país vive en estado de pobreza, el mismo Consejo señala que el Coeficiente de Gini pasó de 0.506 en 2008 a 0.509 en 2010, valor que indica que hay una mayor desigualdad en la distribución del ingreso. Así, para el año 2010 el porcentaje de población en situación de pobreza era de 46.1%, que representa 52.8 millones de personas, para el año 2014 el porcentaje subió a 46.2%, que constituye una población en situación de pobreza de 55.3 millones de personas; es decir 2.5 millones de personas más con 2.3 carencias en promedio. En pobreza moderada se encontraban 43.9 millones de personas con 1.9 carencias promedio, y 11.4 millones eran pobres extremos...”En

México solo veinte de cada cien personas no eran pobres ni vulnerables” (Hernández Licona, 2016).

Por otra parte, el salario mínimo que estableció la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos del Congreso, y publicada en el Diario Oficial de la Federación del 19 de diciembre de 2016, y que entró en vigor el 1 de enero de 2017, se fijó en 80.04 pesos mexicanos por día, cantidad equivalente a 4.1 dólares americanos por día (un indocumentado en Estados Unidos de América percibe aproximadamente 4 dólares por hora trabajada). Ante lo precario del salario, los miembros jóvenes y con frecuencia los niños de un hogar tienen que incorporarse a la fuerza laboral, dejando sus estudios o su vivienda para aumentar el ingreso familiar, y de esta manera contar con los recursos económicos que les permita satisfacer sus necesidades básicas. Sin embargo, el proceso inflacionario, los bajos salarios, el desempleo, y el incremento a la tarifa del agua potable, hace cada vez más difícil tener acceso a ésta, hasta un punto donde la familia del hogar decide destinar los precarios recursos obtenidos a cubrir sus necesidades básicas de subsistencia, postergando el pago de la tarifa del agua.

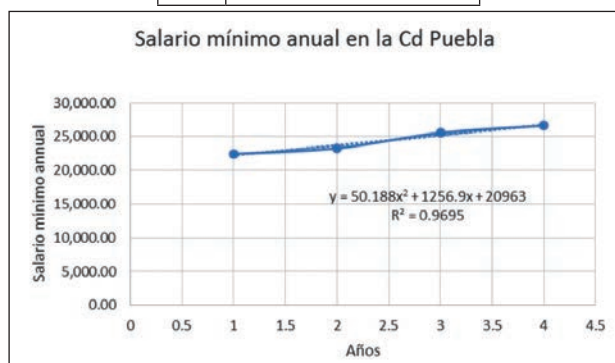
Conforme a las Naciones Unidas, el derecho humano al agua implica que éste debe ser asequible para todos, es decir que “Ningún individuo o grupo debería verse privado del acceso a agua potable por no poder pagar” (Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos, ONU, 2011). Para lograrlo, se recomienda que el gasto en agua no sea superior al 3% de los ingresos de la unidad familiar (Programa ONU-Agua, 2014).

Las tarifas, por otra parte, han continuado subiendo, en una proporción mayor que el salario mínimo. De continuar esta tendencia surge la pregunta de cuándo la proporción de ingreso-tarifa será tal que sea muy difícil para los ciudadanos cubrir su gasto en agua. Alternativamente, cuánto debiera subsidiarse el precio del agua para los pobres de manera que se garantice su derecho al agua. Para las empresas de agua, el análisis del comportamiento de esta relación es importante para estimar el posible incremento de falta de pago de un grupo numeroso de usuarios como son los pobres.

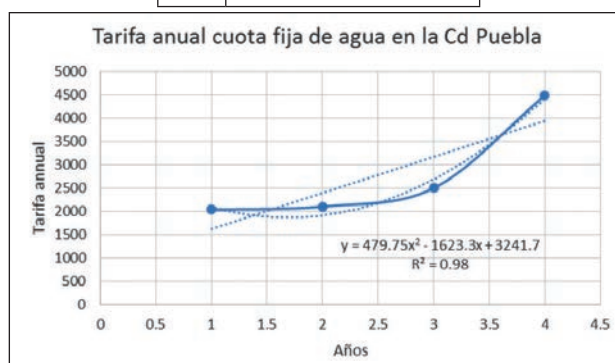
La política económica implementada en México desde 1982, de dar mayor apertura a la inversión privada, en las operaciones económicas nacionales, tanto en los bienes y servicios, como en los activos financieros y movimientos de capitales, con la finalidad de generar más empleos y mejorar la calidad de vida de la población, ha conducido algunos estados y municipios, a otorgar la concesión de la prestación de los servicios públicos a inversionistas privados, entre ellos el servicio de agua potable y saneamiento, pero ante la situación económica actual por la que atraviesa el país, hay sectores de la población, que se verán impedidos a cubrir la tarifa por el consumo de agua al organismo privado. Situación que generará un problema económico a la empresa concesionada y, al Estado<sup>3</sup>, un problema social y de derechos humanos, por los compromisos contraídos en la Constitución Política y en la Ley de Aguas Nacionales de garantizar el abastecimiento<sup>4</sup> y la valoración económica y financiera del agua<sup>5</sup>.

Reflexionando lo mencionado en párrafos anteriores acerca del comportamiento ingreso-tarifa, se presenta el modelo “salario mínimo-tarifa de agua”, para la ciudad de Puebla para el periodo 2017-2030, a continuación se muestran las ecuaciones de crecimiento del salario mínimo y de crecimiento de la tarifa del agua potable con respecto al tiempo. El salario mínimo se obtuvo del Consejo de Representantes de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos (Mínimos 2015), y la tarifa del agua de recibos emitidos por el Organismo Operador de Puebla (Grafica 1).

Año	Salario mínimo anual (\$)
1	22,403.70
2	23,276.05
3	25,586.50
4	26,659.60



Año	Tarifa anual de agua (\$)
1	2035
2	2104
3	2500
4	4488



**Grafica 1. Salario Mínimo Anual-Tarifa Anual.**  
Fuente: Elaboración propia

Al graficar ambas ecuaciones se descubre que se cruzan, dando paso a las siguientes proposiciones; la población con salario mínimo aproximadamente para el año 2023 canalizaría el 100% de su salario para

- 3 La Constitución Política Mexicana en el artículo 4, párrafo sexto a la letra dice: Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.
- 4 La ley de Aguas Nacionales en el apartado L a la letra dice: En situaciones de emergencia, escasez extrema o sobreexplotación, tomar las medidas necesarias, normalmente de carácter transitorio, las cuales cesarán en su aplicación cuando “la Comisión” así lo determine, para garantizar el abastecimiento del uso doméstico y público urbano, a través de la expedición de acuerdos de carácter general; cuando estas acciones pudieren afectar los derechos de concesionarios y asignatarios de aguas nacionales, concertar con los interesados las medidas que correspondan, con apego a esta Ley y sus reglamentos;
- 5 De acuerdo al Artículo 12 BIS 6, fracción XVIII, que a la letra dice; Realizar periódicamente los estudios sobre la valoración económica y financiera del agua por fuente de suministro, localidad y tipo de uso, apoyar el diseño de tarifas de cuenca y de derechos de agua, incluyendo extracción del agua, descarga de aguas residuales y servicios ambientales, así como para difundir tales resultados en la región hidrológica que corresponda, para mejorar el conocimiento de precios y costos de agua y fortalecer la cultura de pago por la gestión y los servicios del agua, y por la protección de ecosistemas vitales vinculados con el agua; lo anterior lo realizará conforme a las disposiciones que dicte la Autoridad en la materia.



tener acceso al agua, teniendo que dejar a un lado sus demás necesidades básicas como el alimento, vestido, salud y hogar (Ver Grafica 2).

$$\frac{dS}{dT} = 50.188 X^2 - 1256.9 X + 20963$$

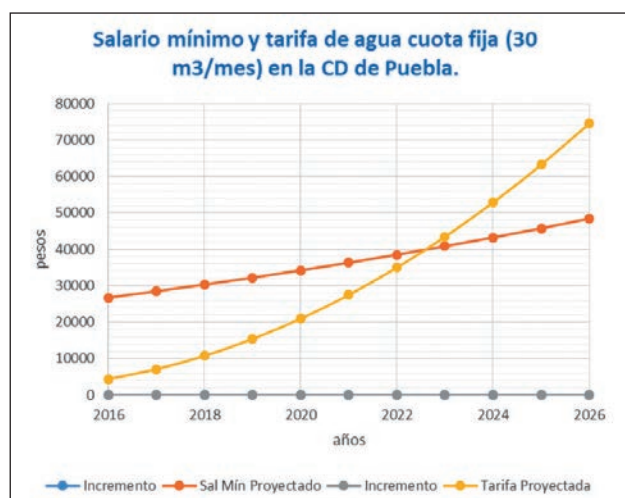
$$\frac{dT}{dt} = 479.75 X^2 - 1623.3 X + 3241.7$$

Donde:

$dS$ = Diferencial de salario mínimo

$dT$ = Diferencial de Tarifa de agua

$dt$ = Diferencial de tiempo.



**Grafica 2.** Salario Mínimo-Tarifa de agua cuota fija.

Fuente: Elaboración propia

Afortunadamente, la generalidad de la población no gana el salario mínimo<sup>6</sup>, y los ingresos por hogar cuando más de uno de sus miembros trabaja es mayor. Por otra parte, el gastopor hogar es el Gasto corriente monetario que está integrado por diferentes apartados<sup>7</sup>, por lo que la ecuación que corresponde a salario, se debe de modificar considerando solo la parte proporcional del ingreso destinado para el

consumo del agua. Este ejercicio se replicará en cada decil para conocer el impacto que tiene en la economía por hogar la tarifa del agua, y en qué casos sería necesario aplicar algún subsidio para satisfacer el derecho humano al agua.

A hora bien, cada decil tiene disímiles ingresos, pero todos los hogares deben de cubrir determinadas necesidades básicas<sup>8</sup>, que una vez cubiertas los llevan a diferentes consumos. Evidentemente es necesario presentar el comportamiento de cada decil y encontrar en cuántos de ellos se traspasan las curvas ingreso-gasto en agua y en qué tiempo sucederá este encuentro, con el objetivo de implementar las políticas públicas adecuadas que permitan tener acceso al agua en forma asequible.

Considerando el reporte “Especiales 2015, de la Encuesta Nacional de Ingresos Gastos de INEGI”, se procedió a elaborar la tabla 1, donde se exhibe el ingreso total promedio mensual por hogar y por decil.

**Tabla 1.** Ingreso corriente total promedio mensual por hogar y por decil.

Deciles	2010	2012	2014
I	2,387	2,519	2,572
II	4,201	4,245	4,240
III	5,619	5,663	5,559
IV	7,072	7,023	6,892
V	8,628	8,607	8,300
VI	10,459	10,388	9,951
VII	12,815	12,803	12,074
VIII	16,229	16,142	15,159
IX	22,003	21,960	20,721
X	45,823	47,871	46,928

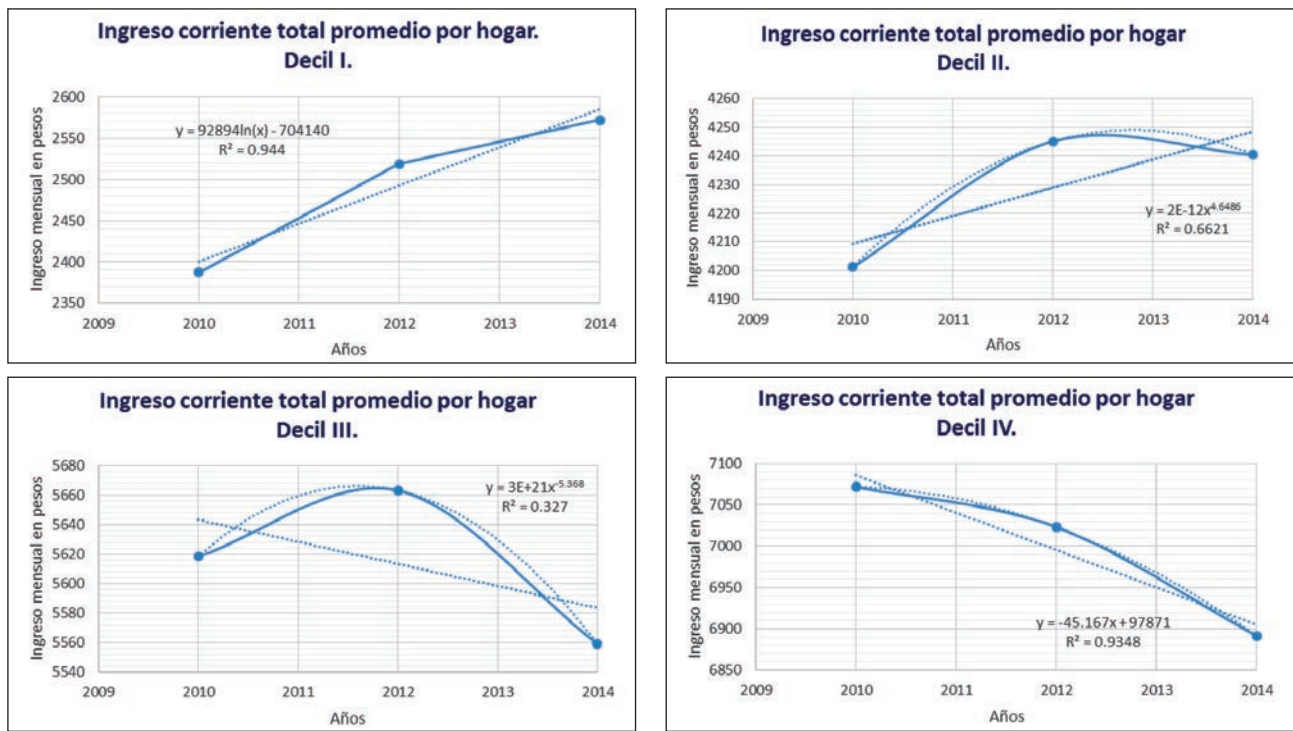
Fuente: Elaboración propia basada en INEGI 2015

Con esta información, se realizaron las siguientes gráficas, donde se muestra el comportamiento del ingreso corriente total promedio mensual por hogar para cada decil. (Graficas 3a y 3b).

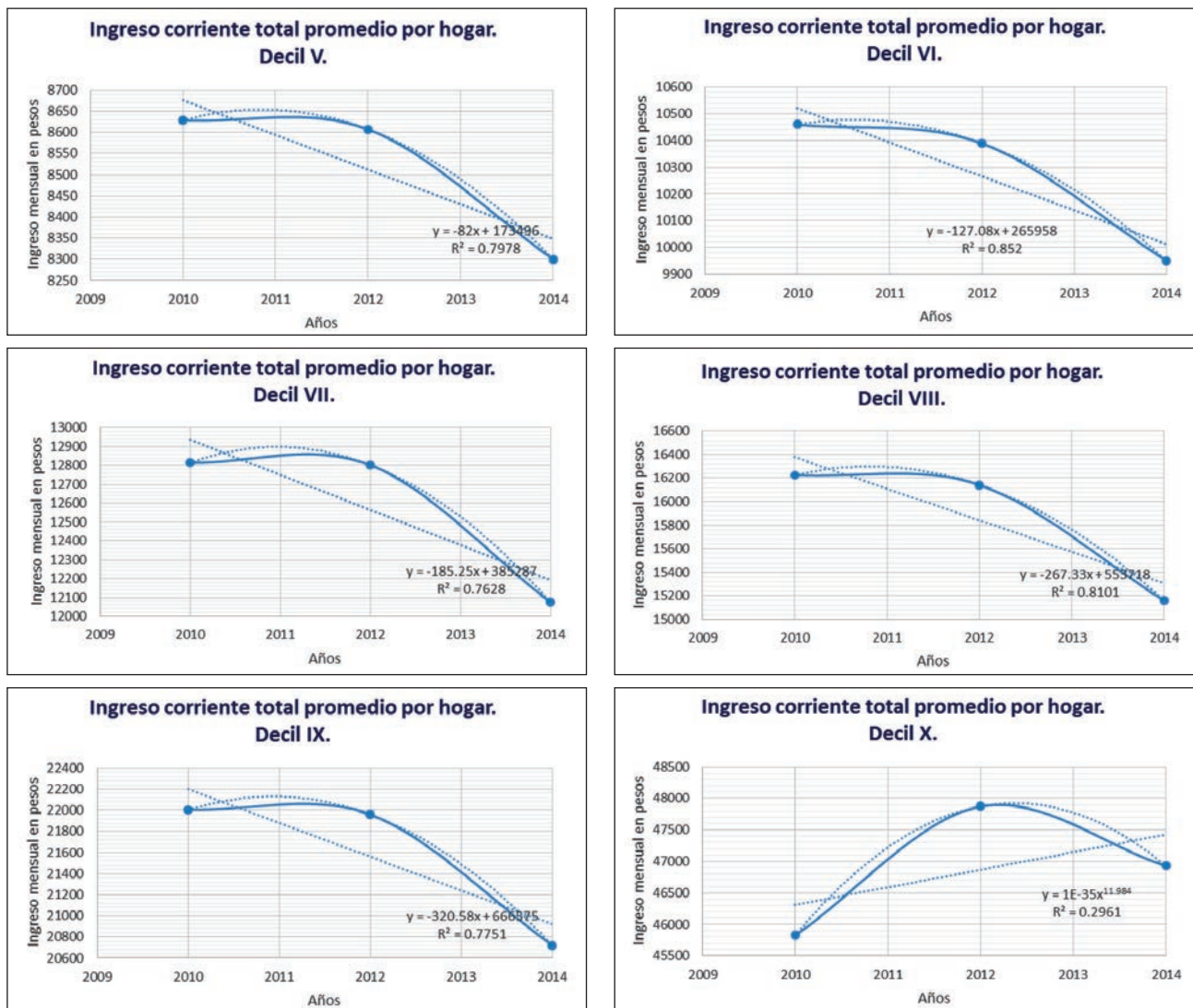
<sup>6</sup> CONEVAL reporto en 2012 que los perceptores por hogar fueron de 2.3 y el ingreso corriente total promedio trimestral por hogares agrupados en deciles tienen una variación desde \$7,556 hasta \$143,614 pesos para los deciles 1 y 10 respectivamente.

<sup>7</sup> Gasto corriente monetario=Alimentos, bebidas y tabaco + vestido y calzado + vivienda y servicios de conservación, energía eléctrica y combustibles + artículos y servicios para la limpieza, cuidados de la casa, enseres domésticos y muebles, cristalería, utensilios domésticos y blancos + cuidados de la salud + transporte; adquisición, mantenimiento, accesorios y servicios para vehículos; comunicaciones + servicios de educación, artículos educativos, artículos de esparcimiento + cuidados personales, accesorios y efectos personales y otros gastos diversos + transferencias de gasto.

<sup>8</sup> Abraham Maslow (1908-1970), psicólogo humanista norteamericano que en la primera mitad del siglo XX formuló “Una teoría sobre la motivación humana” (A Theory of Human Motivation) que es una de las teorías de motivación más conocidas acerca del comportamiento humano según nuestras necesidades. En la base de la pirámide aparecen nuestras necesidades fisiológicas, que todos los humanos necesitamos cubrir en primera instancia. Una vez cubiertas, se busca satisfacer necesidades inmediatamente superiores, pero no se puede llegar a un escalón superior si no se han cubierto antes las inferiores. Según se va satisfaciendo las necesidades más básicas, se desarrollan necesidades y deseos más elevados. En un primer nivel están las necesidades fisiológicas (respirar, alimentarse, descansar, sexo, homeóstasis) en un segundo nivel, la seguridad (seguridad física, de empleo, de recursos, moral, familiar, de salud), en un tercer nivel, las sociales (amistad, afecto, intimidad), en un cuarto nivel, la autoestima o reconocimiento (éxito, reconocimiento, respeto, confianza), y en el quinto nivel la autorrealización.



Gráfica 3a. Gráficos de Ingreso corriente total promedio por hogar y por decil



Gráfica 3b. Gráficos de Ingreso corriente total promedio por hogar y por decil

Se observa que el único decil que muestra una tendencia al alza es el decil "I", pero con ingresos mensuales no superiores a los 2,600, los demás deciles presentan una tendencia a la baja. De estas

tendencias se derivó la Tabla 2, de ingreso corriente total promedio mensual por hogar y su tendencia hacia el año 2030.

**Tabla 2.** Tendencia del ingreso corriente total promedio mensual por hogar al 2030.

Decil	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024	2026	2028	2030
I	2387	2519	2572	2678	2771	2863	2954	3046	3138	3230	3321
II	4201	4245	4240	4595	4616	4638	4659	4680	4702	4724	4745
III	5619	5663	5559	5478	5449	5420	5391	5363	5334	5306	5278
IV	7072	7023	6892	6814	6724	6634	6543	6453	6363	6272	6182
V	8628	8607	8300	8184	8020	7856	7692	7528	7364	7200	7036
VI	10459	10388	9951	9765	9511	9256	9002	8748	8494	8240	7986
VII	12815	12803	12074	11823	11453	11082	10712	10341	9971	9600	9230
VIII	16229	16142	15159	14781	14246	13711	13177	12642	12107	11573	11038
IX	22003	21960	20721	20286	19645	19003	18362	17721	17080	16439	15798
X	45823	47871	46928	39904	40381	40863	41351	41843	42342	42845	43354

Fuente: Elaboración propia

Del ingreso corriente total promedio mensual por decil, la población destina diferentes porcentajes de su ingreso para satisfacer sus necesidades,

porcentajes que se presenta en la tabla 3, la cual se elaboró considerando la "Encuesta Nacional de Ingresos Gastos, 2014 de INEGI".

**Tabla 3.** Estructura de gasto corriente monetario 2014 en %.

Gastos corriente monetario por deciles de ingreso	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Transferencia de gasto	1.10	1.35	1.60	1.85	2.10	2.64	3.18	3.72	4.26	4.80
Cuidados personales	7.20	7.18	7.15	7.13	7.10	7.2	7.3	7.40	7.50	7.60
Educación y esparcimiento	5.60	6.58	7.55	8.53	9.50	11.72	13.94	16.16	18.38	20.60
Transporte y comunicaciones	11.30	12.9	14.50	16.10	17.70	18.12	18.54	18.96	19.38	19.80
Cuidado de la salud	2.80	2.53	2.25	1.98	1.70	2.02	2.34	2.66	2.98	3.30
Artículos y servicios para la casa	6.50	6.10	5.70	5.30	4.90	5.56	6.22	6.88	7.54	8.20
Vivienda y combustible	10.50	10.60	10.70	10.80	10.90	10.42	9.94	9.46	8.98	8.50
Vestido y calzado	4.20	4.25	4.30	4.35	4.40	4.48	4.56	4.64	4.72	4.80
Alimentos, bebidas y tabaco	50.70	48.45	46.20	43.95	41.70	37.86	34.02	30.18	26.34	22.50

Fuente. Elaboración propia

En ella se muestra la estructura de gasto corriente monetario por deciles, señalando el gasto corriente monetario en porcentaje. Así, el decil "I" gasta el "50.7%" de su ingreso en alimentos, bebidas y tabaco, mientras que el decil "X" para el mismo rubro gasta el "22.5%" de su ingreso.

El análisis que se presenta a continuación se hace para la cuota fija mensual en virtud de que el 90% de los usuarios en la ciudad caso de estudio, están en cuota fija<sup>2</sup>.

**Tabla 4.** Cuota fija mensual por toma en la Cd. De Puebla.

Extrato	2014	2015	2016	2017
1	105.22	109.92	114.62	122.36
2	105.22	109.92	114.62	122.36
3	105.22	109.92	114.62	122.36
4	319.17	333.41	347.65	371.12
5	508.77	531.475	554.18	591.60
6	916.58	957.48	998.38	1065.79

Fuente: Elaboración propia con datos del SOAPAP

<sup>9</sup> Declaración realizada por el Director de Comunicación Social del SOAPAP a la revista Proceso, de fecha 14 de marzo de 2014. [www.proceso.com.mx/367264/avala\\_congreso\\_aumento\\_mensual\\_de\\_tarifa\\_de\\_agua\\_en\\_Puebla](http://www.proceso.com.mx/367264/avala_congreso_aumento_mensual_de_tarifa_de_agua_en_Puebla).



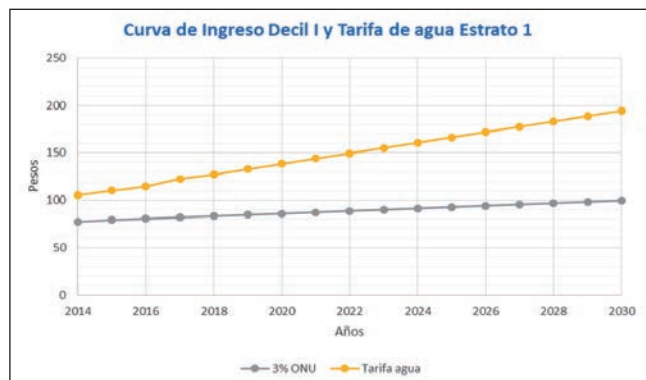
El pago del suministro de agua en la ciudad de Puebla está clasificado en seis estratos y el gobierno federal clasifica el ingreso mensual por hogar en deciles, se propone por la similitud de ingresos que el estrato 1 corresponda al decil I y que el estrato 2 corresponda al decil II y III, así hasta el estrato 6 que corresponda al decil X, como se muestra en la Tabla 5.

Bajo este criterio y considerando que continúan las mismas condiciones socioeconómicas en el país durante los próximos doce años, se presentan los siguientes gráficos “Curvas de Ingresos por Decil y Tarifa de agua por Estrato hacia el año 2030”, y se compara el ingreso mensual por hogar con respecto al 3% del costo de agua recomendado por la ONU, cada decil tiene un comportamiento diferente como se observa a continuación en cada uno de los diez gráficos (Gráficas 4 a 13. Curva de Ingreso por decil y Tarifa de agua por Estrato).

**Tabla 5.** Ingreso corriente total promedio mensual por hogar.

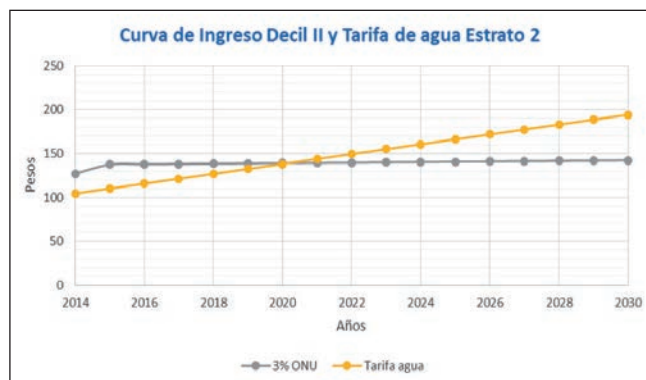
Pago del agua/estrato	Deciles	2010	2012	2014
1	I	2,387	2,519	2,572
2	II	4,201	4,245	4,240
2	III	5,619	5,663	5,559
3	IV	7,072	7,023	6,892
3	V	8,628	8,607	8,300
4	VI	10,459	10,388	9,951
4	VII	12,815	12,803	12,074
5	VIII	16,229	16,142	15,159
5	IX	22,003	21,960	20,721
6	X	45,823	47,871	46,928

Fuente: Elaboración propia



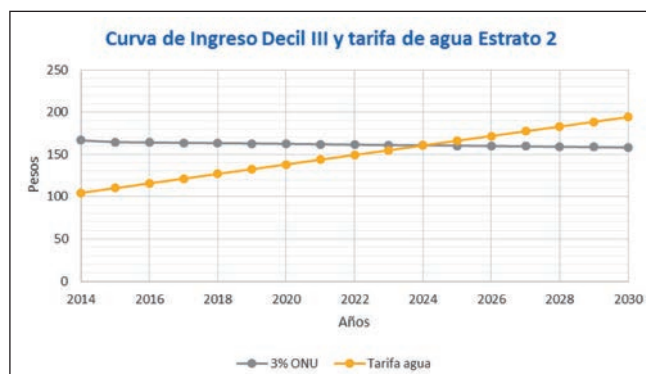
Hogares de menor ingreso promedio mensual (2,572.00\$/mes). De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 50.7% de su ingreso. En 2017 dedican el 4.49% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 5.85% de su ingreso para el pago del servicio. En todo el periodo analizado, la curva de la tarifa de agua esta por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. Al final del periodo el índice entre tarifa del agua y el 3% de pago recomendado por la ONU es de 195.06%

**Gráfica 4.** Curva de Ingreso decil I y tarifa de agua por estrato 1



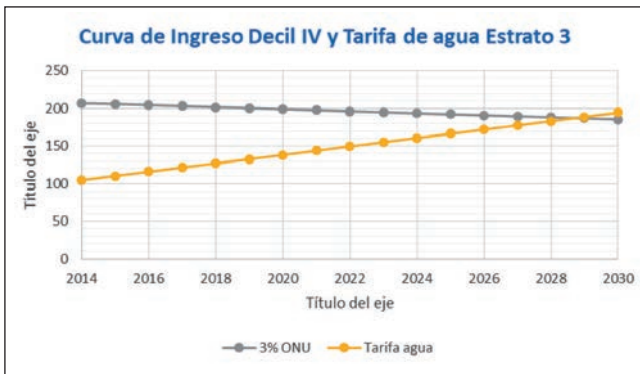
Hogares con un ingreso promedio mensual de 4,240.00\$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 48.45% de su ingreso. En 2017 dedican el 2.64% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 4.10% de su ingreso para el pago del servicio. A partir del año 2020, la curva de la tarifa de agua estará por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU, teniendo que pagar más por el servicio del agua.

**Gráfica 5.** Curva de Ingreso decil II y tarifa de agua por estrato 2



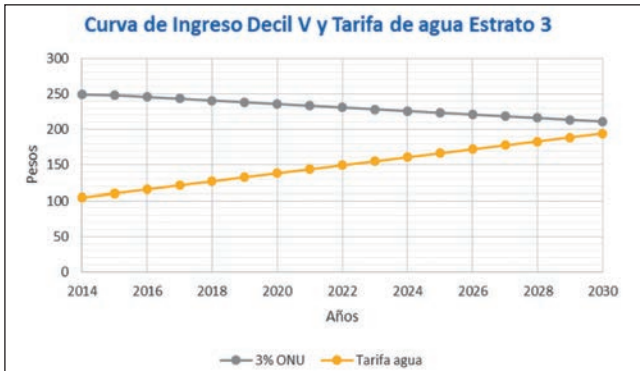
Hogares con un ingreso promedio mensual de 5,559.00\$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 46.2% de su ingreso. En 2017 dedican el 2.22% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 3.68% de su ingreso para el pago del servicio. A partir del año 2024, la curva de la tarifa de agua estará por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU, teniendo que pagar más por el servicio del agua.

**Gráfica 6.** Curva de Ingreso decil III y tarifa de agua por estrato 2



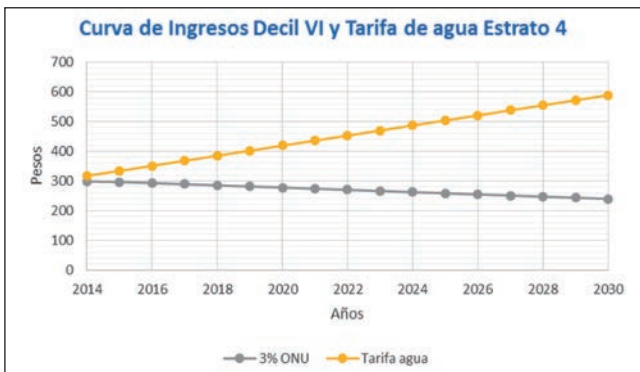
Hogares con un ingreso promedio mensual de 6,892.00 \$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 43.95% de su ingreso. En 2017 dedican el 1.79% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 3.14% de su ingreso para el pago del servicio. A partir del año 2029, la curva de la tarifa de agua estará por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU, teniendo que pagar más por el servicio del agua.

Gráfica 7. Curva de Ingreso decil IV y tarifa de agua por estrato 3



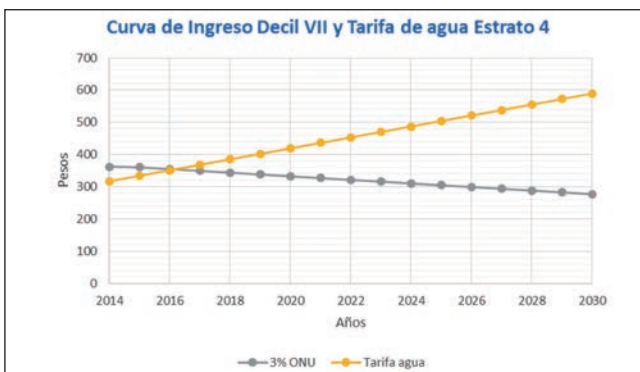
Hogares con un ingreso promedio mensual de 8,300.00 \$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 41.7% de su ingreso. En 2017 dedican el 1.5% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 2.76% de su ingreso para el pago del servicio. La curva de la tarifa de agua en todo el período se encuentra por debajo del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. Sin embargo al final del período el índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU es de 92.08%

Gráfica 8. Curva de Ingreso decil V y tarifa de agua por estrato 3



Hogares con un ingreso promedio mensual de 9,951.00 \$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 37.86% de su ingreso. En 2017 dedican el 3.82% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 7.38% de su ingreso para el pago del servicio. La curva de la tarifa de agua en todo el período se encuentra por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. El índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU al final del periodo es de 245.97%

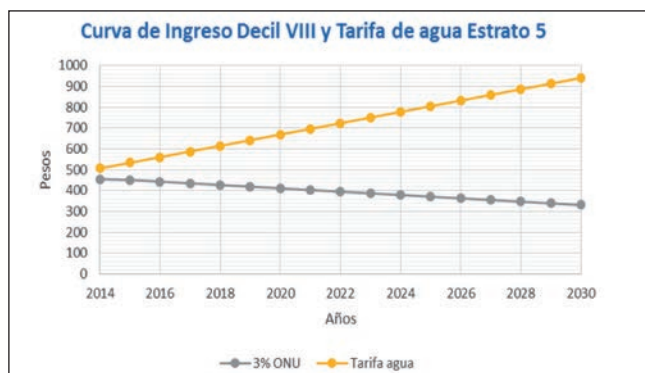
Gráfica 9. Curva de Ingreso decil VI y tarifa de agua por estrato 4



Hogares con un ingreso promedio mensual de 12,074.00 \$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 34.02% de su ingreso. En 2017 dedican el 3.16% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 6.38% de su ingreso para el pago del servicio. La curva de la tarifa de agua a partir de 2016 se encuentra por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. El índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU al final del período es de 212.82%

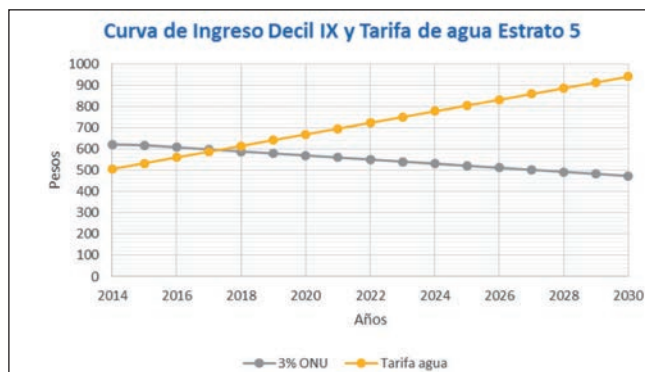
Gráfica 10. Curva de Ingreso decil VII y tarifa de agua por estrato 4





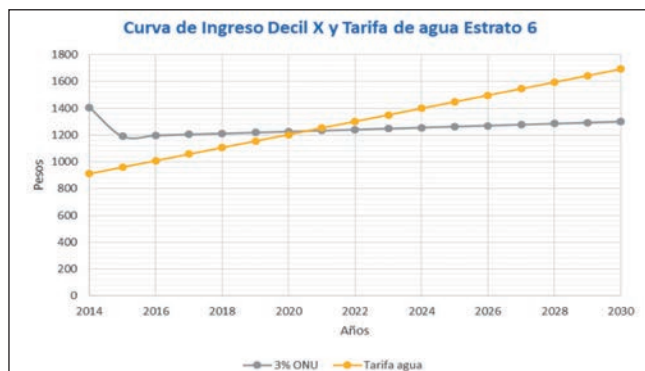
Hogares con un ingreso promedio mensual de 15,159.00\$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 30.18% de su ingreso. En 2017 dedican el 4.05% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 8.52% de su ingreso para el pago del servicio. La curva de la tarifa de agua en todo el período se encuentra por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. El índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU al final del período es de 284.05% siendo este porcentaje el mayor de todos los deciles.

Gráfica 11. Curva de Ingreso decil VIII y tarifa de agua por estrato 5



Hogares con un ingreso promedio mensual de 20,721.00\$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 26.34% de su ingreso. En 2017 dedican el 2.95% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 5.95% de su ingreso para el pago del servicio. La curva de la tarifa de agua a partir de 2018 se encuentra por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. El índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU al

Gráfica 12. Curva de Ingreso decil IX y tarifa de agua por estrato 5



Hogares con un ingreso promedio mensual de 46,928.00\$/mes. De acuerdo a CONEVAL para alimentos y bebidas destinan el 22.5% de su ingreso. En 2017 dedican el 2.63% de su ingreso al agua, para el 2030 reservaran el 3.9% de su ingreso para el pago del servicio. Es el decil de mayores ingresos y es hasta el año 2020 cuando la curva de la tarifa de agua estara por arriba del 3% recomendado por Derechos Humanos de la ONU. El índice entre tarifa de agua y el 3% recomendado por la ONU al final del período es de 130.14%

Gráfica 13. Curva de Ingreso decil X y tarifa de agua por estrato 6

A partir de estos gráficos se extrae la relación “tarifa-ingreso” por decil para los años 2017 y 2030 (ver Tabla 6) y se percibe que el decil I que corresponde a la población más pobre con ingresos promedio reportados por CONEVAL en 2014 de 2,572 pesos por “hogar-mes” paga 4.49% de su ingreso mensual y que al año 2030 destinará 5.85% de su ingreso para satisfacer sus necesidades de agua. El decil V en el año 2017 esta 50% por debajo del valor recomendado y al 2030 estará también por debajo del límite recomendado, en cambio el decil VIII paga 4.05% en 2017 y al 2030 pagará 8.52%, es decir quesiempre pagará por arriba del límite recomendado, y es el que tiene una relación tarifa/ingreso más alta (8.52%) de todos los deciles.

Tabla 6. Comparación por decil de la Relación tarifa/ ingreso 2017 y 2030, con la tasa recomendada por la ONU.

Decil	Relación tarifa/ ingreso 2017 (%)	ONU 3%	Relación tarifa / ingreso 2030 (%)
I	4.49	3	5.85
II	2.64	3	4.10
III	2.22	3	3.68
IV	1,79	3	3.14
V	1.50	3	2.76
VI	3.82	3	7.38
VII	3.16	3	6.38
VIII	4.05	3	8.52
IX	2.95	3	5.95
X	2.63	3	3.90



El decil X, que es el decil de mayores ingresos, y en 2017 tiene una relación tarifa/ingreso de 2.63% valor por debajo del recomendado y para 2017 pagara 0.9% por arriba del 3%.

Otra fuente de información para saber cuánto gasta mensualmente un hogar en agua es la Tabla 7 “Contenido y valor de las líneas de bienestar 1992-2017 (de abril)” de CONEVAL, que indica que en el rubro “Vivienda y servicios de conservación”

donde se incluye el agua potable, se tiene un gasto mensual por persona de 205.99 pesos, y de 17.82 pesos al mes de agua embotellada, (Tabla 8. Canasta Alimentaria Urbana a precios de abril 2017. CONEVAL). Pensando en 4 personas por hogar se tiene un costo mensual de 895.24 \$-agua/mes-hogar, que comparado contra el ingreso mensual del decil I del año 2016 (2678 \$/mes) significa que la población del decil I gasta el 33.34% de su ingreso en agua, valor 10 veces más del recomendado por la ONU.

Tabla 7. Contenido y valor de las líneas de bienestar 1992-2017 (abril). Fuente: CONEVAL 2017

	Canasta Urbana	Canasta Rural
<b>Canastas alimentaria más no alimentaria (Línea de Bienestar)</b>	<b>\$ 2,822.69</b>	<b>\$ 1,821.07</b>
<b>Grupo</b>		
<b>Canasta alimentaria (Línea de Bienestar Mínimo)</b>	<b>\$ 1,400.27</b>	<b>\$ 994.85</b>
<b>Canasta no alimentaria</b>	<b>\$ 1,422.42</b>	<b>\$ 826.22</b>
14 Transporte público	\$ 231.12	\$ 141.76
15 Limpieza y cuidados de la casa	\$ 75.73	\$ 69.05
16 Cuidados personales	\$ 136.44	\$ 86.83
17 Educación, cultura y recreación	\$ 278.32	\$ 106.19
18 Comunicaciones y servicios para vehículos	\$ 55.12	\$ 14.70
19 <b>Vivienda y servicios de conservación</b>	<b>\$ 205.99</b>	<b>\$ 117.10</b>
20 Prendas de vestir, calzado y accesorios	\$ 178.07	\$ 116.12
21 Cristalería, blancos y utensilios domésticos	\$ 20.56	\$ 15.89
22 Cuidados de la salud	\$ 186.11	\$ 127.69
23 Enseres domésticos y mantenimiento de la vivienda	\$ 24.17	\$ 14.34
24 Artículos de esparcimiento	\$ 5.53	\$ 1.93
25 Otros gastos	\$ 25.26	\$ 14.63

Tabla 8. Canasta Alimentaria Urbana a precios de abril 2017. Fuente: CONEVAL 2017

Grupo	Nombre	Consumo (grx/da)	Precio x kg/L	Costo diario	Costo mensual
		<b>1,592.5</b>		<b>\$46.68</b>	<b>\$1,400.27</b>
33 Verduras y legumbres frescas	Cebolla	42.3	15.7	\$ 0.67	\$ 19.97
	Chila*	10.2	36.7	\$ 0.37	\$ 11.20
	Jitomate	63.0	17.5	\$ 1.10	\$ 33.13
35 Leguminosas	Frijol	50.6	28.0	\$ 1.42	\$ 42.52
	Limón	26.0	35.7	\$ 0.93	\$ 27.84
38 Frutas frescas	Manzana y perón	29.9	29.2	\$ 0.78	\$ 23.45
	Naranja	28.6	7.5	\$ 0.22	\$ 6.48
	Plátano tabasco	34.7	12.3	\$ 0.43	\$ 12.81
41 Azúcar y mieles	Apúcar	15.1	22.1	\$ 0.33	\$ 10.00
42 Alimentos preparados para consumir en casa	Pollo rostizado	8.7	82.4	\$ 0.71	\$ 21.40
	Agua embotellada	411.5	1.4	\$ 0.58	\$ 17.82
44 Bebidas no alcohólicas	Jugos y néctares envasados	66.1	17.5	\$ 0.96	\$ 29.47
	Refrescos de cola y de sabores	169.0	12.4	\$ 2.10	\$ 63.12
46 Otros	Alimentos y bebidas consumidas fuera del hogar	1.7	13.17	\$ 0.22	\$ 6.63
	Otros alimentos preparados	1.7	2.52	\$ 0.04	\$ 1.17

Como se mencionó en párrafos anteriores el acceso al agua potable no sólo depende de la condición geográfica del sitio o del desarrollo económico del lugar donde se habite, sino que también depende del nivel de ingresos de los hogares, así la pobreza afecta negativamente el acceso al agua potable, se habite en una ciudad o en una zona rural, al respecto Julio Boltvinik habla sobre la pobreza como: "...para la mayor parte de los estudiosos, la pobreza es la

insuficiencia de recursos, lo que causa un nivel de vida inadecuado, que significa carencias, privación. Otra postura posible es la definir la pobreza como privación, como la presencia misma de las carencias. Quienes definen pobreza como insuficiencia de recursos, operan el corte en esta dimensión. Quienes tienen menos de un cierto nivel de recursos son pobres. Quienes adoptan la otra postura y definen la pobreza como privación buscan indicadores directos

de privación; la falta de agua potable o de drenaje, el bajo nivel educativo, la desnutrición, el hacinamiento y la baja calidad de los materiales de la vivienda, la no participación en actividades acostumbradas en la sociedad, etc...” “Concibo la pobreza como las carencias humanas derivadas de las limitaciones de recursos económicos (fuentes de bienestar de los hogares) e incluyo como señale, como fuentes de bienestar a los activos; el tiempo y el acceso a

los servicios gubernamentales...”, “El concepto operacional de pobreza es que es pobre aquel hogar que dada sus fuentes de bienestar, no puede satisfacer sus necesidades, por más eficientemente que las use”. (Boltvinik, 2003). Bajo la mirada agua-pobreza, hay que plantearse cuantos pobres habrá en el municipio de Puebla al 2030 que puedan satisfacer sus necesidades básicas entre ellas el agua.

**Tabla 9.** Medición Municipal de la pobreza 2010. Fuente: CONEVAL

MEDICIÓN MUNICIPAL DE LA POBREZA 2010			
Porcentaje de la población, número de personas, número promedio de carencias sociales en los indicadores de pobreza, México, 2010			
21114 Puebla, 21 Puebla			
Indicadores	Porcentaje	Número de personas	Número promedio de carencias
<b>Pobreza</b>			
Población en situación de pobreza	39.9	732,154	2.7
Población en situación de pobreza moderada	33.9	622,143	2.5
Población en situación de pobreza extrema	6.0	110,012	3.9
Población vulnerable por carencias sociales	27.6	506,708	2.1
Población vulnerable por ingresos	9.2	168,620	--
Población no pobre y no vulnerable	23.3	427,448	--
<b>Privación social</b>			
Población con al menos una carencia social	67.5	1,238,862	2.4
Población con al menos tres carencias sociales	26.8	491,610	3.7
<b>Indicadores de carencia social</b>			
Rezago educativo	16.3	299,621	3.2
Acceso a los servicios de salud	38.8	711,224	3.0
Acceso a la seguridad social	53.7	984,512	2.7
Calidad y espacios de la vivienda	11.1	202,960	3.8
Acceso a los servicios básicos en la vivienda	16.5	303,395	3.5
Acceso a la alimentación	28.2	517,593	3.3
<b>Bienestar económico</b>			
Población con ingreso inferior a la línea de bienestar mínimo	11.1	202,792	2.7
Población con ingreso inferior a la línea de bienestar	49.1	900,774	2.2

Para tal fin se utilizó la información del “Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018”, fundamentado en INEGI, “Estadísticas de Natalidad y Mortalidad” con Base en los Censos de Población y Vivienda 2000 y 2010, y señala un crecimiento anual en el municipio de Puebla de 1.6%, así al 2030 la población en situación de pobreza será: (ver Tabla 10).

**Tabla 10.** Medición municipal de la pobreza 2010 y su tendencia al 2030.

Pobreza	2010	2030
Población en situación de pobreza moderada	622.143	854.603
Población en situación de pobreza extrema	110.012	151.117
Población vulnerable por carencias sociales	506.708	696.036
Población vulnerable por ingresos	168.620	231.624
Población no pobre y no vulnerable	427.448	587.161

Fuente: Elaboración propia en base al Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018

Para el año 2030, en el municipio de Puebla habrá 1’005,720 habitantes en pobreza moderada y pobreza

extrema, en búsqueda de satisfacer sus necesidades más básicas. Por lo precario de sus ingresos, de no adoptarse las políticas públicas indispensables, no estarán en la posibilidad de satisfacer sus necesidades y pagar el servicio de agua potable.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se aprecia en los gráficos de la “Curva de Ingreso por decil y tarifa de agua por estrato” (Gráficos del 4 al 13), el cobro del agua no es homogéneo en todos los deciles, así en los deciles I, VI, VII, VIII y IX la tarifa del agua está siempre por encima del límite recomendado por la ONU, situación agravante para el decil I, que es el decil de menores ingresos (2,572.00 \$/mes-hogar). En cambio, en el decil V la tarifa de agua está siempre por debajo del límite recomendado. El decil IX, es el segundo decil en tener mayores ingresos y gasta 5.95% en agua, el decil X que es el de mayores ingresos gasta 3.9% de sus ingresos en agua, situación que no se compara con los deciles I y II.

Para alcanzar el criterio de asequibilidad del derecho humano al agua, así como por justicia social<sup>10</sup>, es necesario hacer subsidios cruzados, aumentar el costo de los servicios de agua a los deciles IX y X que son los de mayores ingresos para subsidiar a los

10 La Justicia Social persigue el reparto equitativo de los bienes sociales. En una sociedad con Justicia Social, los derechos humanos son respetados, y las clases sociales más desfavorecidas cuentan con igualdad de oportunidades de desarrollo.

deciles I, II, III, y IV, además de replantear la tarifa del servicio de agua a los deciles V y VII. Una tarifa de agua justa, permite discriminar por niveles de ingresos, por zonas dentro de la ciudad, por giro o actividad económica, y en casos especiales permite apoyar a las personas de la tercera edad o a los discapacitados, convirtiéndose en una herramienta fundamental de la justicia social.

El servicio de agua no puede ser gratuito, entre otras razones es necesario cobrar el servicio de agua con la finalidad de forzar a que se haga un uso racional del agua. No obstante, esta medida tiene también su contraparte, porque al pagar por el agua, la población se siente con derecho de gastarla, situación que se puede dar con mayor énfasis en los deciles de mayores ingresos, lo que puede ser una razón más para establecer una estrategia de costos mayores en estos deciles. El inconveniente será para la población en situación de pobreza, porque un agua costosa no es una medida de eficiencia, sino que significa comprometer el acceso a alimento, vestido, casa, educación, transporte, etc., o no pagar el agua. Hay que reflexionar que para el año 2030, en el municipio de Puebla habrá 1'005,720 habitantes en pobreza moderada y pobreza extrema, en búsqueda de satisfacer sus necesidades más básicas, y que por lo precario de sus ingresos no estarán en la posibilidad de pagar el servicio de agua potable. Dado que el servicio de agua no puede ser cortado, una estrategia que ya se observa es simplemente dejar de pagar el agua, lo que generará problemas financieros al organismo operador, actualmente concesionado a la iniciativa privada, y dificultará aún más la solución de esta problemática.

En la construcción de políticas públicas y en la toma de decisiones se debe siempre tomar en cuenta que el agua es un bien que no tiene sustituto, por lo que su demanda es inelástica, además, el agua es un bien común, un derecho humano y no una mercancía.

La situación aquí descrita para el caso del agua, es un llamado a reflexionar sobre la urgencia de cambiar la política económica del país, para incrementar los ingresos y disminuir la desigualdad económica de la sociedad, lo que haría que la población tenga mayores ingresos para pagar los bienes y servicios que consume, entre ellos el agua, alternativa que no debemos de dejar de ver, antes de suscitar conflictos y la lucha por el agua.

#### 4. REFERENCIAS

Asian Development Bank. 2004. *Poverty and Water Security: Understanding How Water affects the Poor*. Part of the "Water for All" series, Asian Development Bank, 34.

Baker, R., Koppen, B. & Shah, T. 2000. *A global perspective on water security and poverty: achievements and challenges for water management*. Colombo: International Water Management Institute.

Banco de Desarrollo de América Latina. *Agua y saneamiento en la nueva ruralidad de América Latina*. 2017. <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2017/02/agua-y-saneamiento-en-la-nueva-ruralidad-de-america-latina/> (accessed Mayo 29, 2017).

Boltvinik, Julio. "Conceptos y medición de la pobreza. La necesidad de ampliar la mirada." *Papales de población*. Vol. 9 num.38, Oct-Dic 2003, 2003: 19,20.

CONAGUA. *Atlas del Agua en México 2016*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua, 2016.

—. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2015*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua, 2015.

Guevara Sanginés, A., and J.A. Lara Pulido. "Agua, pobreza y uso del tiempo en México: Análisis cuantitativo como sustento del diseño de una política pública de doble dividendo." *Nova Scientia* (Universidad de la Salle Bajío) 7, no. 15, 2015: 462-481.

Heller, Léo. "Declaración final de misión del Relator Especial sobre derechos humanos al agua y saneamiento, Sr. Léo Heller". *Naciones Unidas. Derechos Humanos. Oficina del Alto Comisionado*. 2017. <http://www.ohchr.org/SP/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=21608&LangID=S> (accessed Mayo 30, 2017).

Hernández Licona, Gonzalo CONEVAL. *Informe de pobreza en México 2014*. Resultados de pobreza, México, D. F.: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2016.

Mínimos, Comisión Nacional de Salarios. [www.canasami.gob.mx/bol\\_salario\\_minimo\\_2016\\_11122015.html](http://www.canasami.gob.mx/bol_salario_minimo_2016_11122015.html). diciembre 11, 2015. (accessed Diciembre 7, 2016).

Municipal, Comisión de Hacienda y Patrimonio. *Decreto por el que se aprueba la estructura tarifaria para el cobro de los derechos de agua potable*. Dictamen 142, Puebla: H. Congreso del Estado de Puebla, 2014.

Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos, ONU. 2011. *El derecho al agua*. Folleto informativo N0. 35, Ginebra: Naciones Unidas-Derechos Humanos- ONU-HABITAT, Organización Mundial de la Salud.

ONU. 2015. *Objetivos de desarrollo del milenio. Informe de 2015*. Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.

Poverty-Environment Partnership. 2006. *Linking Poverty Reduction and Water Management*. Mexico City: Poverty-Environment Partnership.

Programa ONU-Agua. 2014 "The human right to water." *Facts and figures human right to water*. Edited by ONU. Decenio Internacional para la Acción "El agua Fuente de Vida" 2005-2015.



Soulier Faure, Martin, Jorge Ducci, Mariano Altamira, & Alejandra Perroni. 2013. *Agua Potable, Saneamiento y los Objetivos de Desarrollo del Milenio en América Latina y el Caribe*. Nota Técnica BID; IDB-TN-522, Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.

UNICEF and World Health Organization. *Progress on sanitation and drinking water -2015 update and MDG assessment*. Geneva: WHO Press.

UN-WATER. *UN WATER*. 2017. <http://www.unwater.org/water-facts/water-sanitation-and-hygiene/> (accessed may 29, 2017).

## EL AGUA SE ABRE PASO CON LA CÁTEDRA FRANCISCO DE ALBEAR

### WATER GAINS ACCESS WITH THE FRANCISCO DE ALBEAR CHAIR

Torres Hugues, Ronnie<sup>1</sup>; Martínez Valdés, Yaset<sup>1</sup>

#### Resumen

En este trabajo se muestra la labor realizada en los últimos cinco años por la Cátedra Honorífica Francisco de Albear y Fernández de Lara, perteneciente al Departamento de Ingeniería Hidráulica del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae, de Cuba. Se aprecia cómo se han concentrado los esfuerzos para desarrollar una cultura y educación sobre el cuidado y estudio del agua, así como del paradigma que representa para Cuba la figura del ilustre ingeniero militar del siglo XIX, cuyo nombre lleva la Cátedra. Partiendo de los preceptos de la extensión universitaria en nuestro país, se establece un proyecto sociocultural que involucra varios niveles de enseñanza. Sus principales ideas y logros, se explican apreciando cómo se han beneficiado distintos sectores de la comunidad. Se destaca también la promoción de la ciencia realizada por el CIH, a través de la inserción de varios artículos científicos en la revista Mar y Pesca, de gran interés popular desde hace décadas. Otro factor importante que se explica es la relación con otras instituciones y universidades del país, buscando un efecto multiplicador de la labor de la Cátedra con un alcance nacional. También se exponen las vicisitudes que se han tenido que sortear en el trabajo cotidiano de la Cátedra y las alternativas de solución encontradas en cada caso.

**Palabras claves:** Francisco de Albear, Cátedra honorífica, agua

#### Abstract

This article shows the work done in the last five years by the Francisco de Albear and Fernández de Lara Honorary Chair, belonging to the Department of Hydraulic Engineering of the Center for Hydraulic Research (CIH) of the Faculty of Civil Engineering of the Technological University of La Habana, Cujae. A description is given of how efforts have been concentrated to develop a culture and education on the care and study of water, as well as on the paradigm that for Cuba represents the figure of the illustrious military engineer of the 19th century, of whom the Chair bears his name. Starting from the precepts of the university extension in our country, a socio-cultural project is established that involves several levels of education. Its main ideas and achievements are explained by appreciating how different sectors of the community have benefited. Also worthy of mention is the promotion of science carried out by the CIH, through the insertion of several scientific articles in the Journal Sea and Fishing, which has enjoyed great popular interest for decades. Another important factor that is explained is the relationship with other institutions and universities in the country, seeking a multiplier effect of the work of the Chair with a national scope. Also exposed are the vicissitudes that have had to be overcome in the daily work of the Chair and the solution alternatives found in each case.

**Keywords:** Francisco de Albear, honorary chair, water

#### 1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Educación cubano asume la alta responsabilidad de la formación de una cultura general integral de los estudiantes, ocupando un lugar primordial entre los componentes fundamentales e imprescindibles en la formación de las nuevas generaciones, para garantizar la continuidad histórica de la Revolución.

La universidad debe consolidar y continuar la formación de los valores adquiridos en los niveles educativos precedentes, así como formar y

desarrollar los valores de la profesión. En este sentido para la carrera de Ingeniería Hidráulica se ha desarrollado una concepción sistémica de la educación sustentada en valores. Esta tiene como base la definición para el modelo del profesional de los valores políticos, éticos, morales y de la profesión que deben caracterizar las actitudes de un ingeniero hidráulico y de las acciones educativas de carácter curricular, socio-político y de extensión universitaria a desarrollar para la formación integral de este profesional. El sistema de valores para este profesional incluye los siguientes Audacia creativa,

1 Universidad Tecnológica de La Habana. Cuba. ronnie@cih.cujae.edu.cu.

Compromiso, Calidad y Belleza, Profesionalidad, Dignidad, Solidaridad, Laboriosidad, Patriotismo, Responsabilidad, Honradez, Honestidad, Humanismo y Justicia.

La función de este especialista en la sociedad es vital, los inicios de la humanidad se establecieron en antiguas civilizaciones, que fueron denominadas Hidráulicas o Fluviales, por asentarse en las márgenes de importantes ríos. El historiador Donald Worster define estos términos como "orden social basado en la manipulación intensiva del agua y sus derivados en todo entorno árido" (Bravo, 1994). En la actualidad las principales ciudades están asociadas también a las costas. De más está citar los múltiples usos que el ser humano ha logrado darle al agua, y que mediante esta ha conseguido los estándares actuales de desarrollo, implementando asombrosas soluciones para la obtención, conducción y manejo de este recurso. Sin embargo, en el otro lado de la balanza se encuentran aquellas personas que viven en un estado alto de insalubridad teniendo grandes problemas para el acceso al agua, así como al tratamiento adecuado de las aguas residuales. También, desde el punto de vista ambiental, se agudizan las situaciones de sequías e inundaciones, y hacen su aporte a las dificultades las acciones que generan contaminación de las aguas. Dado los grandes retos a enfrentar entiéndase, entonces, lo vital de esta profesión.

Lo imprescindible del agua para el bienestar de la humanidad no solo se encuentra en la satisfacción de las necesidades fisiológicas y tecnológicas, sino también en las espirituales. Múltiples son los ejemplos en los que se aprecia este elemento como componente fundamental en todas las manifestaciones del arte, letras que la simbolizan, signos zodiacales y hasta nombres. Por tanto, este elemento de la naturaleza aborda todos los planos de nuestra existencia. En una ocasión, el apóstol nacional de Cuba, José Martí, estableció a partir de lo más sublime la relación entre la especie y el agua cuando dijo: "...Después del mar, lo más admirable de la creación es el hombre..." (Rodríguez, 1975). Un análisis interesante sobre la relación entre el mar y el hombre es el realizado también por Juan Pando (Pando, 1993), crítico de arte, exponiendo que "El mar, la mar, son definiciones humanizadas: sin nuestra emoción carecerían de sentido artístico o estratégico, y se convertirían en inmensos depósitos de la vida meramente biológica."

Basado en estos principios, se crea hacia el año 2004 la Cátedra Honorífica Francisco de Albear y Fernández de Lara, perteneciente al Departamento de Ingeniería Hidráulica del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae. Los objetivos de la misma son: la promoción del conocimiento de la historia de la Ingeniería Hidráulica en Cuba y el mundo; fomentar la cultura, el conocimiento y el cuidado del agua y la formación

general integral de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica, mediante el establecimiento de nexos con instituciones docentes y de la producción, con el fin de intercambiar experiencias y divulgar los resultados del trabajo del CIH y la carrera de Ingeniería Hidráulica en el orden científico-técnico y cultural. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo exponer la labor realizada por esta cátedra a lo largo de los últimos cinco años a través del proyecto "El Agua se abre paso". Es de destacar que la labor de ésta en ese periodo fue estrictamente lo ejecutado en el proyecto.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. La Extensión Universitaria en Cuba

La extensión universitaria se entiende como la manifestación dialéctica que se establece entre la universidad y la sociedad, con el objetivo de promover la cultura general integral como expresión de crecimiento personal, mediante un proceso esencialmente dirigido a la educación profesional de los estudiantes. Se basa en un conjunto de acciones que realiza la universidad dentro y fuera de sus instalaciones, dirigidas a los estudiantes y trabajadores, y a la población en general, con el propósito de promover y difundir la cultura en su más amplia acepción, es decir, la cultura científica, la técnica, la política, social, la artística y literaria, etc.

La extensión universitaria en Cuba tiene los siguientes objetivos:

1. Contribuir a la ampliación de los intereses y aficiones culturales de los estudiantes de los centros de educación superior, a través de la oferta de amplias y variadas opciones que coadyuven al logro de su formación cultural integral
2. Propiciar el trabajo creador de los estudiantes y coadyuvar a la promoción de obras que resulten de éste a través del Movimiento de artistas aficionados.
3. Contribuir al desarrollo cultural de nuestro pueblo y en particular de la comunidad donde se ubica el centro de educación superior, convirtiendo las instituciones docentes en centros de aficiones culturales diversas, desde los últimos logros de la ciencia y la técnica, hasta las expresiones más genuinas de la cultura nacional.

### 2.2. Creación de cátedras honoríficas

El Ministerio de Educación Superior en Cuba tiene establecido, como parte de su labor, la creación de cátedras honoríficas en los centros universitarios. Estas son instituciones culturales e instrumentos de investigación, estudio, divulgación, promoción y conservación del Patrimonio Cultural y disfrute del legado de relevantes personalidades y ramas del



conocimiento, que desarrollan su actividad a través de la extensión universitaria en todos los procesos sustantivos de la Universidad (MES, 2012).

Como objetivos de trabajo se traza profundizar en la vida y obra de personalidades científicas e intelectuales destacadas; investigar en esferas del conocimiento que no son objeto de profundización en otros marcos académicos; aglutinar un potencial científico y académico que comparta su interés por el tema de la Cátedra y por tanto, puede potenciar su desarrollo; convocar a estudiantes, con el fin de que puedan emplear parte de su tiempo en una superación académica, cultural y política, de alto valor para su formación integral; promover y realizar actividades de extensión universitaria; y establecer relaciones, tanto con instituciones científicas y académicas, como con organismos internacionales, que sean del interés de la educación superior cubana y redunden en ventajas para la labor de investigación y promoción de la Cátedra.

Por su parte, los requisitos principales para la constitución de las mismas son contar con un aval de trabajo pretérito sobre la obra o línea temática fundamental de la misma; tener capacidad real de aglutinar personal altamente calificado para promover y desarrollar una temática de interés nacional o internacional, no trabajada con anterioridad en el Centro de Educación Superior; estar la temática de la Cátedra incluidas en las líneas de investigación aprobadas el Centro de Educación Superior.

Como principales tipologías de actividades a desarrollar por las cátedras se encuentran: conferencias, talleres, actos conmemorativos, publicación de artículos, trabajo comunitario, concursos, visitas dirigidas, conciertos, entre otros.

A partir de lo expresado anteriormente, y teniendo presente el papel que juegan las carreras técnicas en la sociedad, en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, principal centro de educación superior en la formación de ingenieros y arquitectos en Cuba, se han creado 10 cátedras honoríficas, con una amplia labor extensionista (DEU, 2017). Una de ellas es la "Francisco de Albear", dirigida por el Departamento de Ingeniería Hidráulica desde el año 2004.

### **2.3. La Cátedra Honorífica Francisco de Albear**

Desde 2004, en el seno del CIH del citado centro universitario, se constituyó la cátedra honorífica Francisco de Albear y Fernández de Lara. Fue un momento en el que cátedras ya constituidas se volcaron a profundizar y enriquecer los conocimientos sobre la Historia de Cuba. Por su parte, la Federación Estudiantil Universitaria (FEU) y la Unión de Jóvenes Comunistas (UJC) también encaminaron varios esfuerzos en este sentido. Por tanto, aprovechando este marco, profesores e investigadores de este centro decidieron llevar a

cabo esta acción, considerando como un gran aporte todo aquel homenaje que se haga al desarrollo de la ingeniería hidráulica en Cuba así como a este ilustre ingeniero cubano, considerado como el más relevante del siglo XIX (Pérez, 2004).

Como presidente honorífico fue nombrado el Dr. Diosdado Pérez Franco, de marcada trayectoria en esta materia, que lo llevó a alcanzar los más altos honores en la arena internacional y muy estimado y reconocido en su propia tierra. Otros destacados profesionales formaron parte de esta. Como objetivos de trabajo fueron planteados:

- Fomentar el conocimiento de la historia de la Ingeniería Hidráulica en Cuba, dirigida a establecer una sólida formación profesional de nuestros estudiantes.
- Actualizar a los profesores y personal vinculado de una forma u otra al quehacer de la profesión.
- Organizar y realizar eventos, de carácter nacional o internacional, sobre la vida y obra de Albear, así como de otras personalidades relacionadas con la ingeniería.
- Establecer nexos con otras instituciones, radicadas en Cuba o en el extranjero con el fin de intercambiar experiencias, en el orden científico técnico y cultural.
- Vincular a profesionales y estudiantes con las actividades de investigación, desarrollo y divulgación que se planteen en la cátedra.

A lo largo de estos años varios profesores, de gran prestigio científico y académico la han presidido dando continuidad a la divulgación de la labor de este y otros grandes especialistas, así como la conmemoración de fechas históricas, entre otras actividades.

La composición actual de la misma se distribuye de la siguiente manera: 26 doctores en ciencias técnicas y cinco másteres en distintas ciencias, contando la mayoría de ellos, con más de 30 años de experiencia profesional. De estos, 27 son profesores con categorías docentes principales (Titulares y Auxiliares), de los cuales, nueve ostentan la categoría docente especial de profesores Consultantes, cuatro son Profesores de Mérito y dos ostentan la máxima distinción docente que otorga la universidad, el Doctorado Honoris Causa.

#### *2.3.1. ¿Por qué Francisco de Albear?*

Francisco de Albear (figura 1) fue un cubano que nació en el año 1816, en el seno de una familia cubana de alta posición social ya que el padre era un oficial del Ejército Español. Siguió el ejemplo de sus antecesores, formándose en la Academia del Real Cuerpo de Ingenieros, en España a partir de 1836. Hasta 1845 obtuvo múltiples logros militares dado su inteligencia, disciplina y profesionalidad, para luego

regresar a la Isla. Tres años después de su regreso a la isla de Cuba, en 1848, le fue asignado el cargo de Ingeniero-Director de Obras de la Real Junta de Fomento, Agricultura y Comercio, responsabilidad que desempeñó por siete años (García, 2007).



**Figura 1.** Retrato de Francisco de Albear y Fernández de Lara

En este periodo participó en 55 proyectos sobre puentes, muelles, carreteras y otros; en 71 trabajos parciales de reparación o composición de puentes, muelles, carreteras, calzadas, ferrocarriles, alcantarillas, terraplenes, enrejados, cimientos y tinglados; en 56 construcciones nuevas y completas, tales como puentes, muelles, tinglados, carreteras y otros. Esto contabiliza un total de 182 trabajos de ingeniería en siete años a mediados del siglo XIX.

Es de destacar también el plano de La Habana en escala 1:5000 que elaboró y publicó en 1874, así como el primer proyecto del malecón de La Habana en 1861, con ideas innovadoras y el estudio geotopográfico para la construcción del cementerio Cristóbal Colón y de sus principales obras. Sin embargo, su mayor distinción se asocia al acueducto que serviría para, definitivamente, abastecer de agua a la capital, iniciado en 1858 e inaugurado en 1893. Las obras anteriores presentaron serios problemas y salieron de circulación. La solución aportada por él, también es un digno ejemplo de investigador, ecólogo y visionario. Actualmente, sirve para abastecer a 1/5 de la población.

Para arribar a su solución final estudió varias fuentes de abasto, teniendo en cuenta disponibilidad, calidad, distancia y facilidades constructivas. Con el objetivo de ejemplificar las ventajas del nuevo acueducto propuesto, lo comparó con la cantidad de agua abastecida de otras 17 ciudades del mundo como París, Madrid, Nueva York y Marsella, entre

otras. Lo magistral de su solución, incluso desde el punto de vista ambiental, su proyecto "Conducción a La Habana de las aguas de los manantiales de Vento" lo hizo merecedor de la medalla de oro en la Exposición Universal de París en 1878.

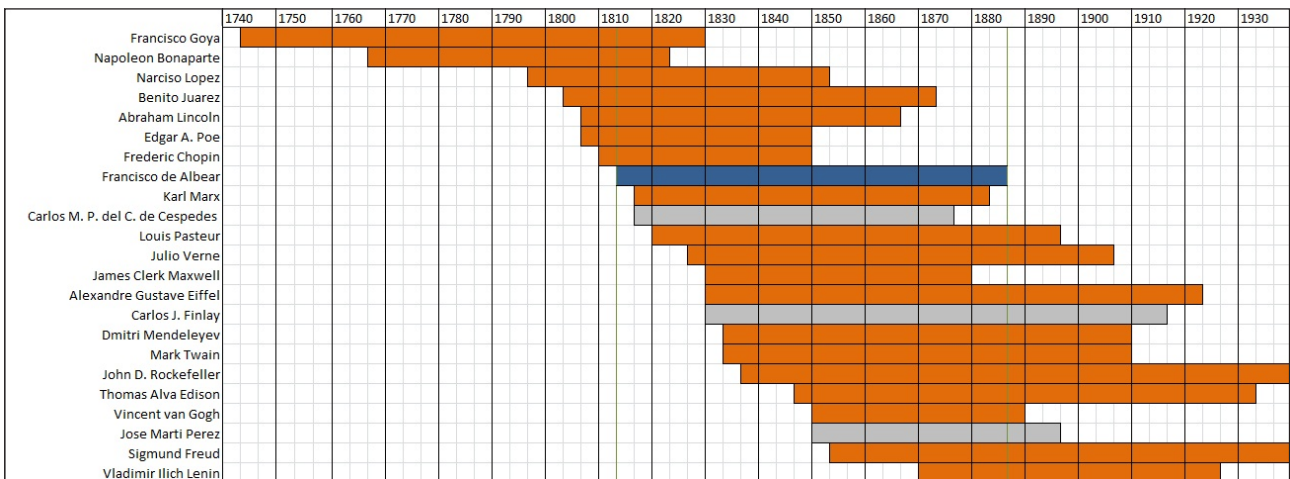
Su habilidad profesional, no pasó por alto entre la intelectualidad de la Isla llegando a ser Vicepresidente de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana. También fue miembro corresponsal de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid; miembro ordinario de la Sociedad Científica de Bruselas; honorario y corresponsal de la Sociedad Británica de Fomento de Artes e Industrias y socio de mérito de la Sociedad Económica de Amigos del País de La Habana (García, 2011).

Como militar obtuvo siete condecoraciones y en sus incursiones bélicas nunca se enfrentó al Ejército Libertador de Cuba. En una de estas contiendas apresó a un connotado luchador venezolano y defensor de la independencia de Cuba, y a pesar de estar en bandos contrarios al ver las condiciones inhumanas en las que se encontraba el prisionero, intercedió ante las autoridades para proporcionarle una mejor estancia. Gracias a su autoridad, y al respeto que le tenían, sus peticiones fueron atendidas (García, 2007).

Dentro de otras facetas de su vida se destacan la de profesor de matemáticas en la academia donde se formó; tradujo al castellano la composición en versos titulada Canto Griego, escribió versos describiendo el proceso político que se vivía en España en 1831 y otras obras poéticas dirigidas a familiares, la naturaleza y personalidades de la realeza española y presentó varios ensayos sobre importantes aspectos técnicos en el seno de la ciencia cubana. Además, tuvo una prole de siete descendientes.

Hombre íntegro, con alto valor de la familia, rigurosidad profesional, de carácter natural y de gran actividad, solidario, cordial, osado, desinteresado, estudioso, laborioso, bondadoso y enérgico, constituye más que un ejemplo o paradigma a las nuevas generaciones de ingenieros, un gran reto. Se debe, desde el punto de vista técnico, poner en práctica, hoy más que nunca, los principios de estudio de las condiciones naturales, racionalidad y ahorro en la economía, exigencia, control, profesionalidad y disciplina que el practicó; y desde lo moral, practicar en el quehacer cotidiano las virtudes que lo definieron. En Cuba, valorando todas estas características, se ha establecido el 11 de enero como el Día del Ingeniero, en honor a su nacimiento (Torres, 2016).

Como dato curioso, se expone en la siguiente figura otras personalidades que compartieron su estancia en la Tierra junto con Albear.



**Figura 2.** Personalidades a nivel mundial que vivieron en la época de Albear. En azul: Albear, en gris: personalidades cubanas, en naranja: personalidades extranjeras

### 3. LA CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA EN CUBA (CNCIH, 2008)

El desarrollo socio económico y sostenido del país requiere de la participación activa y comprometida, entre otros, de los profesionales encargados de la planificación, diseño, construcción y operación de la infraestructura hidráulica; dentro de este sector multidisciplinario los ingenieros hidráulicos desempeñan un decisivo rol cuya formación específica en Cuba, supera ya los 35 años y cuyas raíces se remontan al año 1900.

La carrera de Ingeniería Hidráulica en Cuba se propone formar un profesional con un amplio conocimiento y posibilidades de aplicación de las ciencias básicas y de las ciencias de la ingeniería, aptos para proponer soluciones racionales y creativas de ingeniería enfocados al campo de las obras hidráulicas para la captación, almacenamiento, conducción, potabilización, distribución, uso, recolección, evacuación y tratamiento de aguas residuales antes de su vertimiento. En consecuencia, la Carrera asume el encargo social de preparar a un técnico con capacidad de diseñar, proyectar, planificar, gestionar y administrar los proyectos de implementación de dichas soluciones, y desarrollar además, en el campo de la hidráulica, actividades como conservador de estructuras construidas o de productor de construcciones a pie de obra.

Con estas premisas, y a solicitud del Ministerio de Educación Superior (MES) de la República de Cuba, la Comisión Nacional de Carrera de Ingeniería Hidráulica (CNCIH) ha elaborado cinco planes de estudio en casi 50 años de impartición de la carrera en el país, en correspondencia con los documentos bases para la elaboración de los planes de estudio emitido por dicho Ministerio, que reconoce además los cambios y el desarrollo experimentado por la Educación Superior contemporánea en el mundo y en Cuba y los cambios cualitativos que experimenta

la gestión integral de los recursos hidráulicos a lo largo y ancho de la nación, como importante rama productiva de la economía nacional; prestando especial atención a las opiniones de las entidades o instituciones receptoras de los nuevos graduados vinculadas con la constante elevación de la calidad de formación de estos profesionales.

La CNCIH, máximo órgano encargado de diseñar y perfeccionar los planes de estudio para esta carrera dentro del área de las Ciencias Técnicas en el país, observa que sus egresados han venido cumpliendo satisfactoriamente con su encargo social. Esto es el resultado de una formación basada en lograr un ingeniero hidráulico de perfil amplio con cualidades idóneas avalada por las opiniones de las entidades vinculadas a los recursos hidráulicos que emplean a este profesional, principalmente el INRH y su sistema empresarial, entre otras entidades.

No obstante, los avances tecnológicos experimentados y aplicados en la producción de construcciones hidráulicas y en la importante etapa de la operación o explotación racional de este recurso renovable pero limitado y cada vez con mayor afectación en su calidad, el uso cada vez mayor de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) como parte ya del desarrollo científico técnico alcanzado por la sociedad; la necesidad además de que este profesional posea una mayor formación económico empresarial, así como que los planes de estudio garanticen el desarrollo de conocimientos, habilidades y competencias generales y específicas acordes con las tendencias internacionales, de manera que la carrera alcance los siempre crecientes estándares exigidos en los procesos de acreditación curricular dentro de nuestra área geográfica, son todas razones que justifican los cambios, modificaciones y actualización continua de los planes de estudio de la carrera que es llevada a cabo por la CNCIH.



#### 4. EL PROYECTO SOCIOCULTURAL “EL AGUA SE ABRE PASO”

En el 2012, a partir de un diagnóstico inicial, en donde se determinaron varios espacios descuidados para la orientación y motivación profesional, se decidió confeccionar un proyecto socio cultural, que recibió como título “El agua se abre paso”, del cual se responsabilizó la Cátedra, considerando lo establecido anteriormente para este tipo de instituciones. En el mismo se han venido realizando actividades que abarcan tanto la formación integral de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica, como vías para dar a conocer el quehacer de esta al resto de la población (Torres, 2012).

A partir de la heterogeneidad de los integrantes del proyecto y de la cátedra, se han encaminado esfuerzos en promocionar esta carrera desde diversos frentes, que van desde la universidad hasta las comunidades. Además, promueve la formación integral del profesional según se estipula en el plan de estudio.

Haciendo un análisis sobre la situación cultural de los estudiantes desde 1er año hasta 5to año y de la población en general se aprecian diversos problemas:

- La población cubana, en su mayoría, desconoce el perfil del profesional de esta especialidad.
- Los estudiantes de nuevo ingreso desconocen en buena parte el contenido de la carrera.

Por lo que se establecieron como objetivos:

- Socializar conocimientos científicos de la especialidad a la población mediante la divulgación en revista de alcance popular.
- Complementar los conocimientos impartidos en las actividades docentes de los diferentes años académicos mediante la realización de visitas técnicas a obras hidráulicas.

#### 5. RESULTADOS

Al analizar las revistas de alcance popular que circulan por la nación cubana se destacó, con 50 años, Mar y Pesca. Su salida es trimestral y, en cuanto a la cantidad de ejemplares es de 23 000 en cada tirada; siendo altísima su demanda. Teniendo en cuenta lo cercano de sus temas básicos con las líneas de investigación del CIH se establecieron las relaciones contractuales correspondientes, se escogieron los temas en común y desde el año 2013 comenzaron las publicaciones, ver figura 3.

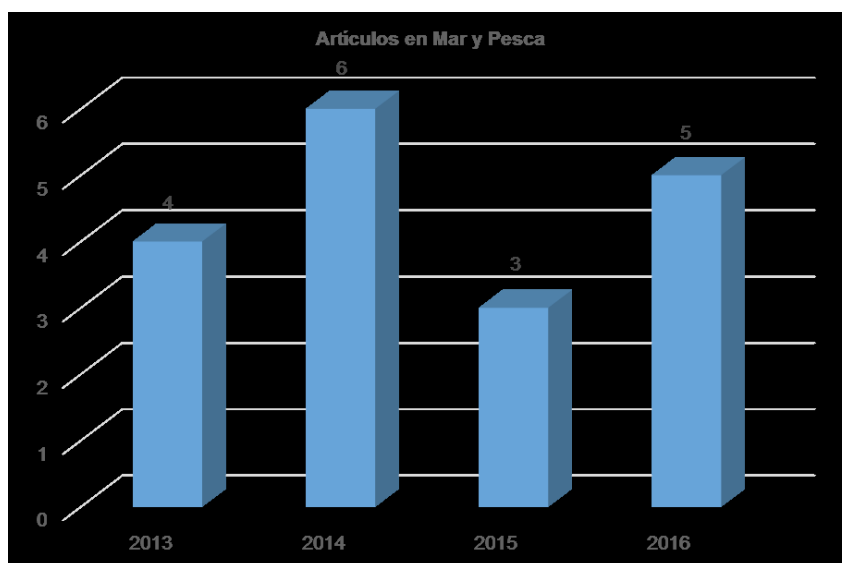


Figura 3. Relación de artículos publicados en la Revista Mar y Pesca en el periodo 2013-2016

De esta manera, en cuatro años se ha logrado incrementar la cultura sobre el agua de forma masiva con cerca de 20 artículos. Por ejemplo: de julio de 2011 hasta junio de 2013 se publicaron 10 artículos sobre el tema. En igual periodo siguiente (julio 2013 a junio 2015) fueron 21 y en el periodo siguiente (julio 2015 a junio 2017) 15. Cabe señalar que el aporte de la Cátedra comenzó precisamente en julio de 2013. Los temas abordados no solo han tenido relación con la especialidad, sino que han abarcado un marco más amplio incorporando otros elementos culturales (INFORME), estos son:

4. Mitología y Agua (4)
5. Personalidades históricas y científicas que han aportado al desarrollo de la Ingeniería Hidráulica (1)
6. Obras costeras e inundaciones (4)
7. Fuentes renovables de energía aplicadas a los recursos hidráulicos (1)
8. Recursos marinos (6)
9. Acciones bélicas y su relación con el recurso agua (2)

En este sentido, se realizó una entrevista a uno de los jóvenes científicos de la cátedra y fue publicada en otra revista con amplia circulación "Juventud Técnica", en su número 379, de julio-agosto de 2014 (<http://www.juventudtecnica.cu/contenido/ruta-del-agua>)

Como acción asociada a la promoción de la cultura del agua, como vía para ganar conciencia sobre el cuidado del agua, se entregó en la editorial cubana "Gente Nueva" el libro "100 preguntas sobre el agua", que se encuentra en proceso de arbitraje. En este se abordan preguntas sobre diversas temáticas asociadas a este líquido como son: las características principales del agua, el comportamiento del agua en la naturaleza, dispositivos hidráulicos, las obras hidráulicas y, cuestiones relacionadas con el agua en Cuba. Las respuestas están elaboradas para que, de forma amena e instructiva, tanto jóvenes como adultos lo entiendan.

En cuanto a la atención a la enseñanza primaria, fue abierto el círculo de interés "Agua Amiga de las niñas y los niños", en coordinación con el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), máxima autoridad del recurso agua en el país, en una escuela primaria en la periferia de la ciudad. En este, los niños participantes (ver figura 4) tuvieron la posibilidad de realizar experimentos caseros, que aunque simples ponen de manifiesto leyes de la naturaleza, que reforzaron los contenidos abordados en la escuela. Además, tuvieron la posibilidad de manifestarse artísticamente mediante dibujos y poemas, que formaron parte del concurso nacional Trazaguas, convocado por el mismo Instituto.



**Figura 4.** Grupo de estudiantes de 4to grado comenzando el Círculo de Interés

Los experimentos caseros que se llevaron a cabo en el círculo de interés fueron:

1. Elevar el agua con fuego.
2. Desviar un chorro de agua con un juguete plástico.
3. Tapar un vaso con agua y voltearlo sin que se derrame el agua.

4. Desaparecer una moneda echando agua en un vaso.
5. Hacer que una aguja flote.
6. Elevar un huevo fresco que se encuentra en el fondo de un recipiente con agua.
7. Tensar la superficie del agua.

Para aquellos estudiantes que se encuentran en el último año de preuniversitario las universidades crean anualmente actividades, llamadas Puertas Abiertas, para que estos se informen sobre las carreras que se estudian. En los últimos tres años se ha estado promoviendo la carrera en cinco eventos, y se ha logrado que alrededor de una veintena de los estudiantes que hoy están en las aulas hayan escogido la carrera a partir de estos. El ingreso por esta causa se ha comportado de la siguiente manera: cero en 2012 y 2013, cuatro en 2014, nueve en 2015 y 10 en 2016. Teniendo en cuenta que esta no se encuentra dentro de las favoritas de los jóvenes, este resultado se considera un gran logro.

La Cátedra, con su proyecto, también ha participado en Ferias de la Ciencia convocadas y organizadas por la Academia de Ciencias de Cuba. En estas han asistido 45 escolares y en parques públicos más de 60 personas, entre niños y familiares que concurrieron a la actividad, se mostraron interesados y motivados con lo expuesto. Es de destacar que los estudiantes de los primeros años también interactuaron con el público.

Por su parte, en la universidad se han encaminado actividades de diversas índoles:

- Se han realizado visitas técnicas a obras y proyectado y discutido videos técnicos en coordinación con otros docentes. Con estas actividades se ha promovido la orientación profesional vocacional. Las visitas son acciones establecidas mediante un acuerdo entre la Universidad y el centro rector del agua en Cuba, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Los tipos de obras hidráulicas son varios y estas están planificadas de forma tal que asisten los estudiantes que están cursando un año académico determinado en el cual están tratando el diseño hidráulico de este tipo de obra. Por tanto, los objetivos de la visita coinciden con los objetivos del año académico. Se ubican en la provincia donde se enclava la Universidad, la capital del país, y las aldeañas (Artemisa y Mayabeque). Para mayor detalle de lo que ha ocurrido en los últimos cinco años (ver Tabla 1).
- Por otro lado, y en coordinación con profesores que imparten Historia de Cuba, en el 1er año de Ingeniería Hidráulica se ha impartido, por dos años consecutivos, una conferencia sobre Don Francisco de Albear, que motiva la historia y la especialidad con título "Albear. Alma y corazón de la ingeniería cubana".

Tipo de obra	Provincia	Cantidad de estudiantes	Año académico
Presas	La Habana, Artemisa y Mayabeque	250	5to
Plantas de tratamiento	La Habana	300	4to
Plantas depuradoras de agua	La Habana	300	4to
Estaciones de bombeo	La Habana, Artemisa y Mayabeque	300	3ro
Sistemas de riego y de drenaje agrícola	Artemisa y Mayabeque	300	4to
Acueductos	La Habana, Artemisa y Mayabeque	300 y 600	4to y 1ro
Fábrica de tuberías plásticas	La Habana	270	2do

- Para los estudiantes de años superiores se ha creado una competencia de habilidades en los eventos científicos, donde para dar las respuestas deben de hacerse de ingenio y creatividad. También, aquellos que en una Jornada Científica Estudiantil realizaron experimentos sobre leyes de la hidráulica, promovidos por la cátedra, en coordinación con algunos profesores expusieron, en determinadas actividades, sus resultados con alto impacto en los estudiantes que recibieron las explicaciones.
- En el año 2016 el INRH convocó, como medida contra la sequía por una parte y el derroche por la otra, un concurso denominado “Cero Derroche”, en el que estudiantes de cuarto año, que forman parte del proyecto, participaron y obtuvieron premios.
- En la actualidad se ha logrado una aplicación en el sistema operativo Android, bajo el nombre de “Neurona Hidráulica”, (ver figura 5) que promueve la cultura de la profesión y los logros obtenidos en Cuba, con alta aceptación en la comunidad estudiantil. La concepción, diseño, programación y puesta en marcha ha estado a cargo de estudiantes y profesores de la cátedra, y esto ha sido un resultado importante del proyecto, dado el impacto que hoy en día tienen las tecnologías de la información y las comunicaciones. Cuenta con cinco juegos, de diversos tipos: Identificar con ayuda de una

figura, Enlaza, Escoger entre tres opciones, Agilidad mental y Rellenar.



Figura 5. Captura de la pantalla de presentación de La Neurona Hidráulica

Parte de estos resultados han sido expuestos en eventos científicos nacionales e internacionales tal y como aparecen referenciados en la tabla 1.

Tabla 1. Trabajos realizados por la Cátedra Francisco de Albear presentados en eventos científicos

Nº	Nombre del trabajo	Evento	Tipo de evento
1	“Contribución a la orientación profesional vocacional desde la extensión universitaria en carreras de prioridad social”	XIII Congreso Latinoamericano de Extensión Universitaria (CLEU)	Internacional
2	“La Cátedra Honorífica Francisco de Albear en la formación de los ingenieros hidráulicos en los tiempos actuales”	I Taller Nacional Gestión de acueductos en Cuba	Nacional
3	“El curioso mundo del agua”	Naturaleza 2015	Nacional

La convocatoria internacional lanzada por la Cátedra Unesco “Agua y educación para el Desarrollo Sostenible” y la Cátedra Abierta de Estudios

Latinoamericanos “José Martí” de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) de Argentina para el certamen literario “Palabras en el agua”, fue acogida



por uno de los autores, que presentó un ensayo y alcanzó una mención. Este será publicado en el libro que lleva por título el del certamen.

El alcance de las actividades del proyecto ha llegado a niveles de posgrado, y en el año 2016 se impartió a profesores del Departamento de Ciencias Sociales de la Cujae la conferencia "La Hidráulica y su historia en tiempo y espacio cubanos" en un curso de posgrado de Historia coordinado por dicho departamento. Esta conferencia fue la base para un artículo en una revista indexada en la base de datos Scielo (Torres, 2017). En la misma se aborda el desarrollo que se ha manifestado en Cuba de las obras hidráulicas y la enseñanza de la misma. Se muestra como en los últimos 26 años este ha sido vertiginoso y su impacto social igual. Este último se ha evidenciado sobre todo en la retención de grandes volúmenes de agua que se asocian a los huracanes, lo cual ha favorecido a disminuir considerablemente las víctimas por las crecidas de los ríos.

Por último, hay que mencionar la participación de uno de los autores en un espectáculo humorístico, denominado Proyecto Delta, llevado a cabo por la Facultad de Matemática de la Universidad de La Habana con una presentación sobre expresiones incorrectas en las que el agua se ve involucrada. El título de esta es "Agua para disparates". En esta se reflexionó sobre el decir de frases vinculadas con el agua en temáticas tales como del mar y las costas, de la construcción, de las máquinas y obras hidráulicas y del agua.

## 6. CONCLUSIONES

El principal impacto social que acarrearán las acciones del proyecto consiste en la motivación que suscitará en el público las temáticas científicas, medioambientales, técnicas y recreativas, así como la formación integral de los estudiantes que cursan la carrera de Ingeniería Hidráulica. Ha sido meritorio y reconocido a nivel nacional el trabajo que ha desarrollado la Cátedra Honorífica Francisco de Albear y Fernández de Lara en sus años de labor ininterrumpida de promoción y divulgación de los resultados de la investigación y la docencia en Ingeniería Hidráulica.

Basado en un modelo de desarrollo integral de la extensión universitaria en la universidad, la Cátedra trabaja por la democratización del saber generado, asumiendo su función social de contribuir a una mayor y mejor calidad de vida de la sociedad, desde un diálogo interactivo y multidireccional con los diferentes actores involucrados en la relación. La labor extensionista de la Cátedra en estos años, no solo ha apostado por el crecimiento científico-técnico y cultural de la sociedad, sino también a la transformación social y económica y a su propia transformación.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanco Y. 2014. Tras la ruta del agua. Revista Juventud Técnica 379. 17/09/2015. <http://www.juventudtecnica.cu/contenido/ruta-del-agua>
- Bravo G.1994. El mundo antiguo. Editorial Aries, México D.F., México: 578.
- Comisión Nacional de Carrera de Ingeniería Hidráulica (CNCIH). 2008. Plan de Estudio D Carrera Ingeniería Hidráulica (Modalidad Presencial-CRD). Ministerio de Educación Superior (MES), La Habana, Cuba.
- Dirección de Extensión Universitaria Cujae. 2017. Cátedras Honoríficas en la Cujae. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- García R. 2007. Francisco de Albear. Un genio cubano universal. Editorial Científico-Técnica, La Habana, Cuba: 145.
- García R. 2011. Un académico de renombre universal: Francisco de Albear. Conferencia Magistral en la Sesión Científica conmemorativa del sesquicentenario de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana, coordinada por la Sociedad Cubana de Historia de la Ciencia y la Tecnología
- Ministerio de Educación Superior (MES). 2012. Resolución N° 90/2012: Creación de las Cátedras Honoríficas en los Centros de Educación Superior adscriptos al Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba
- Pando J. 1993. Agua y tiempo en el arte. Revista Espacio, Tiempo y Forma, Serie VII 6: 647-672
- Pérez F. 2004. Proyecto de fundamentación para la constitución de la Cátedra Honorífica Francisco de Albear y Fernández de Lara. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Rodríguez J. 1975. José Martí. Obras Completas. Editorial Ciencias Sociales, La Habana, Cuba: 552.
- Torres R. 2016. Ingeniero universal. Revista Mar y Pesca 421: 17-20
- Torres R. 2012. Proyecto sociocultural de la Cátedra Francisco de Albear "El agua se abre paso". Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Torres R. 2017. Obras hidráulicas y enseñanza de esta especialidad en tiempo y espacio cubanos. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental 38 (1): 101-112

## LOS CONFLICTOS Y MOVIMIENTOS SOCIALES POR EL AGUA EN MÉXICO, DESDE LA PERSPECTIVA DE LA GIRH

### CONFLICTS AND SOCIAL MOVEMENTS ON WATER IN MEXICO, FROM THE IWRM PERSPECTIVE

Vargas Velázquez, Sergio<sup>1</sup>

#### Resumen

La incorporación de los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, GIRH, en el marco institucional de México, transformó profundamente las relaciones entre las entidades gubernamentales con los grupos de interés y las formas de gestión social del agua. En las últimas décadas, diferentes regiones hidrológicas han alcanzado ya sus límites hidrológicos por el impulso de las presiones socioeconómicas y demográficas, constriñendo a los distintos grupos sociales e intereses en torno al agua a modificar sus estrategias de acceso y uso del agua, entre las cuales están las de reafirmar su derecho al agua y asegurar su acceso seguro por distintos medios, en un contexto de redistribución de las externalidades negativas producidas por la escasez del líquido. Los grupos de interés dominantes, como son las ciudades, industrias y agricultura comercial, fortalecen su acceso al agua por distintas vías, en tanto la autoridad federal del agua, la Comisión Nacional del Agua, Conagua, pretende regular la redistribución del líquido disponible en un modelo de gestión con participación del capital privado. De esta manera, algunas de las soluciones a la crisis del agua implican una mayor intervención en el ciclo hidrológico con base en grandes infraestructuras que redistribuyen el agua entre regiones y usos. Este tipo de soluciones son vistas con gran desconfianza por distintos grupos sociales locales organizados por el agua, así como por organizaciones ambientalistas y grupos de la sociedad civil, generando importantes movimientos sociales de carácter comunitario y ciudadano. Los espacios de participación social constituidos en los consejos de cuenca y órganos auxiliares, han resultado ineficaces para tratar la conflictividad creciente. Los conflictos por el agua representan una dimensión importante que debería ser reconocida y analizada por los organismos gubernamentales para institucionalizar los procesos de negociación y resolución desde la perspectiva de la gobernanza hídrica. Existen numerosos estudios que analizan los conflictos y movimientos sociopolíticos por el agua, pero pocos trabajos lo hacen con una perspectiva de largo plazo. Con base en información hemerográfica disponible, se caracterizan los movimientos sociales por el agua, para mostrar cambios importantes en su composición e intensidad, así como la tendencia hacia su intensificación, al menos en las estrategias seguidas por aquellos movimientos sociales de origen comunitario. Se identifican las tendencias significativas de largo plazo del ciclo de protesta de los movimientos sociales por el agua, resaltando la necesidad de reexaminar las políticas de participación social para la gestión del agua.

**Palabras clave:** conflicto, movimiento social, gobernanza

#### Abstract

With the incorporation of Integrated Water Resources Management, IWRM, principles, the institutional framework of Mexico, was profoundly transformed the relationship between government entities with stakeholders and forms of social water management. Different hydrological regions have already reached their hydrological boundaries by the drive of socioeconomic and demographic pressures in recent decades, boosting the various social groups and interests around water to modify their strategies for access and use of water, among which are to reaffirm their access to water by different means, in a context of redistribution of costs and consequences of water scarcity. The dominant interest groups, such as cities, industries and commercial agriculture, strengthen their access to water in different ways, while the federal water authority, the National Water Commission, Conagua, seeks to regulate the redistribution of liquid available through large infrastructures and a management model with the participation of private capital. In this way, some of the solutions to the water crisis involve greater intervention in the hydrological cycle based on large infrastructures that redistribute water between regions and uses. These types of solutions are viewed with great distrust by different social groups organized by the water at local level, as well as by environmental organizations and civil society groups, generating important social movements of community and citizen character. The spaces of social participation through watershed councils and auxiliary bodies have proved ineffective in dealing with growing conflict. The social conflict over water expresses an important dimension that should be recognized and analyzed by government agencies to institutionalize processes of negotiation and resolution from the perspective of water governance. There are several studies that analyze conflicts and sociopolitical movements for water, but few studies have analyzed them in the long term. Based on hemerographic information and available methodologies, the social movements on water are characterized to show significant changes in its composition and intensity as well as the trend towards intensification, at least in the strategies followed by those social movements of Community origin. There are identified some significant long-term trends in the cycle of protest of social movements over water, highlighting the need to re-examine social participation policies for water management.

**Keywords:** conflict, social movement, governance

1 Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México. sergio.vargasvme@uaem.edu.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

El efecto acumulado de la expansión demográfica y de la demanda de agua, el desarrollo urbano e hidroagrícola, el aumento de infraestructuras y nuevas tecnologías, las variaciones económicas y relocalizaciones de actividades y empresas, conllevan enormes presiones y dilemas sociales sobre los recursos hídricos disponibles. La magnitud de los cambios entre el ambiente y la sociedad es lo que define el *antropoceno*, actual era geológica en la cual la antropización planetaria está teniendo resultados devastadores para toda forma de vida superior, incluyendo a los humanos (Descola, 2017). Las manifestaciones sociales del deterioro ambiental son diversas, pero las más significativas en las últimas décadas han sido caracterizadas como conflictos socioambientales (Le Billon, 2015), en los que los participantes centrales en la realización de acciones sociales en demanda de la intervención pública son los *movimientos sociales*.

Los movimientos sociales son formas de acción colectiva características de las sociedades modernas, las cuales se deben de diferenciar de los grupos de interés y presión, organizaciones no gubernamentales y partidos políticos, en tanto estos últimos tienen un carácter funcional ya que sus estrategias se centran en la cooperación y competencia para influir en los problemas públicos, sin cuestionar el orden social o político establecido. En cambio, los movimientos sociales buscan atraer la atención pública primordialmente con estrategias conflictivas, lo cual no les impide vincularse con ONGs, grupos de interés o de presión, partidos políticos y otro tipo de organizaciones, incluso en transformarse posteriormente en alguno de estos tipos de acción colectiva. Los factores determinantes para la conformación de los movimientos sociales, el activismo y las acciones políticas directas son los problemas ambientales, externalidades o costos ambientales, las injusticias reales o percibidas, como también son respuesta a daños y luchas por la apropiación social de la naturaleza (Leff, 2004: 72; Heynen y Van Sant, 2014: 169; Peet y Watt, 2004).

Ibarra (2005), analiza diversas definiciones generales de movimiento social y, como también hace Modonesi (2016), exhorta a distinguir entre distintos tipos de movimientos sociales, principalmente entre aquellos que esgrimen principios universales y abstractos para proponer cambios en conductas y relaciones sociales, que corresponden a los movimientos culturales, de aquellos otros que se fijan metas más o menos delimitadas de cambio en los asuntos públicos, particularmente dirigidas sus acciones hacia las entidades gubernamentales; a estos corresponden los movimientos sociopolíticos. Ambos buscan cambiar el orden social, pero los primeros enfatizan el cambio cultural y los segundos el político. Ibarra define a los movimientos de carácter sociopolítico como “red de relaciones informales entre individuos, grupos y organizaciones que, en

sostenida y frecuentemente conflictiva interacción con autoridades políticas y otras élites, y compartiendo una identidad colectiva no necesariamente excluyente, demandan públicamente cambios (potencialmente antisistémicos) en el ejercicio o redistribución del poder en favor de intereses cuyos titulares son indeterminados e indeterminables colectivos o categorías sociales” (Ibarra, 2005: 94). Modonesi (2016) ubica a los movimientos sociopolíticos en un continuo proceso de búsqueda de autonomía política, subalteridad y antagonismo que, en el caso de los movimientos socioambientales y en particular aquellos por el agua, tienen una relación compleja con la dinámica del ciclo hidrológico antropizado.

Actualmente existen distintos esfuerzos para investigar la relación entre agua y sociedad superando la mirada fragmentada que proporcionan las distintas disciplinas, ya que ahora se percibe que éstas aproximaciones no son suficientes para explicar y actuar coherentemente sobre una realidad cada vez más compleja. Esto ha llevado a la formulación de modelos hidrológicos y de cambio climático en los cuales se tratan de establecer relaciones causales entre población, economía (consumo y producción), tecnología y ciclo hidrológico con el fin de definir acciones de gestión del agua que puedan revertir o al menos frenar el deterioro de los recursos hídricos, incluso planteando iniciativas globales como ha sido la GIRH; ejemplo de esto es el modelo Presión-Estado-Respuesta de la OCDE. En este tipo de modelos de decisión, los procesos sociales son variables exógenas, e incluso no se incorporan las distintas agregaciones de intereses y acciones colectivas que constituyen las relaciones conflictivas por el agua, y sólo señalan qué tanto o hacia donde se dirige un sistema natural de tales características. Estos enfoques no expresan el proceso social en su conjunto —ni aclaran la dinámica de las fuerzas sociales impulsoras de la crisis del agua y la conflictividad que generan—. Por otro lado, existen numerosos estudios desde las ciencias sociales en las que el ciclo del agua es sólo el escenario donde se suceden los conflictos por la distribución o los derechos por los recursos hídricos, las representaciones culturales y expresiones subjetivas sobre el agua, así como los análisis económicos que definen el uso del agua sólo en términos de costos marginales o precios de extracción. En estos casos tampoco se hacen visibles de forma completa los vínculos entre agua y sociedad bajo las condiciones de deterioro.

La relación entre agua y sociedad conforma un sistema complejo, y como tal, es necesario construir una aproximación que permita abordar las dimensiones centrales del deterioro hidrológico, los procesos de retroalimentación entre procesos hidrológicos y procesos humanos, identificando los ejes sobre los cuales transcurren las fuerzas conductoras de lo que se ha denominado el ciclo hidrosocial (Swyngedouw, 2009). En esta línea de pensamiento se encuentran



un grupo amplio de enfoques caracterizados por el uso de conceptos que integran lo social y lo físico/natural/técnico, y que han influido a esta aproximación respecto a la relación agua-sociedad: *sistemas sociotécnicos* (Mollinga, 2014), *redes hidrosociales* (Wester, 2008), *socionaturalezas* (Swyngedouw, 2004), *ciclos hidrosociales* (Linton y Budds, 2014), entre otros. La investigación que se está realizando desde esta perspectiva asume una posición crítica respecto a las ciencias ambientales y la tecnología que se conciben a sí mismas como neutrales ante los escenarios sociopolíticos de la gestión del agua, señalando que el centro de la relación agua-sociedad está en la configuración de cada sociedad, y se encuentra sujeta a las relaciones de fuerza entre entidades reguladoras, grupos de interés, organizaciones y movimientos sociales. Estos enfoques estudian las relaciones sociohídricas configuradas en torno al flujo y control del agua, los intereses y las relaciones de poder entre los actores involucrados, y cómo estas interacciones resultan en determinados ordenamientos sociales y naturales dinámicos (socionaturales) en espacio y tiempo. Los procesos sociopolíticos son las fuerzas que dirigen los cambios en los modelos de gestión del agua, a través de las relaciones de poder entre distintos grupos sociales, y de estos con agentes gubernamentales, en un proceso de apropiación, distribución y antropización del ciclo hidrológico que retroalimenta en sus transformaciones al ciclo hidrosocial.

Desde esta perspectiva resulta sustantiva la caracterización de las formas de organización de la sociedad en torno al agua, la dinámica de conflicto y resolución con base en formas de acción colectiva que rebasan el nivel espontáneo, y se conforman en parte de la misma gestión del agua. Todo esto sin perder de vista una caracterización de los procesos hidrológicos y su retroalimentación hacia la dinámica social. Este enfoque no cuenta todavía con una propuesta metodológica precisa y homogénea, pero de ella se desprende la importancia de analizar las formas en que la sociedad y entidades gubernamentales interactúan para explicar el ciclo hidrosocial. En este sentido es que la caracterización de los movimientos sociales por el agua, la transformación de sus demandas y acciones con base en procesos de demanda, conflicto, cooperación o consenso, contribuyen a alcanzar las metas de sostenibilidad hidrológica y ambiental, trasfigurando la gestión del agua desde el ámbito social o gubernamental.

La gobernanza del agua, entendida como los procesos de interacción entre gobernantes y gobernados respecto al manejo del agua, con base en un marco normativo y procesos de negociación e inclusión de organizaciones sociales con el fin de jerarquizar problemas, generar soluciones consensuadas, implementar acciones públicas para remediar los problemas socioambientales en torno

al agua, así como la construcción de instituciones y normas necesarias para generar esos cambios, tiene que producir estos procesos de contacto, negociación y conflicto entre entidades gubernamentales y movimientos sociales (Lascoumes y Le Gales, 2014: 33-52), de otra manera la gestión del agua permanecería en el modelo de arriba abajo o comando control de décadas atrás.

Los conflictos y movimientos sociales por el agua también se deben inscribir en los profundos cambios que se han llevado a cabo en las últimas décadas, entre el Estado –el orden político representado a través de las organizaciones gubernamentales- y la sociedad civil. El Estado ha tenido que asumir la regulación de muchos órdenes de la vida social, incluyendo el acceso, distribución y uso del agua, con el fin de garantizar su reparto con criterios públicos con base en los cuales sea posible mantener la *paz hidráulica*. La sociedad civil está constituida por actores colectivos que se organizan para defender o destituir un determinado régimen político -las reglas de acceso y distribución de poder dentro de un orden político-. Son la expresión organizada de una vida social estable, como también de las diferencias permanentes que surgen del conjunto de estructuras que conforman un orden social, y las acciones colectivas que realizan son el vehículo de expresión tanto de las desigualdades e inequidades, como de sus percepciones de las relaciones sociales en torno al ambiente, al tiempo que sostienen distintas prácticas culturales. Todos los Estados modernos –democracias plebiscitarias- han establecido procedimientos para dirimir las diferencias entre los organismos gubernamentales y la multiplicidad de intereses, asociaciones civiles y movimientos sociales a través de la acción pública (Cabrero, 2005; Lascoumes y Le Gales, 2014), la cual implica la articulación del ámbito social con el gubernamental, de forma consensuada al mismo tiempo que permanentemente conflictiva.

Los conflictos en contra de la construcción de infraestructuras o de determinadas prácticas de gestión del agua no se entienden como disfuncionalidades, sino como factores centrales de cambio social, político-institucional y cultural en los procesos de modernización y desarrollo, en tanto poseen una importante *productividad social* o efectos sociales (Azuela y Mussetta, 2009) ante los cuales los arreglos institucionales de cada Estado deben ser capaces de responder convenientemente. Los movimientos sociales son formas de acción colectiva que expresan identidad, directrices culturales y defienden intereses, y por tanto su existencia expresa la calidad democrática: cuando se carece de la necesaria institucionalización del conflicto, la calidad de la democracia se ve afectada negativamente por la concentración del poder, la alta polarización política, la ausencia de mecanismos de regulación del conflicto y la débil posibilidad de representación de la pluralidad de intereses de la sociedad (Alberti

et al, 2014). Los movimientos sociales son, a fin de cuentas, un importante factor de cambio (Sztompka, 1995: 303-329), que exige al sistema político a tomar en consideración demandas que van más allá de su visión institucional. Es por esto que son formas de acción colectiva esenciales para la democracia, la profundizan en tanto que extienden las capacidades de los sistemas políticos para atender demandas (Touraine, 2000).

Desde hace varias décadas se promueve la transición en el modelo de gestión del agua dominante para que reconozca tanto la importancia de las organizaciones autogestivas en el plano local, como distintas escalas de gestión que contemplen tanto los factores hidrológicos como los sociales, siendo las unidades de gestión las cuencas hidrológicas, cualquiera que sea su extensión, hasta alcanzar el plano nacional o internacional. De esta manera, se considera que el manejo del agua tiene tanto elementos propios de las ciencias ambientales para realizar un reparto adecuado del agua disponible o su saneamiento, como aquellos elementos de carácter social, político económico –igualmente definidos en las distintas escalas en las que la sociedad y los gobiernos se encuentran organizados-, y donde la contraparte de las entidades gestoras son normalmente una multitud de grupos de interés, organizaciones locales de carácter comunitario o asociaciones civiles, grandes empresas, entre otros. Todos estos exigen no solo en términos de calidad de servicio, sino también han incorporado demandas más complejas que tienen que ver con los valores posmaterialistas (Inglehart, 1991; García, 2004:271-298), donde las prioridades de individuos y grupos reflejan los cambios estructurales de las últimas décadas entre un medio ambiente en acelerado deterioro y una economía globalizada, ante lo cual manifiestan nuevas preocupaciones y valoraciones hacia la sustentabilidad, la justicia distributiva del agua, los derechos de acceso al agua y a un ambiente limpio, la conservación de la biodiversidad, en contra de las prácticas de gestión de la oferta de agua de décadas anteriores que favorecen la construcción de infraestructuras y la transferencia del agua hacia donde crece la economía y la población, sin mayor consideración ambiental o de las externalidades sociales negativas que se provoquen.

El otro elemento central de los conflictos, allende de las características de cada arreglo institucional y actores gubernamentales concretos, son los mismos principios de la GIRH con los cuales se realiza el manejo del agua, a los cuales el sector gubernamental de México ha afirmado repetidamente se pretende llegar desde hace más de dos décadas y media, incluyéndolos explícitamente en la Reforma a la Ley de Aguas Nacionales de 2004. Sin embargo, distintos estudios académicos sobre su implementación en el mundo (Molle, 2008; Mollinga, 2014; Mussetta, 2009; Saravanan et al, 2009; Biswas, 2004), y estudios de las políticas

públicas (Cabrero, 2005; Lascoumes y Le Gales, 2014), resaltan ese mismo carácter sociopolítico complejo de todo proceso de implementación de acciones públicas. Si bien la GIRH plantea una serie de lineamientos clave a seguir en términos de organización para la gestión, evaluaciones sobre su avance en escalas nacionales revelan aplicaciones diferenciadas que remiten a negociaciones, disputas y redefiniciones sobre lo que sus principios significan en contextos específicos (Saravanan et al, 2009), en donde los discursos gubernamentales respecto a la implementación de este modelo de gestión validado por agencias globales, la mayoría de las veces no considera las prácticas específicas de manejo locales del agua, tanto de entidades gubernamentales como de organizaciones sociales, y en específico los movimientos sociales.

Aquí nos interesa exponer algunos cambios centrales en los movimientos sociales por el agua en México, que a pesar de su diversidad muestran cierta sistematicidad en sus acciones y son comprensibles en el contexto de los cambios políticos, sociales y económicos de las últimas décadas, a los que las entidades estatales deben ser capaces de responder y regular, reconociendo el papel que juegan en la sociedad moderna. Los movimientos sociales son series continuas de interacciones entre los detentadores del poder e individuos que reclaman con éxito hablar en nombre de un sector de la sociedad carente de representación formal, en el curso de la cual estas personas realizan públicamente demandas de cambio en la distribución o ejercicio del poder, y respaldan estas demandas con manifestaciones públicas de apoyo (Tarrow, 2009:17-19). Es decir, los movimientos sociales son vistos como entidades organizadas a partir de la *acción colectiva contenciosa*, con continuidad en el tiempo y portadoras de cambios reflexivos –capaces de autotransformarse a través de la lucha social y el conflicto-, lo que implica la conformación de una identidad compartida entre los participantes, buscando las oportunidades políticas para lo cual movilizan recursos de diversa índole, desde los recursos discursivos, identitarios y simbólicos a la posibilidad de organizar y realizar acciones directas –marchas, tomas de oficinas o infraestructuras-. Existe una gran diversidad de teorías y enfoques para su estudio, muchas veces contrapuestos, pero coincidentes en su caracterización como fenómenos sociales centrales en los Estados modernos.

Otro punto que es importante resaltar en el caso de México y seguramente de la mayoría de países latinoamericanos, es la escisión que existe entre la gestión social del agua –fundamentalmente a nivel local-, de aquella que realizan las entidades gubernamentales. En México el agua está definida como bien de propiedad nacional, la cual es representada por la autoridad federal, que a su vez delega funciones a comisiones estatales de agua y organismos operadores de agua a nivel municipal,

asigna o concesiona el agua a través de los títulos de concesión a asociaciones de usuarios. Pero sobre el agua pueden existir distintos marcos normativos, desde las leyes formales a nivel nacional, como los marcos normativos locales, generalmente de carácter comunitario, el llamado pluralismo jurídico en el uso campesino e indígena del agua (Roth, Boelens y Zwartveen, 2015), que en México se concentran en ejidos y comunidades agrarias de perfil campesino e indígena (Ávila, 2007), mayoritariamente en el centro y sur del país, lo cual lleva a esta población a percibir que el agua que pasa por su localidad es un recurso de su pueblo al cual tienen derecho por *usos y costumbres* (Peña et al, 2010). La respuesta de muchas localidades a la intervención gubernamental es vista entonces directamente como una agresión a su integridad como grupo social, en tanto precisamente tratan de hacer exigible un derecho local al agua –no reconocido constitucionalmente– pero basado su tradición local.

Los movimientos sociales surgidos desde la gestión local del agua en localidades campesinas e indígenas corresponden a lo que llamamos aquí movimientos comunitarios. Al mismo tiempo, existen los movimientos sociales surgidos de la sociedad urbana, sectores socioeconómicos medios y grupos profesionales, teniendo estos un perfil que se distancia de los movimientos comunitarios, pero que no es obstáculo para que en varios conflictos emblemáticos ambos tipos de grupos sociales formen coaliciones y desarrollen estrategias conjuntas.

Como afirma Axel Dourojeanni (1994, p. 121), la gestión del agua es por definición la gestión de conflictos. El agua, a diferencia de otros recursos escasos y consumibles, se utiliza para alimentar a todas las facetas de la sociedad, desde la biología y la economía, a la estética y la práctica espiritual. Por otra parte, fluctúa constantemente en el espacio y el tiempo, su gestión por lo general se encuentra fragmentada, y que a menudo está sujeta a los principios legales imprecisos o contradictorios. No hay tal cosa como la gestión del agua para un solo propósito; la gestión del agua es multiobjetivo y se lleva a cabo a través de la constante interacción de intereses en conflicto. La GIRH ha pretendido abordar la conflictividad del agua con un arreglo institucional que reconoce las dimensiones sociales y la participación de la diversidad de grupos de interés en la gestión del agua por unidad hidrológica. Sin embargo, persisten muchas dificultades en su implementación (Biswas, 2004; Butterworth et al, 2010) a pesar del tiempo transcurrido. Es en este sentido que la evaluación de los conflictos y los movimientos sociales por el agua pueden expresar varias de las complejidades que la propuesta de la GIRH no ha logrado abordar apropiadamente.

A partir de la década de 1990, el régimen político mexicano ha perdido legitimidad paulatinamente con distintos grupos sociales (Latinobarómetro, 2010: pp. 32; 2016: 21), en gran parte explicable por el

agotamiento del modelo corporativo de organización de intereses y por la aplicación del proyecto de apertura y desregulación económica, razón por la cual se buscó una transición que reformara el régimen político (Rodríguez, 2009), la cual ha tenido resultados inciertos. Sin embargo, la sociedad civil todavía es incipiente (Bizberg, 2003: 54-57), incapaz de acciones más coordinadas y amplias. Esta es una de las razones por las cuales, si bien existen ya numerosas organizaciones de la sociedad civil en torno al agua, académicos y organismos internacionales que cuestionan la política del agua a nivel federal como local, la participación social en los espacios elaborados arriba/abajo por la Conagua es limitada, lo que le permite a la *hidrocracia* federal mantener un muy poco cuestionado control sobre la política del agua (Vargas y Mollard, 2005). Esto implica que esos espacios de participación no ofrezcan un terreno neutral para discutir e intervenir institucionalmente los conflictos por el agua, salvo sus excepciones, como ha sido el conflicto por las aguas superficiales en la cuenca Lerma-Chapala. Esto también puede ser una causa de por qué el descontento respecto al manejo del agua tiende a salirse del cauce institucional.

La hidrocracia son los grupos técnicos de ingenieros con una orientación económica y política que conforman una organización burocrática, la cual no es neutra en cuanto a sus valoraciones e intereses (Treffner et al, 2010, p. 254). Las relaciones de poder se expresan en un entramado institucional en el cual la hidrocracia federal mexicana sigue teniendo un papel fundamental como representante del Estado, y frente a ella se organizan grupos de interés, organizaciones comunitarias y movimientos sociales, estableciendo relaciones de negociación y antagónicas mediante acciones de resistencia y el cuestionamiento. La transferencia de los distritos de riego a organizaciones de usuarios, la creación de las comisiones estatales de agua y el fortalecimiento de los organismos operadores de agua y saneamiento a nivel municipal, redujeron considerablemente el número de empleados, de 38 mil en 1989, año de la creación de la Conagua, a alrededor de 10 mil en 2016 (Conagua, 2016: 134-135), a pesar de lo cual, concentran normativamente el control sobre la gestión gubernamental del agua.

Respecto a la GIRH en México hay una interpretación dominante de esta doctrina por parte de la *hidrocracia* federal, en la que resalta los aspectos técnicos de la política pública y, al igual que en otros países, se le despolitiza. Esta visión, consideramos, expresa en sí misma los intereses y percepción de un grupo de funcionarios públicos, tanto de aquellos que perciben como superfluo el incrementar la participación social –en tanto el costo de la negociación es demasiado alto– y porque limita las “buenas decisiones técnicas” y entorpece la toma de decisiones (Vargas y Mollard, 2005: 25). Por el otro lado surge una perspectiva que pretende cuestionar a profundidad la acción



del gobierno federal, al asumir en algunos de sus extremos el discurso altermundista y antiprivatizador, e iniciar su vinculación con movimientos sociales que van más allá de la gestión del agua.

El proceso de implementación de las políticas públicas de nueva orientación se da precisamente a partir de la desestructuración de la hidrocracia tradicional, la transición del modelo de gestión centralizada de la oferta de agua a la gestión descentralizada por cuenca hidrológica de la demanda de agua, lo cual en nuestro país ha pasado por etapas en las que se van transformando las relaciones del gobierno federal con los otros niveles de gobierno, se reorganizan las cohortes de la hidrocracia, se implementan las políticas neoliberales (aunque tienen un fuerte carácter pragmático de acuerdo a las circunstancias de este sector de la administración pública federal), y los procesos más regionales y locales (Wester et al, 2008), en los que aparecieron la diversidad de situaciones sociohídricas, a distintas escalas que la definida gubernamental de gran región hidrológica, en las que los 'juegos de actores reales se llevan a cabo. Uno de estos procesos es el cierre hidrológico (Molle et al, 2010), consistente en la asignación de toda la disponibilidad del agua para uso humano, por lo que en regiones hidrológicas toda el agua que circula en ellas ya ha sido concesionada, llevando a la necesidad de cubrir la creciente demanda de agua por medio de trasvases. Las respuestas sociales han ido gradualmente hacia la organización por la defensa del agua y territorio, que se opone a las transferencias de agua y la participación de capital privado en la gestión del recurso.

## 2. METODOLOGÍA

La definición de cuáles son las razones públicas de los conflictos por el agua generalmente depende de los actores claves intervinientes, sean sociales o gubernamentales, de la dinámica misma del conflicto a través de la disputa argumentativa pública, que restringe lo que es posible decir o no respecto a la problemática del agua. La fuente hemerográfica es capaz de representar hasta un cierto nivel de complejidad este tipo de situaciones sociales, con base en las cuales es viable reconstruir etapas del conflicto, actores sociales y gubernamentales involucrados y el discurso público, este último en muchos casos se convierte en la verdad socialmente construida respecto a la situación socioambiental del agua.

Con respecto al agua como para el estudio de la conflictividad social en general, los recursos hemerográficos permiten generar escenarios extensivos, a partir de los cuales es posible observar tendencias, niveles de organización de los involucrados y las etapas por las que transita la conflictividad social. De acuerdo a distintas investigaciones sobre movimientos sociales, protestas y luchas sociales realizadas utilizando esta

fuentes hemerográficas, Calderón (2012), concluye respecto a la utilidad de este tipo de recurso para la construcción de escenarios de escala regional o a nivel país –no así para el nivel local-, así como las limitaciones propias de la prensa escrita en términos de su diversidad, línea editorial que puede favorecer la invisibilidad social de determinados conflictos persuadidos por algunos de los mismos involucrados en ellos. Este tipo de metodologías permite la construcción de distintos índices y su manejo estadístico multivariado, como puede ser desde una clasificación más o menos compleja (Bazán y Suárez, 2014), la elaboración de índices de conflictividad, entre otros índices de *disposición* (Calderón 2012).

La base de datos hemerográfica expresa las tendencias generales del proceso de construcción de los conflictos sobre agua como asunto público, ya que son aquellas noticias que logran llegar a los medios de comunicación nacionales (periódicos y algunas revistas), a partir del peso que tienen en la opinión nacional o regional, y la capacidad de los actores o autoridades locales de que eso ocurra. El conjunto de noticias puede representar un nivel de conflictividad en general, pero resulta más complicado estudiar los conflictos específicos, a menos que se realice un reagrupamiento de dichas noticias a partir de una vinculación entre conjuntos de noticias, o bien, se identifique una variable como eje con base en la cual se organicen las noticias, por ejemplo, los actores de una región hidrológica. Asimismo, resultan menos accesibles los periódicos locales, por lo que en ese caso resultan más productivas las técnicas mixtas para la elaboración de estudios de caso.

La metodología consiste en la recopilación de noticias de los medios disponibles, y se codifica cada nota de acuerdo al lugar, actores sociales y gubernamentales mencionados, tipo de acciones. En nuestro caso consultamos las publicaciones de tres fuentes. La primera es la base hemerográfica de conflictos por el agua, desarrollada en la Subcoordinación de Participación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en 1991, que abarca los años 1985 a 1990, elaborada con base en 17 periódicos nacionales (IMTA, 1991). Sus resultados se publicaron en cuatro boletines en 1991. La segunda es la base hemerográfica de conflictos por el agua, también elaborada en el IMTA (2015), y que comprende los años 2000 a 2014 y consta de 5,762 registros obtenidos de tres periódicos nacionales. De esta información sólo se contó con una versión parcialmente codificada, por lo que el análisis se limitó a caracterizar los agregados de las categorías. La tercera es la investigación publicada por Kloster (2016), quien realizó una comparación entre 1990, 2000 y 2010, utilizando para su análisis del año de 1990 a la primera base del IMTA antes mencionada, y desarrolló con la misma metodología sendas bases para los años 2000 y 2010, contando para su análisis 1,542 registros, con una codificación

muy detallada que le permite identificar los distintos aspectos de la movilización social por el agua, e identificar las acciones colectivas de los movimientos comunitarios respecto del conjunto. Si bien las respectivas codificaciones y fuentes hemerográficas no son completamente compatibles entre sí, permiten generar una visión de conjunto. Asimismo se revisó una selección de trabajos que buscan caracterizar la conflictividad por el agua o los movimientos sociales, constatando la existencia de posiciones teóricas y metodológicas contrapuestas, a pesar del uso recurrente de fuentes hemerográficas (González, 2016, Perló y González 2005; Gómez 2015; Vargas et al. 2012; Mussetta 2009, entre otros), donde se considera el discurso público (Hajer, 1995) expresado a través de los medios de comunicación como una parte de construcción de la conflictividad y de la agenda pública gubernamental (Hannigan, 2006). La tesis de este trabajo es que la conflictividad por el agua se ha incrementado en cantidad e intensidad, siendo los movimientos sociales la forma de acción colectiva dominante y, antes que ser resultado de la escasez de agua, lo son por la falta de espacios públicos de resolución, aspecto que desde la perspectiva de la GIRH se tendría que acometer.

### 3. RESULTADOS

Los conflictos por el agua son situaciones recurrentes y ya habituales en México. Podemos suponer que su número, intensidad y complejidad son crecientes de acuerdo a la manera en que se presentan ante la opinión pública. En una gran parte de nuestro territorio nacional están presentes y se despliegan en distintas escalas –local, regional, cuenca o internacional-, en los que se encuentran involucrados desiguales actores sociales y gubernamentales con múltiples niveles de organización, tipo y amplitud de las acciones que realizan a partir de sus intereses por el recurso, en confrontaciones de intensidad y amplitud heterogéneas (Sainz y Becerra 2003; Kloster, 2016).

Los conflictos son situaciones de competencia en las que las partes son conscientes de la incompatibilidad de posiciones presentes, futuras o potenciales y en las que cada parte aspira a ocupar una posición que es incompatible con las aspiraciones de la otra. Estas posiciones contrapuestas pueden estar en el plano de los recursos materiales o ser exclusivamente de carácter simbólico valorativo. El conflicto social es entendido como un proceso de interacción contenciosa entre actores sociales e instituciones movilizadas con diversos grados de organización y que actúan de manera colectiva de acuerdo con expectativas de mejora, de defensa de la situación preexistente o proponiendo un contraproyecto social. Los conflictos por el agua, como todos los de carácter socioambiental, tienen diferencias respecto a otro tipo de conflictos, en tanto su dinámica está relacionada con procesos de retroalimentación

entre los procesos sociales más significativos y los procesos hidrológicos. Esto llevó a suponer la existencia de relaciones lineales entre escasez y surgimiento de los conflictos, de lo cual existe una amplia literatura que así lo suponía. Sin embargo, en las últimas décadas han surgido distintas perspectivas de investigación que han construido evidencia relevante que señala la complejidad de esas relaciones respecto al surgimiento de luchas, movimientos y violencia (Homer-Dixon, 1996).

Un conflicto social surge cuando un grupo social, actor o movimiento social expresa una situación de malestar colectivo a través de demandas y medidas de presión contra otro grupo social, alguna instancia pública o privada a la que considera responsable de dicha situación. Esta definición de conflicto restringe el campo de indagación y se focaliza en los agentes, las tipologías y las formas de conflicto que encarnan de modo más directo la relación entre Estado y sociedad.

La noción de conflicto social así definida es útil para observar y analizar un conflicto social coyuntural, pero no da cuenta de una visión de conjunto y de las situaciones que se producen cuando los conflictos se propagan, extienden y perpetúan. Entonces, es importante introducir la noción de conflictividad, porque da cuenta de una situación de conjunto, no de un hecho particular. La conflictividad no es sólo la suma de los conflictos puntales, sino de éstos más las relaciones que se establecen a partir de ellos. De ahí se podrían mirar las tendencias de este conjunto considerando agregados sociales y no actores singulares.

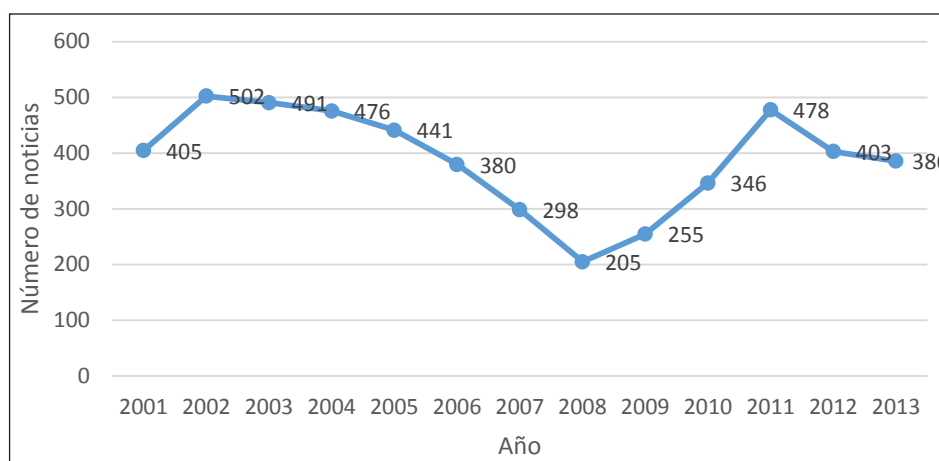
La toma de carreteras, oficinas o daño de infraestructuras no son raros de documentar en numerosos conflictos por el agua en México, pero a partir de estos es muy arriesgado asumir la existencia de una guerra por el agua, aunque existan casos de violencia física en la lucha por los recursos hídricos. Ante la inexistencia de una contabilidad oficial, se emplean los registros hemerográficos, con base en los cuales se revisan y codifican las noticias como acciones de distintos actores y se vinculan un conjunto de noticias como un conflicto. Este tipo de metodología permite generar distintos indicadores (Calderón, 2012; Sainz y Becerra 2003; Kloster, 2016), aunque resulta difícil la comparación entre distintas investigaciones, dada la selección de periódicos, las dimensiones consideradas y las divergencias en la codificación. El estudio de Calderón (2012) se refiere al conjunto de movimientos sociales en América Latina, lo cual le permite comparar entre países por nivel de conflictividad, número de conflictos y nivel de radicalización, en donde México, por ejemplo, se ubica por abajo del promedio del subcontinente, excepto en lo que clasifica como conflictos culturales. En cambio, lo ubica entre aquellos que se encuentran en un escenario con un clima social deteriorado y limitaciones para procesar los conflictos (Calderón, 2012: p. 280).

Con base en los registros de IMTA (1991), elaborados con noticias identificadas en 17 periódicos nacionales, y codificados los registros en 81 variables, entre las que destacan los tipos de acciones de la población en torno al agua, forma de presentación de los demandantes, tipo y contenido de las demandas y denuncias e instancia a la que se dirige la denuncia. En ese entonces se identificaba entre 1985 y 1990 un incremento importante de notas referidas a distintas acciones, al pasar en ese período de poco más de 50 notas al año a más de 120 que, aunque eran mayoritariamente denuncias a la prensa, ya se presentaba un 12% de acciones con enfrentamiento, de las cuales 7.3% eran con acciones directas.

Los movimientos sociales se manifiestan de forma cíclica, lo que ha dado a enfoques analíticos que buscan identificar las oportunidades políticas y la capacidad de movilización de recursos, como elementos sobresalientes que, en el caso de los conflictos por el agua tendrán alguna relación con los problemas de gestión a lo largo del ciclo hidrológico. Los ciclos de protesta son los procesos de escalamiento y desescalamiento de las acciones contestatarias de los movimientos sociales, y se

dan por distintas razones, entre las que destacan los cambios que se desarrollan en la dinámica conflictiva entre los participantes, como por ejemplo, ante una acción directa, como es una marcha o toma de oficinas, las entidades gubernamentales respondan con una negociación o apertura de diálogo, o bien la represión y desconocimiento de las demandas sociales. Esto asume una forma cíclica de interacciones intensificadas entre los desafiantes y las autoridades que pueden terminar en transformación, represión y a veces revolución (Tarrow, 2009).

En la base de 2000 a 2014 de la Subcoordinación de Participación Social del IMTA (2015) resulta relevante en primera instancia la aparición de un ciclo de movilizaciones/acciones entre 2000 y 2008/2009, y otro ciclo entre 2009/2010 a 2014 (gráfica 1). Esto contrasta con lo identificado en los primeros años de la década de 1990, donde se registraba una fuerte tendencia ascendente. En esta fuente, si no son estrictamente comparable con la base de IMTA de 1990, el número de notas varía de entre poco más de 200 a más de 500 por año, pero con base únicamente en 3 periódicos. En todo el período la tendencia es ligeramente descendente.



**Gráfica 1.** Tendencia en Número de noticias sobre conflictos por agua 2001-2014

**Fuente:** IMTA. Base Hemerográfica de conflictos por el agua (IMTA, 2015)

**Nota:** Los datos están ajustados con promedios móviles

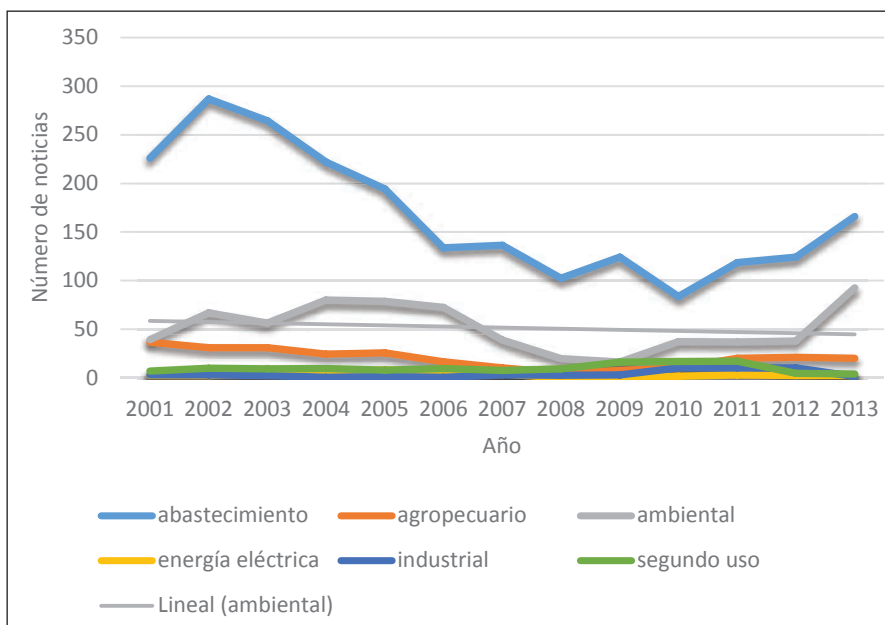
En el estudio de los movimientos sociales hay un enfoque que analiza el ciclo de protesta desde la tesis de las oportunidades políticas, las cuales son aquellas condiciones que favorecen las acciones de los involucrados a partir del cálculo racional que realizan sobre sus metas, los recursos que son capaces de movilizar y las posibles respuestas de las entidades gubernamentales. La regresión lineal a lo largo del período muestra una ligera tendencia a la reducción del número de notas, lo cual no tiene correlación clara con su intensidad. Pero desglosados a nivel de región hidrológica parecerían ir con el ciclo hidrológico en algunas regiones que concentran el número de registros, como la cuenca Lerma Chapala y el Valle de México.

En la gráfica 2 se muestra la tendencia respecto a los temas tratados en las notas, en donde destaca el del abastecimiento de agua como muy importante, aunque ha tenido una caída entre 2000 y 2010, volviendo a repuntar en estos últimos años. El otro tema de interés es el ambiental, el cual, a pesar de tener un crecimiento considerable en la primera década del siglo, tiene igualmente una tendencia decreciente, para retomar un repunte entre 2010 a la fecha. Entre ambas se muestra una correlación moderada. Respecto a los movimientos por agua se podría proponer como lo han hecho numerosos investigadores (Homer-Dixon, 1999), que la escasez es el principal detonador de la conflictividad por el agua. Sin embargo, distintas investigaciones (van der



Molen y Hildering, 2005; Tamas, s.f.) muestran que, si bien es un componente, este no resulta ser el principal, teniendo más bien como centro de conflictividad aspectos vinculados a los procesos decisionales

en torno a la distribución del agua, la respuesta a iniciativas gubernamentales de construcción de infraestructura, privatización de servicios, entre otros vinculados más al ámbito del régimen de gestión.



**Gráfica 2.** Tendencia en los temas de las noticias sobre conflictos por agua 2001-2014

Fuente: IMTA. Base Hemerográfica de conflictos por el agua (IMTA, 2015)

Nota: Los datos están ajustados con promedios móviles

La investigación que presenta mayor detalle de las luchas por el agua, corresponde a Kloster (2016), en donde igualmente con información hemerográfica y una codificación más fina, permite identificar el tipo de identidades sociales enfrentadas (quienes forman el movimiento), los repertorios de acción utilizados en la lucha (directas e indirectas), la respuesta gubernamental a las acciones, así como la diferencia de estrategias de lucha que siguen los movimientos ciudadanos respecto a los movimientos comunitarios, sin perder de vista la convergencia parcial en conflictos más amplios, como han sido los trasvases o la construcción de presas que redistribuyen el agua regionalmente. Esta base es distinta a la del IMTA, y está centrada en tres periódicos nacionales de la zona metropolitana del valle de México; La Jornada, El Universal y Reforma sólo para 2000 y 2010, y para 1990 utiliza la base del IMTA de 1990.

En este tipo de medios impresos, el mayor número de noticias sobre conflictos por agua se concentra en la zona metropolitana de la ciudad de México, por lo que no es analizable la distribución territorial de los conflictos, pero su comparación permite visualizar por un lado “la defensa del carácter ciudadano ante un avance territorial o un cambio de política que amenaza con la pérdida de beneficios ya construidos; mientras que, por otro, se lucha por la construcción de mayores garantías ciudadanas, sobre todo por aquellos que todavía no gozan de los plenos derechos ciudadanos” (Kloster, 2016: 52). Esto permite representar un punto que es de nuestro

interés resaltar, la trayectoria o direccionalidad de la lucha, los encuentros dentro del orden jurídico o fuera de él, ya que la implementación de la GIRH y su enfoque participativo debería estar logrando algún nivel de institucionalización de las diferencias en intereses y la convergencia hacia los objetivos generales de la gestión del agua.

Kloster presenta las distintas tácticas de lucha que encuentra desde su propia codificación en los tres años que compara. Aquí interesa resaltar entre el empleo de distintos repertorios de acción, los cuales son “un conjunto limitado de rutinas aprendidas, compartidas y actuadas a través de un proceso de elección relativamente deliberado... son creaciones culturales aprendidas, pero no descienden de la filosofía abstracta ni toman forma como resultado de la propaganda política, sino que surgen de la lucha. Es en la protesta donde la gente aprende a romper ventanas, atacar presos sujetos al cepo, derribar casas deshonradas, escenificar marchas públicas, hacer peticiones, mantener reuniones formales u organizar asociaciones de intereses especiales” (Tilly, 2002, pp. 31-32). En esto es fundamental diferenciar aquellos repertorios donde se recurre a hechos físicos incluyendo los actos de violencia, de aquellos que sólo son reclamos verbales o denuncias escritas. De acuerdo a Tarrow, la acción directa es la realización auto-organizada de una iniciativa individual o grupal, enfocada en dar respuestas puntuales a situaciones concretas, o para la creación

de condiciones más favorables, usando los medios disponibles.

**Tabla 1.** Tácticas de lucha, 1990-2010 (%)

	1990	2000	2010
Realiza acción directa (acción judicial, acción de protesta como bloqueos, manifestaciones, rechazo al pago)	21.9	54.9	54.2
Ejerce presión (solicitud, rechazo, reclamo, denuncia, demanda)	74.5	26.5	20.9
Expresa inconformidad (queja, crítica, advertencia –verbal o escrita-)	1.4	18.6	25.0
Otros	2.2	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Kloster, 2016, p.60

En la tabla anterior se muestra el cambio significativo en los repertorios de acción, al más que duplicarse el empleo de las acciones directas respecto a otras formas, como el ejercer presión, que se reduce significativamente. Esto nos permite suponer que existe un proceso de polarización en las expresiones de acción colectiva en los movimientos sociales, ya que se expande la inconformidad, como también las acciones directas que implican una confrontación con las autoridades del agua. Kloster deduce de esto la existencia de un proceso de politización del agua, en los que los problemas relativos a la escasez del agua se dejan de concebir como naturales, y se convierten en algo social, provocando conflicto como parte de su construcción en asunto público (Vargas et al, 2012: 11-20).

La politización de cualquier situación social pasa por su definición, evaluación y categorización como justa o injusta, así como su caracterización en términos de factibilidad para ser alterada o preservada de acuerdo a las necesidades, intereses y capacidades para actuar de los individuos o actores colectivos involucrados. La politización es un proceso de generación de sentido, de aumentarle una dimensión política a prácticas y ámbitos que no lo tenían o de generación de nuevas prácticas; es cargarle de sentido político a las cosas. El antagonismo implica un nivel variable de confrontación y conflicto, a través de la lucha que llevan a cabo de acuerdo a su apreciación de la situación social. Toda lucha implica un proceso de organización e identificación de los involucrados para ejercer poder y lograr una decisión o acción pública, que puede alterar o persistir su relación de subordinación social y autonomía en cuanto a manejo su relación con el agua o en conjunto como grupo social.

La politización de la gestión del agua se puede caracterizar a través de los principales recursos a los que recurren los actores sociales y gubernamentales para que se lleve a cabo una acción pública.

En cada etapa del ciclo de escalamiento o desescalamiento de los conflictos por el agua, podría suponerse que cambian los repertorios de acción. Esto significaría que en momentos de escalamiento recurrirían a acciones directas y en el desescalamiento a acciones de presión e inconformidad. Sin embargo, tomando 1990 como año base en términos de número de eventos registrados y su composición, es también factible conjeturar que lo que aquí aparece es más bien un cambio estructural en el régimen de gestión, en tanto tendencialmente hay un desplazamiento del tipo de acción como también de quienes más se movilizan. Kloster afirma que los conflictos están centrados en la toma de decisiones, el modelo de gestión a seguir, las formas en que se distribuyen el recurso escaso y las soluciones. Estos hay que enmarcarlos en que los problemas en torno a las políticas de distribución y de gestión de riesgos son los que van en aumento, sobre todo entre 2000 y 2010. Asimismo, en un contexto más amplio, la relación clientelar-corporativa característica del Estado mexicano durante décadas se ha reducido, por lo que se podría sospechar un proceso de ciudadanía de la política del agua (Kloster, 2016: pp. 75-76).

**Tabla 2.** Identidades sociales en lucha, 1990-2010 (%)

	1990	2000	2010
Indígenas	0	2	6
Partidos Políticos	6	2	0
Agricultores, Empresas, Productores	9	13	9
ONG y agrupaciones de lucha	20	5	16
Representaciones vecinales	21	9	6
Vecinos	29	41	31
Autoridades Gobiernos	15	28	32
Total	100	100	100

Fuente: Kloster, 2016, pp. 110-112

Kloster analiza a los sujetos sociales que son enunciados en los eventos registrados. En su clasificación es posible advertir (Tabla 2) cambios importantes de quienes se están movilizando y actúan públicamente. En primer lugar, los indígenas quienes no aparecen en 1990 y para 2010 ya representan el 10% de menciones. Las luchas de los pueblos indígenas no son principalmente de carácter ciudadano, sino comunitario en defensa de su territorio hídrico (Boelens et al, 2016). Este sector de la sociedad mexicana es caracterizado por concentrar la pobreza y exclusión social, así como estar involucrados en los mayores proyectos de trasvase. La otra tendencia importante es el de la actuación de las autoridades gubernamentales, en donde no diferencia entre nivel federal estatal o local,

pero muestra un constante incremento porcentual. Los vecinos son aquellos sujetos identificados en tanto hablan o denuncian desde el ámbito local, sin ninguna identidad organizativa. Estos pasan de 29% en 1990, a 41% en 2000, y 31% en 2010 (2016:111-112). Los otros grupos sociales identificados son partidos políticos, agricultores, empresas, ONG y representantes vecinales.

Kloster no proporciona desglosada por año las formas de lucha de cada una de las identidades sociales analizadas, pero provee los datos agrupados de todo el período. Las identidades sociales más

activas son las ONGs y agrupaciones de lucha con el 50.2% de sus acciones directas, y los indígenas con 45.7%. Las ONGs y agrupaciones de lucha son más proclives a las medidas de presión, como son las exigencias o rechazo de la política pública, así como los recursos que movilizan en el conflicto son mayores y más diversos. Esto provoca que más allá de la declaración, hayan desarrollado distintas formas de presión y de presentación ante los medios de comunicación de los problemas públicos del

agua, representando un 35%, en tanto que los indígenas sólo el 14.3%. Los otros sectores sociales resaltan por recurrir más a las medidas de presión.

**Tabla 3.** Formas de lucha de las identidades sociales, (%)

	Acciones directas	Presión	Declaración	Otras	Total
Autoridades Gobiernos	51.4	36.2	11.5	0.9	100
ONG y agrupaciones de lucha	50.2	35.0	12.8	2.0	100
Indígenas	45.7	14.3	40.0	0.0	100
Agricultores, Empresas, Productores	36.6	49.0	13.8	0.6	100
Representaciones vecinales	31.7	57.6	9.3	1.4	100
Vecinos	29.7	55.5	14.4	0.0	100
Partidos Políticos	29.7	64.1	3.1	3.1	100
<b>Total</b>	<b>39.4</b>	<b>46.8</b>	<b>11.8</b>	<b>2.0</b>	<b>100</b>

Fuente: Kloster, 2016, pp. 115-117

Los movimientos sociales los hay de todos los tipos y tamaños, presentan una tremenda variedad de formas. Para atrapar de alguna manera esta clase heterogénea de fenómenos hace falta algún tipo de tipología. Ésta puede construirse por medio de diversos criterios. Una forma es a partir de las diferentes identidades sociales involucradas en las acciones directas, las que permiten visualizar dos tipos de movimientos sociales por el agua: los movimientos ciudadanos y los movimientos comunitarios. Ambos tipos no se contraponen, aunque no coincidan en el tipo de acciones y recursos que movilizan, incluso es reiterado encontrar conflictos de carácter local con base en organizaciones comunitarias que inician su lucha por el agua, y cuando logran cierta notoriedad pública, ONGs y otras organizaciones con activistas ajenos a las comunidades se vinculan a su lucha, generalmente cambiando tanto las tácticas como la estrategia. En otros casos conforman coaliciones sobre la base de puntos en común, pero en otros se contraponen entre ellos, o bien con los grupos de interés y presión, partidos políticos y otras organizaciones que también se involucran.

La implementación de la GIRH supondría la creación de vías de expresión de la diversidad de interés en torno al agua, con un enfoque de cuenca, y la constitución de las instancias apropiadas para la institucionalización de los conflictos en torno al agua. Sin embargo, se muestra una tendencia hacia la polarización, la

consolidación de sectores sociales con repertorios de acción basados en las acciones directas, en tanto no ven resueltos sus intereses y prevalece su percepción de injusticia hídrica. Esto se expresó claramente en el análisis que hicieron los académicos y organizaciones respecto a la propuesta de una nueva Ley General del Agua en 2015, organizados en la Coordinadora Nacional Agua para Tod@s Agua para la Vida, donde se manifestó el dilema al que se enfrenta actualmente la gestión del agua: mayores facilidades para la inversión privada en la solución de los problemas de abastecimiento urbano (principalmente) a través de mayores intervenciones en el ciclo hidrológico por medio de trasvases e infraestructuras, o la solución vía la participación social y el consenso con la diversidad social y de intereses que caracterizan a la mayoría de las unidades hidrológicas del país, asumiendo estrictamente la pretensión de limitar el desarrollo económico a la disponibilidad de agua en las regiones e incorporando en el arreglo institucional a las distintas formas de gestión social del agua, caracterizadas por su funcionamiento en el plano local.

#### 4. CONCLUSIONES

Después de más de tres décadas de iniciada la implementación de la GIRH, como la formulación integradora de la mayoría de las recomendaciones que promueven los organismos internacionales para frenar el deterioro hidrológico en el mundo,



es evidente su desgaste en cuanto a los aspectos de participación social, al menos en México. La incorporación de sus principios en las políticas hídricas nacionales de muchos países generó un optimismo excesivo que dio origen a numerosas publicaciones y trabajos académicos al respecto. Ahora se extienden distintas críticas y posiciones que perciben a la GIRH con duda (Saravan et al, 2009).

En cada país, los grupos de interés, las organizaciones de la sociedad civil y las hidrocracias locales han interpretado los mandatos de la GIRH a su manera, a la de su régimen de gestión del agua. Sin embargo, pasar de un modo de gestión del recurso con base en la construcción de infraestructura para garantizar la oferta de agua para el crecimiento, a otro centrado en las políticas de distribución del recurso, incorporando la preocupación por la seguridad hídrica futura, asumiendo ciertos principios de sostenibilidad a largo plazo y con base en la gobernanza del agua propuesta desde la nueva gestión pública del agua, es algo que todavía se encuentra en proceso, que no es fácil ante una tradición centralizadora de la gestión del agua en el gobierno federal. Una de las dimensiones que siempre resultarán de las más problemáticas para abordar es la de la autoregulación de la sociedad respecto a su intervención en el ciclo hidrológico, la cual resulta actualmente, en el antropoceno, la principal fuerza transformadora del ambiente en el planeta. Esta autoregulación solo será posible a partir de la acción pública, punto de encuentro entre las acciones gubernamentales con las acciones sociales, lo que implica inevitablemente tanto la confrontación como la construcción de consenso. Los conflictos generados por los movimientos sociales son entonces una de las fuerzas de cambio a los cuales deben de responder desde sus particularidades cada arreglo institucional.

En las últimas dos décadas se han extendido los estudios sobre los cambios socioambientales vinculados con el agua y el cambio climático. A pesar del intenso contenido teórico en varias explicaciones acerca de los conflictos ambientales, aplicables al ámbito del agua, un número significativo de estudios sobre conflictos por agua están marcados por lo que Mussetta (2010) señala como los *estudios de caso pobres teóricamente*, en los cuales se asume una caracterización monográfica-descriptiva de las etapas, actores y estrategias de los involucrados en el conflicto, a veces muy detallados pero comúnmente vinculados a las posiciones gubernamentales o de ONG's con un contenido enunciativo de una posición normativa, como son los derechos humanos, la justicia hídrica o la democracia; el segundo bloque lo identifica como *algunos enfoques dominantes*, los que repiten perspectivas ya probadas pero limitadas, las cuales generalmente se quedan en una visión disciplinaria, sin abordar lo que precisamente se constituye en la complejidad de los estudios de agua y ambientales, la necesidad de vincular los procesos sociales con los procesos biofísicos.

La información disponible permite percibir el ciclo de protesta por el agua, con el nivel de representatividad que proporcionan los medios hemerográficos nacionales. Esto significa que la magnitud e intensidad de los conflictos locales por el agua quedan excluidos del análisis, pero no por eso son menos importantes, ya que la conflictividad difusa en torno al agua puede estar ya generando un exceso de demandas sociales sobre la gestión gubernamental del agua en el ámbito local. Teniendo como línea base 1990, se puede afirmar que los problemas del agua se convirtieron en un asunto público más relevante en las últimas dos décadas, produciendo por lo tanto mayor número de conflictos. Además, como los muestra la investigación de Kloster (2016), estos no sólo son más públicos y, probablemente más en cantidad, sino más intensos en términos del tipo de acciones que despliegan los involucrados. Esto se puede asociar con el desarrollo del modelo de gestión del agua en el país, la GIRH, pero aún más con el régimen de gestión del agua. Lo que se desarrolla en realidad son las formas concretas en que se organiza la gestión del agua 'en terreno', no los principios generales, que son por definición abstractos. Se muestra claramente que existen dos tipos de movimientos sociales por el agua, y sobre ambos, nos atrevemos a aseverar, mantienen un fuerte cuestionamiento a la autoridad del agua, en parte por su decepción respecto al modelo participativo que la misma OECD reconoce (2013). El escenario próximo es de intensa disputa por la aprobación de la Ley General del Agua, y seguramente por las políticas de redistribución del agua mediante trasvases y transferencias.

Los movimientos por el agua, tanto los de carácter comunitario como social, están expresando una radicalización de las formas de lucha y la ampliación de sus repertorios de acción. Kloster (2016:145-146) afirma que se está traspasando un contexto de confrontación de un Estado garante y posibilitador de la ampliación del estatus ciudadano a una acción directa cada vez más representativa de una lucha en la cual se desplaza la posibilidad estatal en favor del uso de acciones de oposición, obstrucción o despliegue de fuerza, en busca de una alternativa para encontrar más equidad ante el problema del agua percibido. Si bien, como aclara en su análisis Kloster, están más extendidas las acciones directas, estas no son homogéneas. Es por esto que lo que parece ocurrir es la "pérdida de los canales tradicionales de negociación", antes que la construcción de nuevos, y esto en sentido de gobernabilidad y gobernanza del agua en México, va contra lo que discursivamente se han fijado las autoridades federales como propósito de la GIRH. Es claro que esto no sólo depende de los responsables de la gestión gubernamental del agua, pero refleja la evaluación que socialmente se está haciendo del manejo de los recursos hídricos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberti, G. & Villena Higuera, J.L. (coord.). 2014. Movimientos e instituciones y la calidad de la democracia. Análisis de casos en América Latina y la unión europea. Ediciones Octaedro, Barcelona, p. 240.
- Ávila, P. 2007. El manejo del agua en territorios indígenas en México. Banco Mundial, Departamento de México y Colombia, Región de Latinoamérica y el Caribe, México, p. 108. (Serie del Agua en México, vol. 4).
- Azuela, A. & Mussetta, P. 2009. "Algo más que el ambiente. Conflictos sociales en tres áreas naturales protegidas de México", *Revista de Ciencias Sociales* N° 16, Universidad Nacional de Quilmes.
- Bazán Pérez, C. I. y Suárez Lastra, M.. 2014. Propuesta metodológica para detectar patrones geográficos de conflictos por el agua en el estado de Morelos, 2000-2010. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, 84: 69-80. DOI: 10.14350/ig.37877
- Biswas, A. K. 2004. Integrated Water Resources Management: A Reassessment. *Water International*, Vol. 29, 2: 248–256.
- Bizberg, I. 2010. Una Democracia Vacía. Sociedad civil, movimientos sociales y democracia, pp. 21-60, en Bizberg, I. & Zapata, F., coord. Movimientos sociales. México: El Colegio de México. (Col. Los grandes problemas de México, VI)
- Boelens, R., Hoogesteger J., Swyngedouw, E., Vos, J. & Wester. Ph. 2016. Hydrosocial territories: a political ecology perspective. *Water International*,: 1-14, DOI:10.1080/02508060.2016.1134898
- Butterworth, Warner, J., Moriarty, P., Smits, S. & Batchelor, C. 2010. Finding practical approaches to Integrated Water Resources Management. *Water Alternatives* 3(1), pp. 68-81.
- Cabrero Mendoza, E. 2005. Acción pública y desarrollo local. Fondo de Cultura Económica, México, p. 447.
- Calderón Gutiérrez, F. (coord.). 2012. La protesta social en América Latina. Siglo XXI Editores, Buenos Aires, p. 318. (Cuaderno de Prospectiva Política 1).
- Conagua. 2016. Estadísticas del Agua en México, edición 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional del Agua, México, p. 282.
- Descola, P. 2017. ¿Humano, demasiado humano? *Desacatos* 54, 16-27.
- Dourojeanni, A. 1994. La gestión del agua y las cuencas en América Latina. *Revista de la Cepal*, 53: 11-128.
- García, E. 2004. Medio ambiente y sociedad. La civilización industrial y los límites del planeta. Alianza Editorial, Madrid.
- Gómez Fuentes, A.C. 2015. Redes y movimientos sociales en contra de la construcción de presas en México. El caso del Movimiento Mexicano de Afectados por las Presas y en Defensa de los Ríos. *Revista Espaço Acadêmico* 14: 5–15.
- González Reynoso, A. 2016. La región hidropolitana de la ciudad de México. Conflicto gubernamental y social por los trasvases Lerma y Cutzamala. Instituto Mora, México, p.188.
- Hajer, M. 1995. The Politics of Environmental Discourse: Ecological Modernization and the Policy Process. Clarendon Press, Oxford, UK, p.352.
- Hannigan, J.A., 2006. Environmental sociology, 2nd ed. Routledge, New York, USA, p.194.
- Heynen, N. & Van Sant, L. 2014. Political ecologies of activism and direct action politics, pp. 169-178. En T. Perreault, G. Bridge y J. McCarthy. *The Routledge Handbook of Political Ecology*. Routledge, Nueva York.
- Homer-Dixon, Th. F. 1996. Environmental scarcity, mass violence, and the limits to ingenuity. *Current History* 95. November, pp. 359-365.
- Homer-Dixon, Th. F. 1999. Environment, Scarcity, and Violence. Princeton University Press, Princeton, NJ, p.247.
- Ibarra, P. 2005. Manual de sociedad civil y movimientos sociales. Síntesis, Madrid.
- IMTA, 1991. Agua y sociedad. Tendencias. números 0,1,2,3, Subcoordinación de Participación Social-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- IMTA. 2015. Proyecto Observatorio de conflictos por el agua en México CP1407.1. Informe Final. Subcoordinación de Participación Social-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- Inglehart, R. 1991. El cambio cultural en las sociedades industriales avanzadas. CIS-SigloXXI, Madrid, p.539.
- Kloster, K. 2016. Las luchas por el agua (1990-2010). Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México: 172.
- Lascoumes, P. & Le Gales, P. 2014. Sociología de la acción pública. El Colegio de México, México, p.141.
- Latinobarómetro. 2010. Informe Latinobarómetro, Corporación Latinobarómetro, Santiago de Chile.
- Latinobarómetro. 2016. Informe Latinobarómetro, Corporación Latinobarómetro, Santiago de Chile.
- Le Billon, Ph. 2015. Environmental conflict, pp. 598-608. En Perreault, T., Bridge, G. & McCarthy, J. *The*

- Routledge Handbook of Political Ecology. Routledge, Nueva York.
- Leff, Enrique. 2014. The power-full distribution of knowledge in political ecology: a view from the South, pp.64-75. En T. Perreault, G. Bridge y J. McCarthy. The Routledge Handbook of Political Ecology. Routledge, Nueva York.
- Linton, J. & Budds J. 2014. The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum* 57:170-180.
- Modonesi, M. 2016. El principio antagonista, marxismo y acción política. Itaca-UNAM, México.
- Molle, F. 2008. Nirvana concepts, narratives and policy models: Insight from the water sector. *Water Alternatives* 1(1): 131-156
- Molle, F., Wester, P. & Hirsch, P. 2010. River basin closure: Processes, implications and responses. *Agricultural Water Management* 97: 569-577.
- Mollinga, P.P. 2014. Canal irrigation and the hydrosocial cycle. The morphogenesis of contested water control in the Tungabhadra Left Bank Canal, South India. *Geoforum*, 57: 192-204.
- Mussetta, P. 2009. Participación y gobernanza. El modelo de gobierno del agua en México. *Espacios Públicos* 25: 66-84.
- Mussetta P. 2010. Los Conflictos por Agua en América Latina. México: CEPI-ITAM. (Documento de trabajo, 23).
- OECD. 2013. Making Water Reform Happen in Mexico. OECD Studies on Water, OECD Publishing. DOI:10.1787/9789264187894-en
- Peet, R. & Watts, M. eds. 2004. Liberation Ecologies: Environment, Development, Social Movements, 2nd ed. London: Routledge.
- Peña, F. J., Herrera, E. & Granados, E. 2010. Pueblos indígenas, agua local y conflictos: 455-478. En B. Jiménez Cisneros, M. L. Torregrosa, L. Aboites. El agua en México: cauces y encauces. Academia Mexicana de Ciencias, México.
- Perló Cohen, E. & A. González. 2005. ¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudios sobre las relaciones hidráulicas en el Distrito Federal y el Estado de México. Coordinación de Humanidades, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad-UNAM, Fundación Friedrich Ebert Stiftung, México.
- Rodríguez Araujo, O. 2009. México ¿un nuevo régimen político? Siglo XXI, México.
- Roth, D., Boelens, R & Zwartveen, M. 2015. Property, legal pluralism, and water rights: the critical analysis of water governance and the politics of recognizing local rights. *The Journal of Legal Pluralism and Unofficial Law*, 47:3, pp. 456-475, Doi:10.1080/07329113.2015.1111502
- Sainz, J. y & Becerra, M. 2003. Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica* 67, pp. 61-68.
- Saravanan, V. S., McDonald, G.T. & Mollinga, P.P. 2009. Critical review of Integrated Water Resources Management: Moving beyond polarised discourse. *Natural Resources Forum* 33: 76-86.
- Sztompka, P. 1995. Sociología del cambio social. Alianza Ed., Madrid. (Col. Universidad Textos, 153).
- Swyngedouw, E. 2004. Social power and the urbanization of water. *Flows of power*. Oxford University Press, New York, p.228.
- Swyngedouw, E. 2009. The Political Economy and Political Ecology of the Hydro-Social Cycle, *Journal of Contemporary Water Research & Education*, issue 142, pp. 56-60.
- Tamas, P. s.f. Water Resource Scarcity and Conflict: Review of Applicable Indicators and Systems of Reference, UNESCO-IHP, Paris: 29 (PCCP series, 21). Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001333/133307e.pdf>
- Tarrow, S. 2009. El poder en movimiento. Los movimientos sociales, la acción colectiva y la política. Alianza Editorial, Madrid.
- Tilly, C. 2002. Repertorios de acción contestataria en Gran Bretaña: 1758-1834, pp.17-47. En Mark Traugott, Protesta social: repertorios y ciclos de la acción colectiva. Editorial Hacer, Barcelona.
- Touraine, A., 2000. ¿Qué es la democracia? FCE, México.
- Treffner J., Mioc, V. & Wegerich, K. 2010. A-Z Glossary, pp. 215-320, en The politics of water. A survey / Wegerich, Kai, Jeroen Warner, eds. Londres: Routledge.
- van der Molen, I. & Hildering, A. 2005. Water: cause for conflict or co-operation? *ISYP Journal on Science and World Affairs* 1(2): 133-143.
- Vargas, S. & Mollard, E. (ed.) 2005. Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. IMTA-Institut de Recherche pour le Développement, Jiutepec, Morelos, p. 385.
- Vargas, S., E. Mollard, A. Güitrón (coord.) 2012. Los conflictos por el agua en México: caracterización y prospectiva. Conamexphi-IMTA-UAEM, México, p. 288.
- Wester, P. 2008. Shedding the Waters: Institutional change and water control in the Lerma-Chapala Basin, Mexico. Thesis for PhD. Wageningen University.
- Wester, P., S. Vargas, E. Mollard y P. Silva. 2008. Negotiating Surface Water Allocations to Achieve a Soft Landing in the Closed Lerma-Chapala Basin, Mexico. *International Journal of Water Resources Development*, Vol.24(2): 275-288.



## LÍNEAS DE RIBERA, RIESGO HÍDRICO Y GIRH. CASO DEL RÍO QUEMQUEMTREU EN EL BOLSÓN, PROV. DE RÍO NEGRO, ARGENTINA

### RIVER BANK LINES, WATER RISK AND IWRM. QUEMQUEMTREU RIVER CASE IN EL BOLSÓN, PROV. OF RÍO NEGRO, ARGENTINA

Nini, Martín<sup>1</sup>; Lozeco, Cristóbal<sup>2</sup>; Petri, Daniel<sup>1</sup>

#### Resumen

La implementación de procesos de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) permite garantizar un desarrollo coordinado de los recursos hídricos y otros recursos asociados. En el caso de la gestión de áreas inundables, se manifiestan diferentes interacciones y conflictos entre los habitantes que viven en lugares próximos o ubican sus viviendas en ellas, y las acciones estructurales y las medidas no estructurales, ejecutadas principalmente por estamentos estatales.

En este marco, la línea de ribera materializa el límite entre la propiedad privada y el dominio público hídrico. A su vez, la definición de zonas de riesgo hídrico permite regular las ocupaciones de los espacios, delimitando zonas con diferentes niveles de protección, con el fin de mitigar los impactos de las inundaciones.

En el río Quemquemtreu, en la localidad de El Bolsón, en una zona montañosa de la provincia de Río Negro, Argentina, el contraste manifiesto entre el desarrollo urbano y las áreas de riesgo hídrico, ha llevado durante mucho tiempo a menoscabar las relaciones de la sociedad con el curso de agua, generando conflictos entre asentamientos en áreas con alto riesgo hídrico y la ejecución de obras de protección contra inundaciones, que a su vez generan una sensación de seguridad ficticia.

En este contexto, en este trabajo se desarrollan lineamientos para la aplicación de las líneas de ribera y riesgo hídrico en el río Quemquemtreu, incluyendo acciones estructurales y medidas no estructurales, que contribuyan a aportar las bases para orientar el ordenamiento territorial de la localidad, en un marco acorde con la visión de la GIRH.

**Palabras Clave:** Línea de Ribera, Riesgo Hídrico, GIRH.

#### Abstract

The implementation of integrated water resources management (IWRM) processes ensures a coordinated development of water resources and other associated resources. In the case of the management of flooded areas, different interactions and conflicts between the inhabitants living in nearby places or their dwellings are manifested, and the structural actions and the non-structural measures, executed mainly by state estates.

In this context, the riverbank line materializes the boundary between private property and the public water domain; and, the definition of zones of water risk, allows to regulate the occupations of the spaces, delimiting zones with different levels of protection, in order to mitigate the impacts of the floods.

In the Quemquemtreu river, in the town of El Bolsón, in a mountainous area of the province of Río Negro, Argentina, the manifest contrast between urban development and areas of water risk has long led to the degrading of society's relations with the water course, generating conflicts between settlements in areas with high water risk and the execution of works of protection against floods, which in turn generate a sense of fictitious security.

In this context, guidelines are developed for the application of the riverside and water risk lines in the Quemquemtreu river, including structural actions and non-structural measures that contribute to provide the bases for orienting the territorial order of the locality, in a framework according to the vision of IWRM.

**Key Words:** Bank Line, Water Hazard, IWRM.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos vinculados al ordenamiento territorial de las áreas costeras de los cursos y cuerpos de agua, y de las costas marinas, son situaciones complejas que deben tener presentes diversas particularidades sociales, económicas, culturales y políticas, como así también realidades físicas y técnicas.

En la localidad de El Bolsón, con unos 20.000 habitantes (Censo INDEC (Instituto Nacional de

Censos de la República Argentina), 2010), ubicada en el sudoeste de la provincia de Río Negro, enmarcada dentro de la cuenca interprovincial del río Azul (Figura 1), se ha generado la ocupación del espacio de manera desordenada a la vera del río Quemquemtreu, producto del avance del entramado urbano formal e informal a partir de ocupaciones progresivas del dominio público hídrico.

1 Departamento Provincial de Aguas de Río Negro, Argentina. nini@dpa.rionegro.gov.ar

2 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

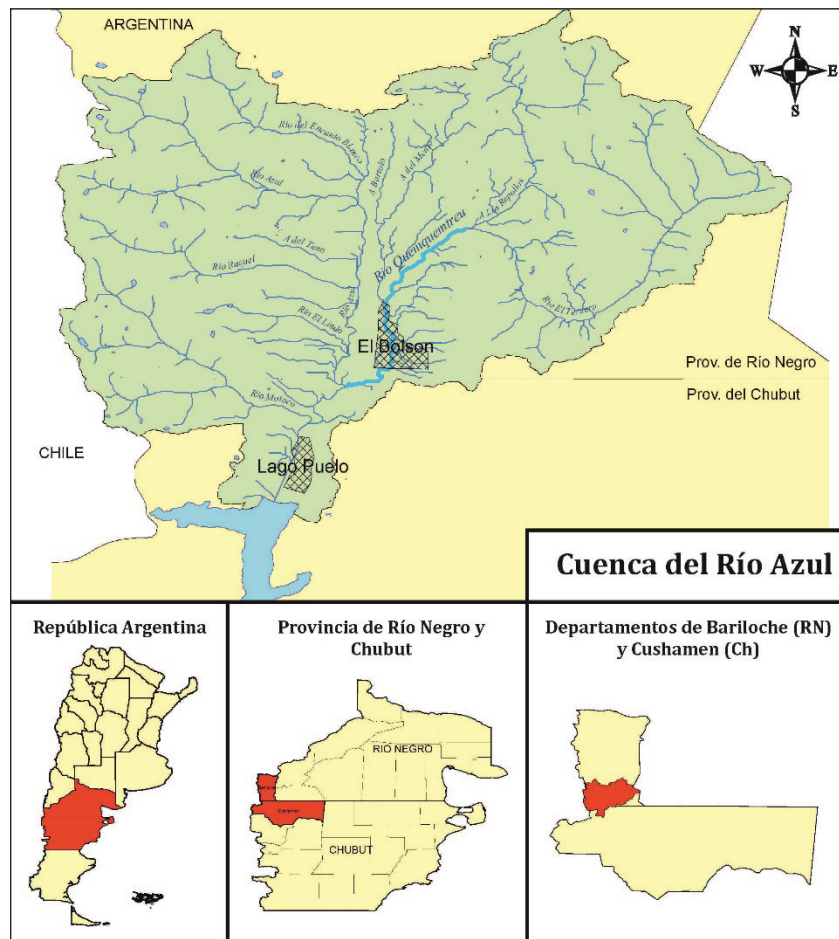


Figura 1. Ubicación área de estudio.

El río Quemquemtreu (río que cuncunea o piedras que hacen ruido al rodar, en idioma mapuche) posee unos 20 km de longitud desde su nacimiento en la confluencia de los ríos El Ternero y Los Repollos,

hasta su desembocadura en el río Azul, y atraviesa de norte a sur la ciudad de El Bolsón en unos 6,5 km de su traza (Figura 2).

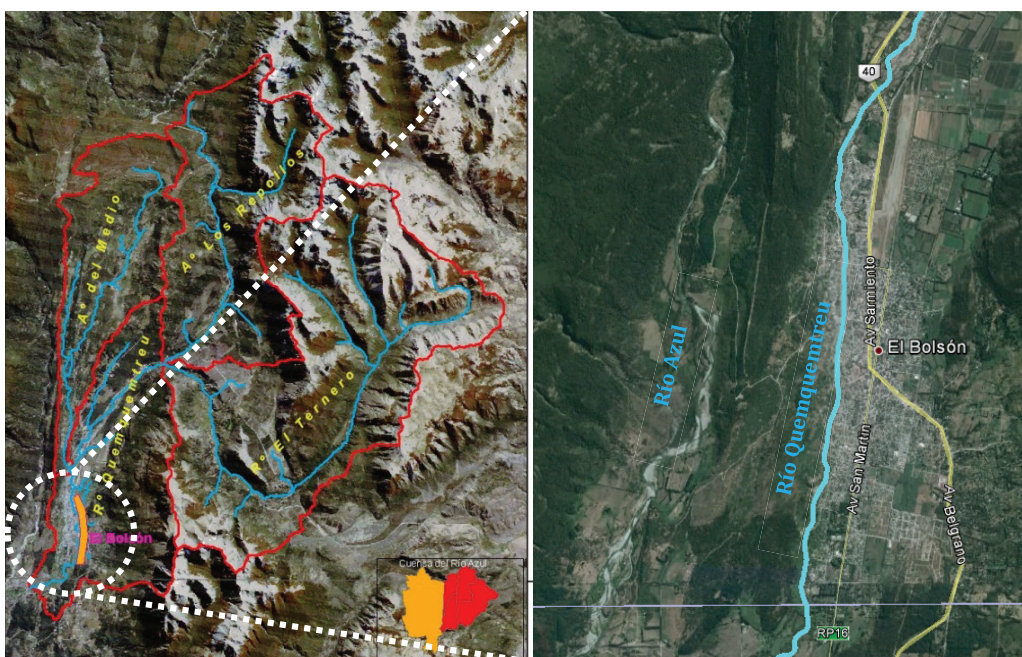


Figura 2. Subcuenca del río Quemquemtreu y detalle del ejido urbano de El Bolsón.

El río Quemquemtreu, con un caudal medio de 9,6 m<sup>3</sup>/s, registra antecedentes en materia de inundaciones en la localidad de El Bolsón, que se remontan a los años 1961, 1969, 1977, 1993, 1997, 1999, 2002, 2004 y 2009, donde la mayor parte de ellas presentan caudales superiores a los 80 m<sup>3</sup>/s, registrando la del año 1997 unas 5.000 personas evacuadas.

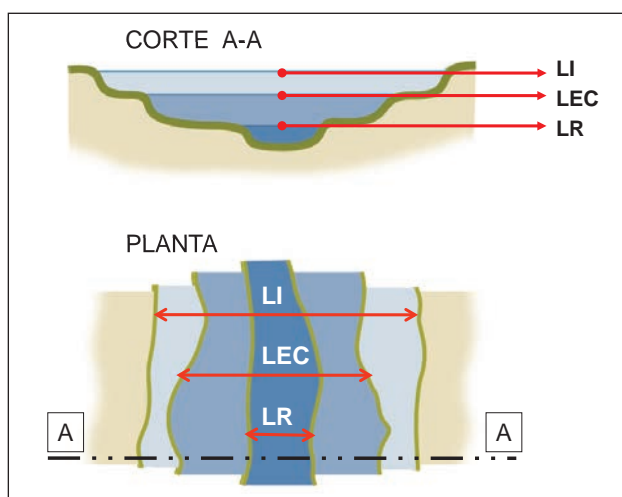
## 2. OBJETIVOS

En el presente trabajo se desarrollan lineamientos para la aplicación de las líneas de ribera (LR) y riesgo hídrico (RH) en el río Quemquemtreu, en El Bolsón, incluyendo las acciones estructurales y medidas no estructurales que contribuyan a aportar las bases para orientar el ordenamiento territorial de la localidad, en un marco acorde con la visión de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).

## 3. MARCO CONCEPTUAL

La GIRH es considerada un proceso sistemático para el desarrollo sostenible, la asignación y el control del uso de los recursos hídricos en el contexto de objetivos sociales, económicos y ambientales (Cap Net, 2008). En el contexto de la GIRH se encuentran los procesos de gestión integrada de crecidas (GIC), con los que se promueve una apropiada combinación de estrategias, puntos y tipos de intervención (estructural y no estructural), a corto y largo plazo, y un enfoque participativo y transparente en cuanto a la toma de decisiones (OMM, 2009).

Una de las principales estrategias para reducir la vulnerabilidad en zonas de riesgo hídrico, especialmente en áreas urbanas, es la determinación de las LR y RH.



**Figura 3.** Ubicación esquemática de las líneas de ribera (LR), evacuación de crecidas (LEC) e inundación (LI)

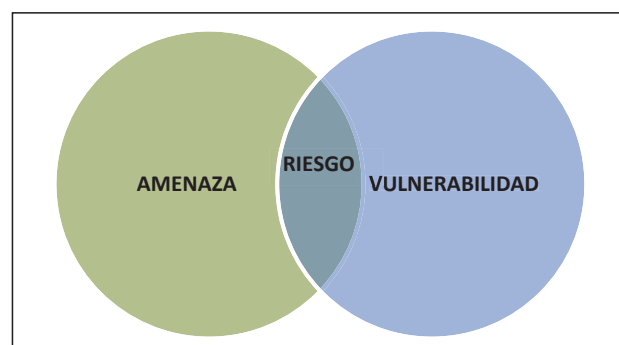
La LR se define como el límite entre la propiedad privada y el dominio público hídrico. Paralelamente,

y asociado a lo anterior, se definen zonas de RH donde se regulan las ocupaciones de los espacios, con el fin mitigar los impactos de las inundaciones (Figura 3).

El riesgo de afectación por inundación, se refiere a la posibilidad que tiene una zona de sufrir afectaciones y daños físicos, económicos, ambientales y sociales. Se trata de un concepto muy amplio que involucra varias dimensiones: la amenaza, el riesgo hidrológico de las lluvias y/o crecidas, y la vulnerabilidad del medio (capacidad de resistir a la amenaza). Ésta a su vez depende de la susceptibilidad propia del área inundada y del riesgo de las obras de protección que puedan existir.

El riesgo hidrológico de la amenaza, es la probabilidad de que se superen determinadas magnitudes del fenómeno considerado: caudal pico, altura máxima, volumen y duración de una crecida o monto e intensidad de lluvia.

A partir de estos conceptos, se deduce que el riesgo de inundación puede aumentar o disminuir por una modificación de la amenaza, de la vulnerabilidad o de ambas (Figura 4).



**Figura 4.** Esquema de definición del riesgo de inundación [PAOLI, 2015]

## 4. MARCO LEGAL

La LR se encuentra definida en el Código Civil, desde el año 1871, como el límite entre el dominio público hídrico y el dominio privado, sea éste de particulares o del estado.

En el estudio multidisciplinario sobre LR y RH (Cano, 1988) se señala que para los cursos de agua superficiales, como ríos y arroyos, el Código Civil refirió indirectamente sus límites a las crecidas ordinarias o *plenissimumflumen*, en cuanto estipula que el río está determinado por la línea a que llegan las más altas aguas en su estado normal.

En las reformas introducidas en el año 1968 no se modificó esta última disposición, pero se introdujo una nueva delimitación, reduciendo el límite del cauce sólo hasta el nivel de la crecida media ordinaria.

Las reformas introducidas en dicho Código en el año 2015, han unificado el criterio definiendo la LR como el "promedio de las máximas crecidas ordinarias", tal como se detalla en los artículos 235° y 1960°.



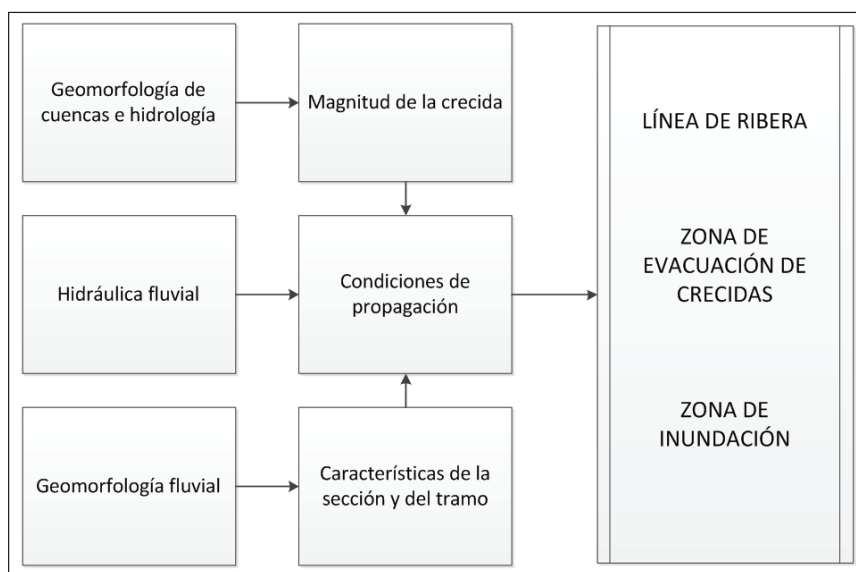
En la provincia de Río Negro, el Código de Aguas (Ley Q N° 2952) otorga competencia al Departamento Provincial de Aguas (DPA) para determinar las LR y RH. Dichas funciones fueron posteriormente reglamentadas por el Decreto N° 1058/05 que establece las pautas técnicas y los procedimientos para su determinación.

La Carta Orgánica Municipal, las ordenanzas emanadas del Consejo Deliberante y las resoluciones del Poder Ejecutivo municipal, expresan la importancia asignada a los recursos hídricos en la convivencia Estado-sociedad en El Bolsón, definiendo cuestiones que se relacionan tanto a la protección ambiental como al ordenamiento territorial de las áreas próximas al río Quemquemtreu.

### Aspectos Geomorfológicos, Hidrológicos e Hidráulicos

La delimitación de las LR y RH requiere de tres fases de estudio: la determinación de las características morfológicas del medio físico, la determinación de las crecidas de diseño a utilizar y el replanteo de los perfiles hídricos de dichas crecidas sobre el medio físico (Figura 5).

Se debe tener presente que el análisis de cada caso de estudio presentará particularidades, donde en algunos casos la magnitud de la crecida no alcanza para representar completamente las características hidráulicas del tramo en estudio, y donde tomarán mayor preponderancia las características geomorfológicas del curso de agua.



**Figura 5.** Procedimientos globales para la determinación de la LR y RH. (Adaptado de CANO, 1988 y PAOLI, 2015 y 2016)

Con relación a los valores de caudal definidos para el caso del río Quemquemtreu, en El Bolsón se estableció un valor de 151 m<sup>3</sup>/s para la LR con una recurrencia de 25 años, que define la “crecida media ordinaria” en este tramo del río, priorizando cuestiones propias de su geomorfología fluvial.

### Identificación de Actores

La complejidad de las estructuras sociales actuales en la localidad de El Bolsón hace necesario identificar los actores claves involucrados en la problemática. En este marco, se aplicó el Análisis Social CLIP (colaboración/conflicto, legitimidad, intereses, poder) para caracterizar los principales actores institucionales y sociales, y sus relaciones (Figura 6). De las diferentes situaciones de conflicto que surgen de las relaciones entre los distintos actores, hay varias que resaltan por su relevancia en cuanto a situaciones de RH de las personas, y las complejidades propias de la implementación de la LR en zonas donde existen ocupaciones del dominio público hídrico (DPH).

Las relaciones entre DPA – Municipalidad – Consejo Deliberante pueden definirse como cambiantes. Su dinamismo político, en ocasiones, dificulta el sostenimiento y unificación de criterios, y la implementación de políticas sobre dichas áreas.

La delimitación de la LR y su posterior replanteo en campo a través de mensuras administrativas, determinó vastos sectores donde se identifican ocupaciones con viviendas de diferentes tipos, algunas precarias y otras con buenas estructuras. La mayoría de ellas cuentan con energía eléctrica, pero no han accedido a los servicios de cloacas ni de gas natural, por las trabas administrativas determinadas por el hecho de estar ocupando el DPH. En estos casos se generan reclamos de los pobladores, que involucran a la Municipalidad como primer receptor, y desde ésta hacia el DPA, en muchos casos con solicitud de “correr” o mover la línea de ribera definida, para tratar de resolver los conflictos relacionados con los servicios, desconociendo el RH bajo el cual se encuentran.

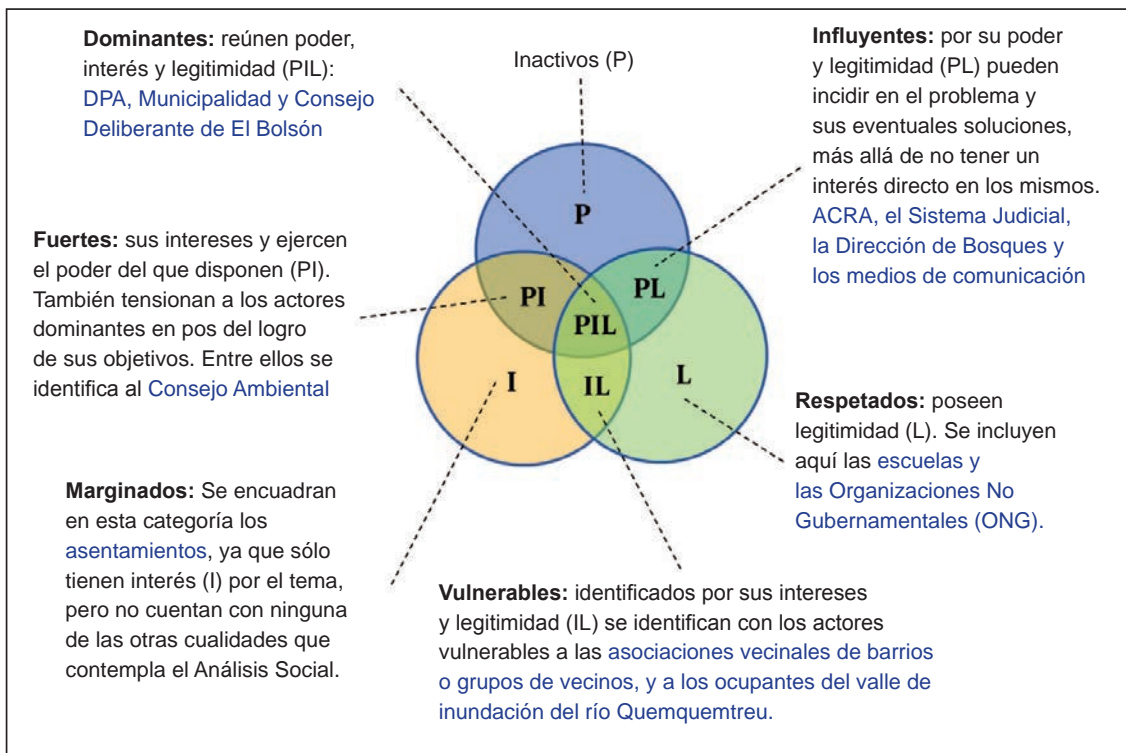


Figura 6. Categorías y actores identificados (adaptado de LOZECO, 2013)

En este mismo orden de conflictos en relación al acceso a los servicios, existen sectores que, si bien se encuentran fuera del DPH, son linderos al mismo. En estos casos, desde el punto de vista administrativo, no es posible que pueda generarse una calle en la conformación catastral, a pesar que esté materializada dentro de las áreas definidas por la LR. Esto genera reclamos por parte de los pobladores que no pueden acceder a servicios básicos ante la Municipalidad, y de ésta ante el DPA, para que se implementen medidas de ordenamiento territorial en estos sectores que permitan destrabar el conflicto.

Debe tenerse en cuenta que la ejecución de obras para la provisión de servicios, beneficiará no solamente a las parcelas linderas al DPH, sino que además pondrá dichos servicios frente a las parcelas ubicadas dentro de la LR. Es por ello que se necesita del compromiso de las instituciones intervinientes (Municipalidad y prestadores de servicio) para que las ocupaciones dentro del DPH no sean provistas de servicios. Estas ocupaciones siguen sucediendo en áreas donde no existen acciones de mejoramiento del cauce y sus riberas, aunque también se detectan sectores donde se han ubicado sobre los terraplenes de defensa.

Las ocupaciones en general comienzan con la construcción de una platea de hormigón sobre la cual se levanta luego una casilla de madera. A través de acciones interinstitucionales coordinadas (DPA – Municipalidad – Fiscal – Fuerza pública) se ha logrado en ocasiones desarticular su continuidad, removiendo las instalaciones; y en otras, mediante medidas de “no innovar” por parte de

un juez, impedir la continuidad de los trabajos. Estas acciones requieren de la detección temprana de los asentamientos para que la actuación sea efectiva.

En sectores donde los pobladores ribereños han realizado acciones de mejoramiento de las costas del río, o tienen conciencia de su valor ambiental, ante intentos de nuevos asentamientos en la costa del río, accionan intentando disuadir, o denunciando ante las autoridades para su no concreción. Esto genera muchas veces situaciones de tensión entre los pobladores que presentan posiciones contrapuestas en cuanto a la ocupación de los espacios de DPH.

El Consejo Ambiental tiene relaciones cambiantes tanto con el ejecutivo municipal como con el Consejo Deliberante, ya que su función es evaluar el impacto ambiental de los proyectos que se pretenden ejecutar en el ejido urbano de la localidad. En algunos casos la no coincidencia de criterios en las políticas que se pretenden aplicar, determina situaciones de enfrentamiento en las que resulta difícil encontrar soluciones consensuadas. Una situación similar se presenta con las ONG locales, con la salvedad que su opinión ante determinadas problemáticas no es vinculante.

Tal como se detalló, las ocupaciones del DPH se han mantenido en el tiempo, aunque actualmente en forma aislada, pero no se vislumbra que dejen de ocurrir, tanto por la necesidad habitacional de las personas de menores recursos económicos, como por la falta de intervención del estado mediante obras de mejoramiento y por las escasas acciones de la comunidad para apropiarse de dichos espacios para actividades de esparcimiento.

**Medidas No Estructurales y Acciones Estructurales**

Se han identificado medidas y acciones implementadas en el área de estudio, que han tenido un impacto positivo en relación a la reducción de la vulnerabilidad, pero que son insuficientes a la luz de situaciones de riesgo aún no resueltas. A continuación se detallan medidas y acciones en desarrollo y propuestas que contribuyan a orientar el ordenamiento territorial de la localidad, en un marco acorde con la visión de la GIRH.

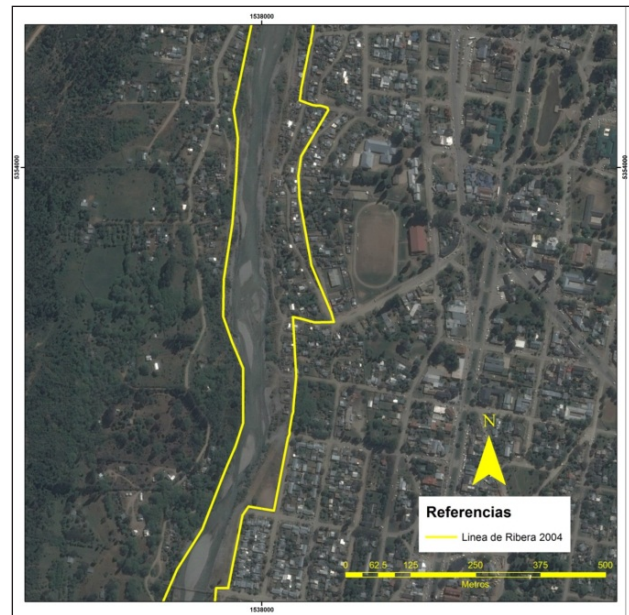
**Medidas y acciones en desarrollo**

Entre las principales medidas no estructurales se resaltan las definiciones de la LR y RH para toda la traza del río Quemquemtreu (Resolución N° 1333/05 y N° 888/13) (Figura 7), la reubicación de 190 familias a zonas sin RH, la implementación de mensuras administrativas para el deslinde del DPH, las ordenanzas emanadas del Concejo Deliberante municipal, la implementación de la ley de bosques nativos (Ley Nac. N° 26.331 y Ley Prov. N° 4.452) como medidas regulatorias de protección de los bosques de la cuenca, y la implementación de programas educativos específicos en relación a la temática del agua y del RH (“El agua va a la escuela”).

En cuanto a acciones estructurales, se han ejecutado diversas intervenciones en el cauce a lo largo del tiempo, con resultados dispares, como son las obras de defensa y espigones, el manejo de áridos dentro del cauce, y el proyecto de intervención de la costanera.

Este última se identifica como una obra de alto impacto social, y aunque se ha desarrollado un plan de intervención integral (ESQUEMAA, 2004), su ejecución se ha realizado sólo en un sector de unos 350 m de longitud por 15 m de ancho sobre la margen izquierda del río, a modo de intervención piloto como parque lineal. Estas tareas en gran parte fueron ejecutadas a partir de convenios de cooperación con instituciones que realizaban aportes de mano

de obra, de maquinarias, o económicos para la adquisición de materiales (Figura 8).



**Figura 7.** Detalle de delimitación de la línea de ribera en el tramo Puente Ruta Nac. N° 40 – Paralelo 42°.

Dado el éxito de esta experiencia, diferentes grupos de vecinos se han sumado para replicar esta iniciativa. Es por ello que a partir de la sanción de la Ordenanza Municipal N° 038/13, se autoriza a los vecinos del autodenominado “Grupo de vecinos ribereños Costanera sur y 36 viviendas”, a instalar elementos para la recreación y esparcimiento de los ciudadanos, y realizar su mantenimiento y conservación.

Dichas acciones fueron llevadas adelante durante el mes de septiembre de 2014 a través del apoyo de diferentes instituciones, y a la labor de los vecinos, que organizaron una jornada de trabajo convocando a los habitantes de la localidad para el mejoramiento del espacio público (Figura 9).



**Figura 8.** Detalle del proyecto integral de intervención (ESQUEMAA, 2004) y desarrollo de actividades sociales en las zonas parquizadas (22/08/2014)





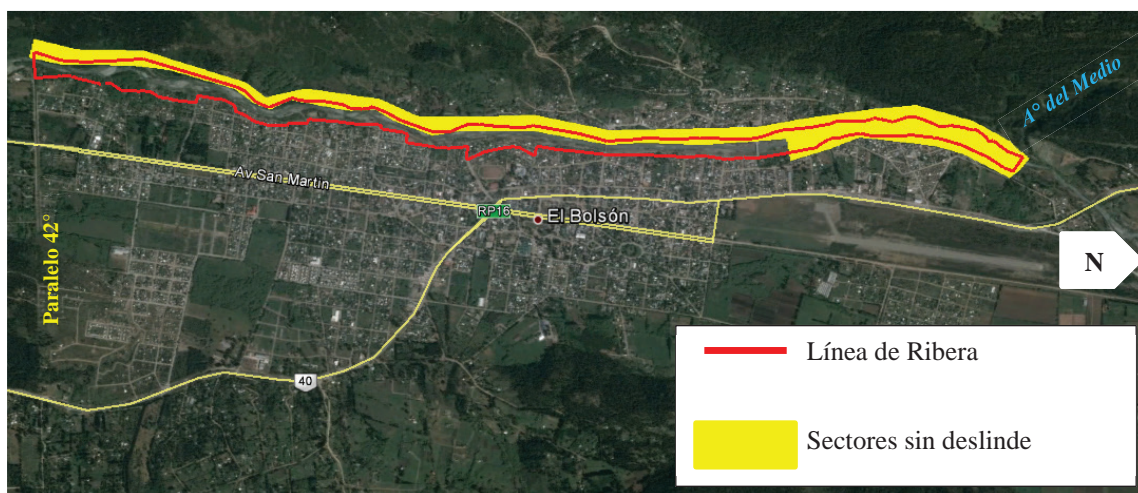
**Figura 9.** Sector intervenido por vecinos de la localidad (31/10/2014)

### Medidas y Acciones propuestas

Todas las medidas y acciones deben pensarse dentro un plan de gestión integral de las crecidas, ya que el enfoque parcial en la búsqueda de soluciones, no generará los efectos esperados. Si bien varias de las propuestas se centran en la continuidad, profundización e integración de medidas y acciones en ejecución, otras surgen de la identificación de necesidades y cambio en el paradigma de la gestión de las áreas definidas por las LR y RH.

Entre las medidas se destacan: las gestiones administrativas para optimizar el ordenamiento territorial, desarrollando una reglamentación específica en relación al RH a partir de la adopción de una cota de fundación para las construcciones que se ubiquen por fuera de la línea de evacuación de crecidas (que en el tramo urbano, desde el puente de

la ruta nacional N° 40 hasta el paralelo 42°, coincide con la LR); continuar con el deslinde administrativo en los tramos faltantes, ya que esto permite mejorar el ordenamiento territorial y la planificación urbana en las zonas costeras (Figura 10); ordenar sectores conflictivos mediante la figura administrativa del Permiso de Uso del Dominio Público Hídrico, mediante la cual se puede gestionar el uso de determinados espacios dentro del DPH; la implementación de un SIG como herramienta fundamental para la gestión del territorio; la ampliación del programa educativo “El agua va a la escuela”, que se implementa en todas las escuelas primarias de la localidad, a fin de incluir la temática específica del RH en el trabajo curricular; el desarrollo de un plan comunicaciones y de acciones de participación de la sociedad; el desarrollo de un plan de contingencias; y el desarrollo de un plan de gestión de crecidas en la cuenca.



**Figura 10.** Detalle de sectores en el río Quemquemtreu donde a la fecha no se ha realizado el deslinde administrativo de la Línea de Ribera.

Entre las Acciones se destacan: la realización de planes de vivienda para la relocalización de la población, cuya implementación tiene su complejidades, tanto técnicas como sociales, y deberá llevarse adelante de acuerdo a una adecuada planificación; el desarrollo del proyecto costanero contemplando el esquema de parque lineal, considerando la integración de las obras con el tejido urbano; y la generación de intervenciones tanto en

la cuenca como en el cauce, considerando acciones como revegetación de áreas degradadas, ejecución de obras transversales sobre torrentes y/o cauces menores, planificar las actividades productivas – extractivas en relación a los bosques, y obras específicas de control de la erosión lateral mediante obras, manejo del material depositado en el cauce, y manejo de la vegetación forestal existente en el cauce y en las márgenes.

## 5. CONCLUSIONES

La determinación y delimitación de las LR y RH se visualiza como una acción estratégica en el proceso de ordenamiento territorial de las áreas costeras de los cursos y cuerpos de agua en general, dentro del marco de la GIRH y de la GIC, integrando acciones estructurales y medidas no estructurales, y asegurando un enfoque participativo de la sociedad.

La determinación del caudal para las LR y RH en el río Quemquemtreu pone de manifiesto la necesidad de evaluar aspectos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, diferenciando el tramo urbano del rural, lo que reafirma algunas críticas planteadas al acotamiento metodológico que impone en este tema el nuevo Código Civil.

Es posible advertir que no existe una adecuada interacción y articulación entre las distintas instituciones involucradas en la problemática, principalmente entre el DPA, la Municipalidad y el Concejo Deliberante, en la implementación de políticas de ordenamiento territorial sobre las áreas de DPH y RH de El Bolsón.

Se vislumbra que el proceso de crecimiento demográfico de la localidad, y los problemas de acceso a vivienda, puede generar mayores presiones sobre las áreas de RH, agravando los conflictos existentes. En este sentido, se detectaron amplios sectores ocupados con viviendas dentro del DPH, donde los pobladores allí instalados reclaman por el acceso a servicios públicos.

Las obras que mayor impacto positivo revelan son aquellas que otorgan cierto grado de protección para la sociedad, que embellecen las zonas ribereñas y que además brindan un espacio público para esparcimiento. En este sentido, la extensión del

parque lineal se identifica como una acción muy positiva, considerando la integración de las obras con el tejido urbano.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cap-Net 2008. "Manual de capacitación. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos para organizaciones de cuencas fluviales". Red Internacional para el Desarrollo de Capacidades en la Gestión de los Recursos Hídricos.

Cano, G. 1988. "Estudio sobre línea de ribera. Informe Final. 3 Volúmenes". Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires.

ESQUEMAA (Arquitectos Asociados) 2004. "Recuperación de la ribera del río Quemquemtreu y diseño de parque público".

Lozeco, C. 2013 "Desarrollo de un esquema de gestión integrada para los colectores de drenajes de la ciudad de Cipolletti (Río Negro, Argentina). Tesis para obtener el grado de Magíster en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) 2009. "Gestión Integrada de Crecientes. Documento Conceptual". OMM N° 1047. OMM – GWP – PAGC. Ginebra, Suiza. ISBN 978-92-63-31047-7.

Paoli, C.U. 2015. "Gestión integrada de Crecidas. Guía y casos de estudio" FICH-UNL; RALCEA; Joint Research Centre. European Commission. Report EUR 27493 ES. ISBN 978-92-79-52198-0 (PDF).

## ESCENARIOS HIDROLÓGICOS FLUCTUANTES EN UNA REGIÓN HÚMEDA Y SU RELACIÓN CON LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

### FLUCTUATING HYDROLOGICAL SCENARIOS IN A HUMID REGION AND ITS RELATION TO WATER AVAILABILITY

Hämmerly, Rosana<sup>1</sup>; Cristanchi, María A.<sup>2</sup>; Cristina, Ignacio M.<sup>1</sup>; Basán Nickisch, Mario<sup>3</sup> y Valiente, Miguel<sup>4</sup>

#### Resumen

Las actividades productivas vinculadas al desarrollo de cualquier región siempre están ligadas a la disponibilidad de agua. Tener acceso a la misma en el momento requerido resulta clave para concretar un crecimiento sostenible. Las necesidades para agua potable, riego, ganadería, industrias y otros usos, podrían ser satisfechas en la medida que el agua, ya sea superficial o subterránea esté disponible, pueda aprovecharse, sea de calidad y cantidad suficiente y se suministre con equidad.

En Argentina una tercera parte del país es húmedo y subhúmedo, sin embargo no garantiza satisfacer las demandas durante todos los meses del año. Evaluar la variación espacio temporal de los déficits y excesos hídricos de una región, es el punto de partida de una gestión exitosa que permita revertir los problemas originados por la estacionalidad de las precipitaciones. Esto se logra mediante estudios estadísticos de lluvia y la ubicación de las estaciones, o incluso con el uso de índices que indiquen la estacionalidad en el ciclo anual de las precipitaciones. Existe un conjunto de medidas que se pueden adoptar para mitigar los excesos o déficits de agua. En general son acciones que comprometen al estado, pero también requieren del compromiso de los afectados y las poblaciones, en pos de lograr un manejo eficiente y sustentable del recurso.

El objetivo de esta contribución es poner en evidencia que la vulnerabilidad a la escasez de agua no se limita a las regiones caracterizadas climáticamente como áridas y semiáridas. Se presentan aquí dos casos prácticos en los cuales se requieren medidas estructurales y no estructurales para llevar a cabo una gestión si no exitosa, al menos que cumpla con la demanda primordial del recurso hídrico. Un caso en la provincia de Formosa, donde la cantidad de agua no es suficiente para cubrir la demanda de agua potable a poblaciones y el otro, en la provincia de Santa Fe, donde las pérdidas por falta de agua hacen inviable la actividad ganadera.

**Palabras clave:** variabilidad climática, cosecha de agua, Chaco Húmedo, déficits hídricos.

#### Abstract

The productive activities linked to the development of any region are always connected to the availability of water. Access to it at the right time is the key to achieve sustainable growth. Requirements for drinking water, irrigation, livestock, industries, and other uses could be met if the water, whether surface or underground, is available, can be exploited, is of sufficient quality and quantity, and provided with equity.

In Argentina, a third of the country is humid and sub-humid, however, it does not guarantee to satisfy the demands during all the months of the year. To evaluate the temporal and space variation of the water deficits and excesses of a region, is the starting point of a successful management that allows to revert the problems originated by the seasonality of the precipitations. This is achieved through statistical studies of rainfall and the location of the stations, or even using indexes that indicate the seasonality in the annual rainfall cycle. There are several measures that can be taken to mitigate water excesses or deficits. In general, they are actions that commit the state, but also require the commitment of the affected people and populations, in order to achieve an efficient and sustainable management of the resource.

The aim of this contribution is to show that vulnerability to water scarcity is not limited to climatically characterized regions such as arid and semi-arid. Two practical cases are presented, in which structural and non-structural measures are required to carry out a successful management, or unless the primary demand of the water resource is satisfied. A case in the province of Formosa, where the amount of water is not sufficient to cover the demand for potable water for the populations and the other in the province of Santa Fe, where losses due to lack of water make livestock production unviable.

**Keys Words:** climatic variability, water harvest, Humid Chaco, water deficits

1 Universidad Nacional del Litoral. Argentina. rhammer@fich.unl.edu.ar

2 Comisión Trinacional Río Pilcomayo. Argentina. alejandracristanchi@yahoo.com.ar

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. basannickisch.mario@inta.gob.ar

4 Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. migvaliente@yahoo.com.ar



## 1. INTRODUCCIÓN

Los escenarios de variabilidad climática existen y seguirán presentándose, e incluso en algunos sitios se podrían acentuar según lo expresado por expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Es decir, la ocurrencia de eventos extremos cada vez más severos y más frecuentes. Esto requiere estar preparados para si no mitigar, al menos soportar con el menor impacto negativo en lo social, económico y ambiental.

Analizando las situaciones hídricas medias de Argentina se encuentra que aproximadamente un tercio del país presenta regiones húmedas y sub húmedas. Se podría pensar que en esas regiones la disponibilidad de agua no sería un problema, pero no es realmente así, ya que depende del momento en que esa agua se presenta, y la capacidad de almacenarla o retenerla que se tenga.

En los últimos años, esta región sufre los embates de los excesos y los déficits de agua. Para las situaciones de abundancia de agua las obras de drenaje y saneamiento parecen ser la solución, pero el agua que se evacúa de una zona se dirige a otra que también puede tener situaciones de anegamiento previas y muchas veces lo que se consigue es trasladar el problema desde aguas arriba hacia aguas abajo.

¿Se puede vislumbrar como solución una medida estructural de almacenamiento? Sería lo más correcto, incluso cuando la misma sea temporal, es decir una detención y no una retención del agua, pero lo suficiente como para permitir la evacuación de las áreas aguas abajo hasta el momento de soportar un nuevo escurrimiento llegando incluso atenuado.

No obstante la condición climática general de la zona, se producen situaciones de déficit que son muy severas. Las mismas generan pérdidas económicas y sociales muy importantes. Se considera generalmente que la escasez de agua es debida a una cantidad insuficiente del recurso, consideración que no siempre es correcta, ya que la calidad de agua también condiciona su uso directo. Existen zonas donde las aguas subterráneas suelen presentar elevados niveles salinos, lo que imposibilita su uso para consumo humano e incluso ganadero.

En estos casos, la cosecha de agua también contribuiría a mejorar la situación. Estos sistemas posibilitan almacenar el agua en los períodos que se la dispone y consumirla cuando se la necesita. Asociado a ello los sistemas de cosecha de agua pueden servir para realizar la inyección a los acuíferos, posibilitando que se diluya la salinidad por dilución.

El objetivo de esta contribución es poner en evidencia que la vulnerabilidad a la escasez de agua no se limita a las regiones caracterizadas climáticamente como áridas y semiáridas. Se presentan aquí dos casos prácticos en los cuales se requieren medidas

estructurales y no estructurales para llevar a cabo una gestión si no exitosa, al menos que cumpla con la demanda primordial del recurso hídrico. Un caso en la provincia de Formosa, donde la cantidad de agua, en algunos años, no es suficiente para cubrir la demanda de agua potable poblaciones y el otro, en la provincia de Santa Fe, donde las pérdidas por falta de agua hacen inviable la actividad ganadera (Figura 1).

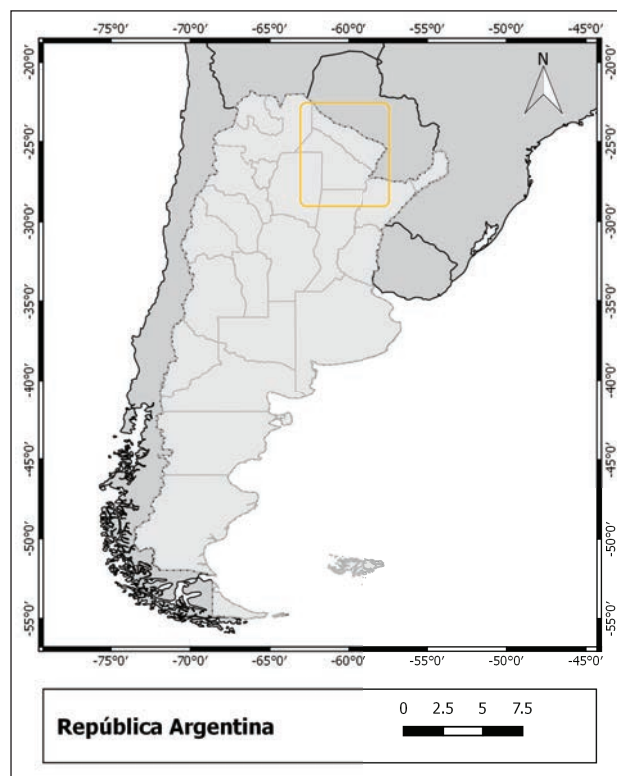


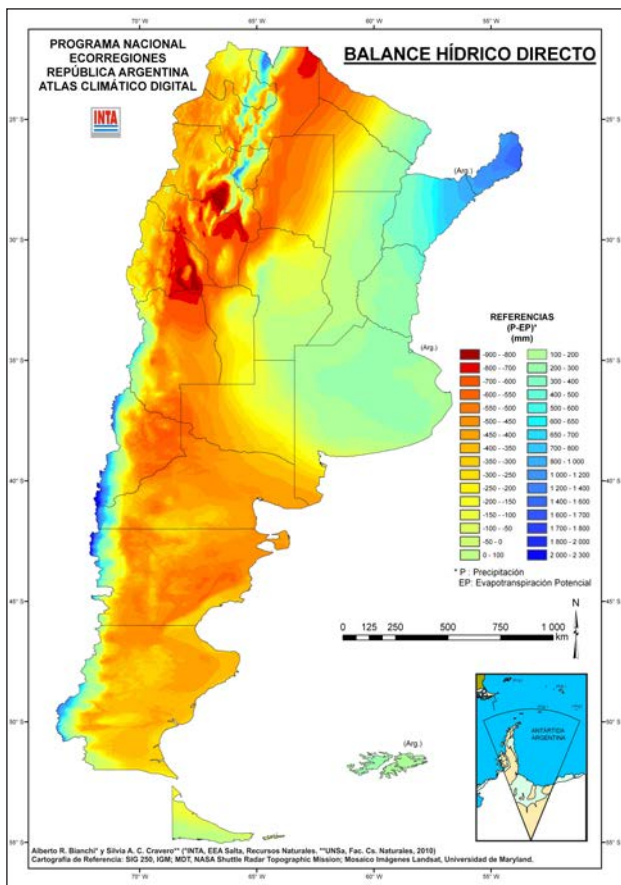
Figura 1. República Argentina. Región de estudio

## 2. ESCENARIOS CLIMÁTICOS

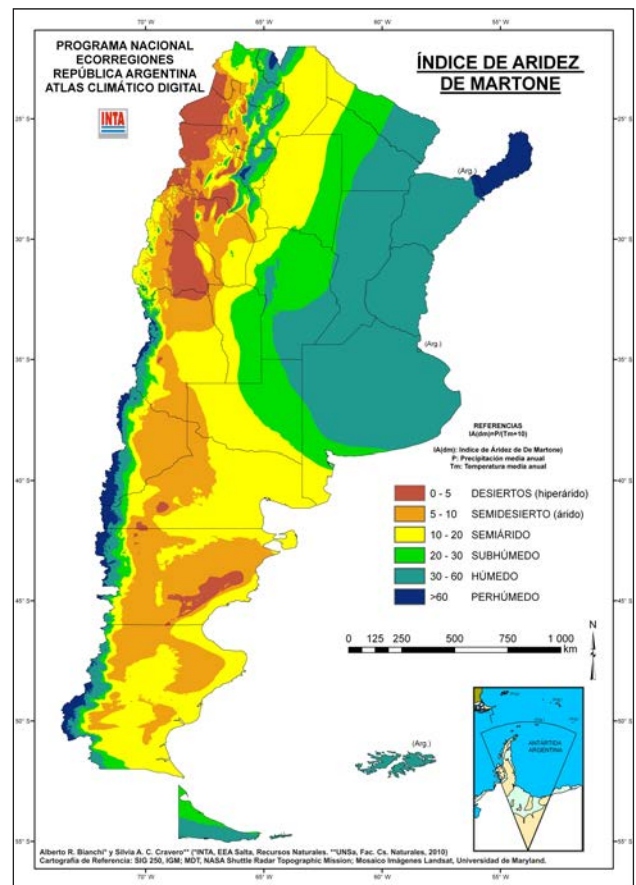
El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ha confeccionado mapas digitales de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) promedios para cada mes y promedios anuales de una serie de 40 años de registros (1960-2000) (INTA, 2010).

De la resta de estos dos mapas anuales se desprende el mapa de balance hídrico directo que se muestra en la Figura 2. Se observa en el mismo que la porción noreste del país y una franja próxima a la cordillera, tiene valores positivos, colores verdes y celestes, resultando mayor la precipitación que la evapotranspiración potencial en términos anuales.

En coincidencia con ello el mapa de aridez del índice de Martone (Figura 3), muestra que la misma porción presenta un régimen húmedo y subhúmedo indicando cantidad de agua suficiente para cubrir demandas. El detalle está en que estos mapas representan valores anuales y cuando se los desagrega mes a mes, la situación puede ser diferente, manifestando la variabilidad intranual de la precipitación.



**Figura 2.** Balance hídrico en Rep. Argentina. (fuente: INTA, 2010)



**Figura 3.** Índice de Aridez de Martone en Rep. Argentina. (fuente: INTA, 2010)

En la zona del centro norte del país, en particular las provincias de Formosa, Chaco y Santa Fe, las características físicas en cuanto al relieve son muy similares, generalmente de escasas pendientes. Pertenecen estas provincias a la región del Gran Chaco Sudamericano (Figura 4). Que a su vez se subdivide en Chaco Seco, al oeste y Chaco Húmedo al este. El Chaco Húmedo u Oriental es una subregión del Gran Chaco que se diferencia del resto por su mayor pluviosidad, lo que genera mayor cantidad de cursos fluviales y humedales, por lo tanto, una flora y fauna distinta a la de otras regiones chaqueñas más secas. Es una extensa región que abarca aproximadamente unos 12 millones de ha. (120.000 km<sup>2</sup>) en el país. Ocupa el centro-noreste de la Argentina (este de las provincias de Formosa y Chaco, norte de Santa Fe), así como la región central de Paraguay.

Se trata de una llanura con pendientes muy suaves en sentido oeste-este del orden de 20 a 40 cm/km, donde predominan ambientes deprimidos. Geomorfológicamente es un bloque hundido, rellenado con sedimentos de los ríos Pilcomayo, Bermejo y Juramento.

El clima es subtropical cálido, con lluvias estivales de entre los 750 y 1.300 mm anuales con un marcado gradiente longitudinal disminuyendo de este a oeste. El período de lluvias se corresponde con la estación cálida, y se concentra durante los meses de octubre a abril. El mínimo de precipitaciones se registra durante la estación invernal, entre los meses de junio a agosto, en los que se presentan sequías y algunas heladas.

Algunas mediciones han provisto datos medios anuales de evaporación que rondan los 1200 a 1300 mm. Este valor es de suma importancia para evaluar las pérdidas de los reservorios (Basán Nisckish y Lahitte, 2011).

El drenaje de la zona se encuentra bien formado. Los ríos Paraguay y Paraná son los que reciben la mayor parte de la humedad. Esta combinación de clima húmedo y bien drenado da lugar a un paisaje con tierras altas que acompañan el curso de los ríos y se alternan con esteros y cañadas. El Chaco húmedo también recibe afluentes provenientes de la Cordillera de los Andes. Los principales ríos son el Pilcomayo, el Bermejo, el Juramento-Salado y el Tafi-Dulce. Cuando estos ríos atraviesan la planicie chaqueña, sus cauces se vuelven inestables.





Figura 4. Gran Chaco en Sudamérica

Fuente: Wikipedia

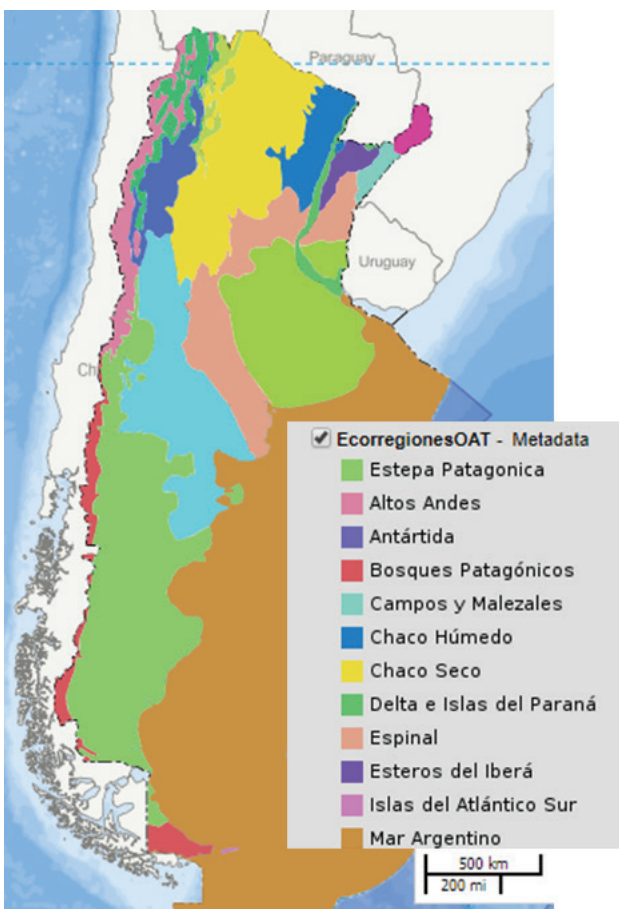


Figura 5. Ecoregiones de Argentina

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable).

### 3. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

Se mencionó anteriormente que en términos anuales la oferta hídrica sería suficiente para cubrir la demanda de la región del Chaco Húmedo. Para aseverar esto, se debe analizar también las precipitaciones mensuales y determinar el comportamiento temporal promedio en el transcurso de un año.

Para el estudio de la variabilidad de las precipitaciones se analizaron 8 estaciones pluviométricas, las

mismas presentan registros mensuales en el periodo de setiembre 1970 a agosto 2010 y están situadas dentro de la región del Gran Chaco descrita precedentemente. Los meses con faltantes de información se completaron mediante técnica estadística de correlación, utilizando el programa CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas, desarrollado por el CEDEX, 2003). La ubicación de las mismas se presenta en la Figura 6.

Las fuentes de información de las precipitaciones fueron el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el INTA. Se le realizó un tratamiento básico, de consistencia y homogeneidad. (Hämmerly, 2012a).

Por su parte las Tablas 1 y 2 presentan los principales estadísticos muestrales y los montos de precipitaciones de cada mes y el anual, promedios de la serie 1970-2010 (Hämmerly, 2012b).

Las Figuras 7 a la 14 corresponden a la representación estadística de fluctuaciones, para cada estación, de las precipitaciones mensuales de la serie 1970-2010.

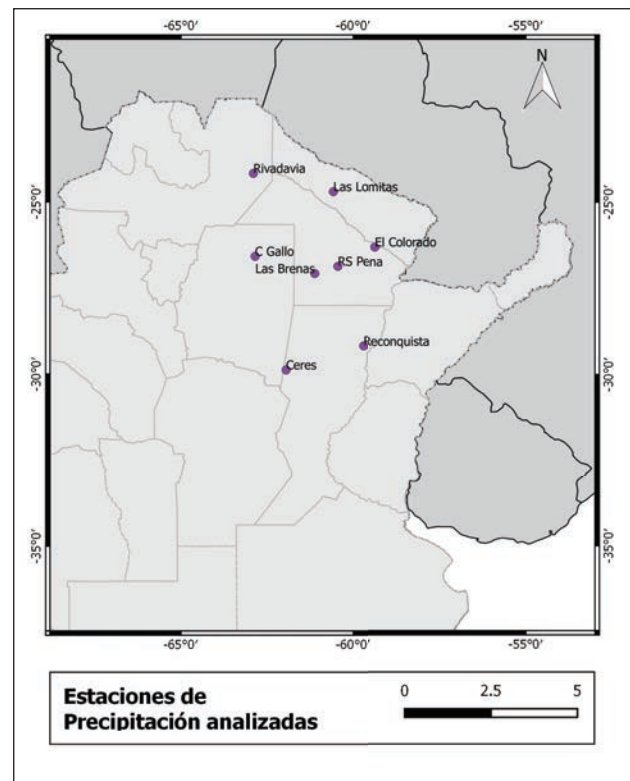


Figura 6. Estaciones pluviométricas analizadas.

Analizando las estaciones situadas en la región para un periodo de 40 años, se encuentran valores de precipitaciones mensuales casi nulos en los meses de junio, julio y agosto. Lo que demuestra la necesidad de satisfacer la demanda de la zona de forma complementaria. Se percibe en los gráficos de las precipitaciones mensuales que la estación El Colorado, situada más hacia el este, posee una distribución más pareja de la lluvia durante el año. En cambio las restantes estaciones presentan marcada estacionalidad.

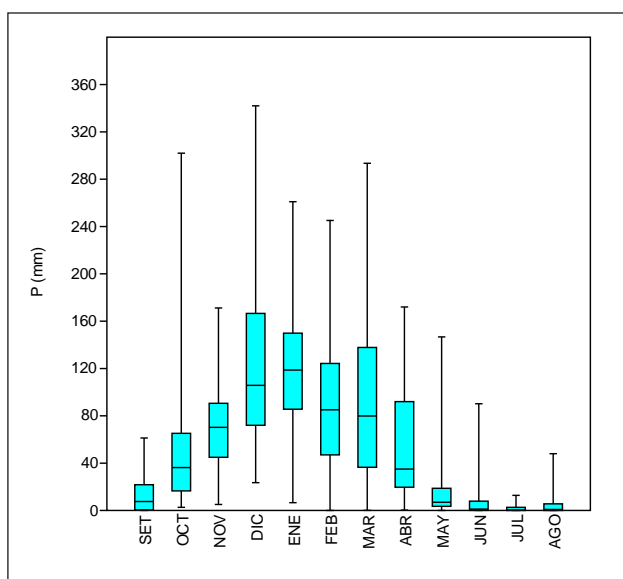


**Tabla 1.** Estadísticos. Precipitación anual. Serie 1970-2010.

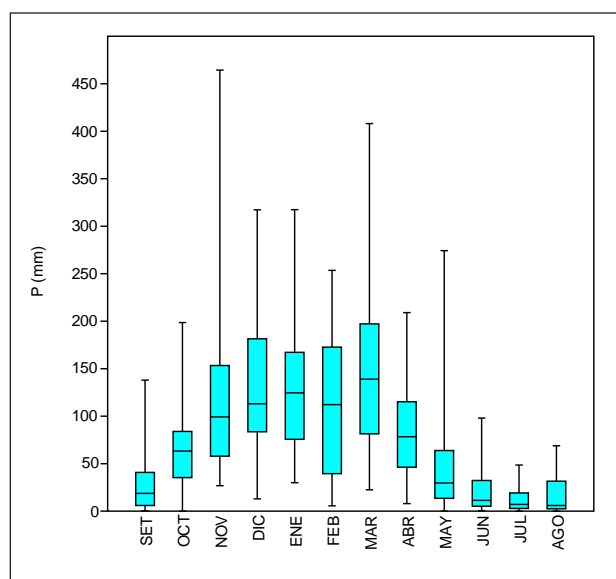
Estación	Media (mm)	Desvío (mm)	CS	CK	CV	Max (mm)	Min (mm)
Rivadavia SMN	642	163.1	0.42	-0.42	0.25	1009	329
Las Lomitas SMN	934	170.6	0.86	1.62	0.18	1422	604
El Colorado INTA	1167	290.7	1	1.51	0.25	2118	768
Campo Gallo INTA	681	183.1	0.78	1.93	0.27	1281	329
Las Breñas INTA	1000	222	0.59	-0.05	0.22	1579	659
R. S. Peña INTA	1011	226.9	0.22	-0.29	0.22	1484	588
Ceres SMN	966	255.2	0.22	-0.43	0.26	1522	477
Reconquista INTA	1260	375	1.09	1.9	0.3	2487	693

**Tabla 2.** Precipitaciones medias anuales y mensuales (mm). Serie 1970-2010.

Estación	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	ANUAL
Rivadavia SMN	13.8	47.5	74.7	120.4	124.1	91.8	87.6	51.2	17.3	7.5	1.9	4.5	642
Las Lomitas SMN	30.0	65.6	117.2	136.5	132.5	114.6	150.6	83.4	52.3	21.2	12.1	17.6	934
El Colorado INTA	52.6	114.4	150.2	145.7	123.5	125.2	138.1	134.1	84.3	40.8	29.1	28.6	1167
Campo Gallo INTA	15.6	40.6	82.9	111.8	135.2	98.8	107.2	57.6	16.9	8.4	3.0	2.9	681
Las Breñas INTA	35.4	81.7	126.0	127.2	147.0	130.0	142.7	118.3	37.3	25.2	14.2	15.5	1000
R. S. Peña INTA	35.9	92.5	125.0	131.4	139.3	112.4	139.0	125.7	47.9	23.3	17.8	20.6	1011
Ceres Aero SMN	42.8	81.1	103.9	139.9	135.5	123.8	156.4	97.8	34.4	21.5	14.4	14.8	966
Reconquista INTA	58.4	125.5	150.9	137.1	135.9	164.4	168.1	157.3	58.1	46.8	29.2	28.5	1260



**Figura 7.** Rivadavia SMN



**Figura 8.** Las Lomitas SMN

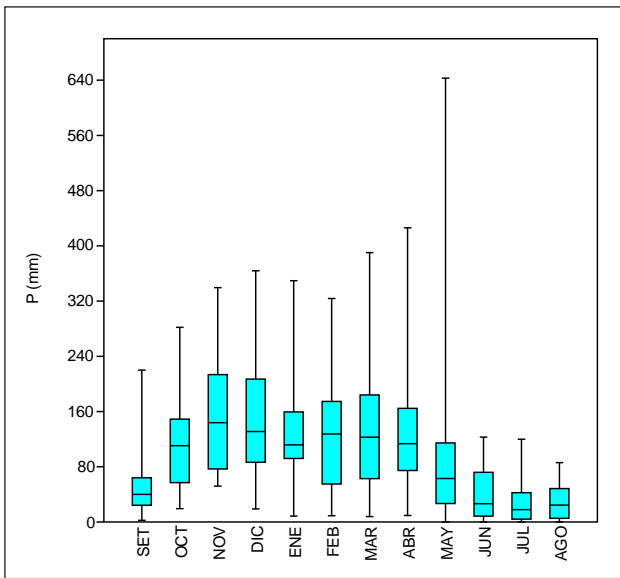


Figura 9. El Colorado INTA

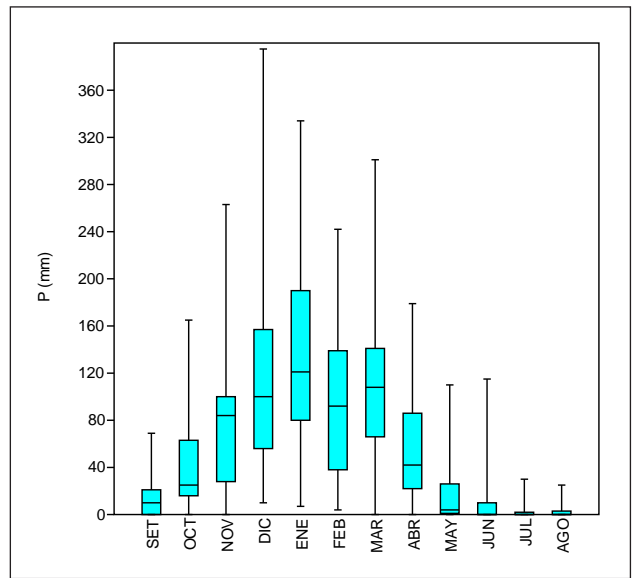


Figura 10. Campo Gallo INTA

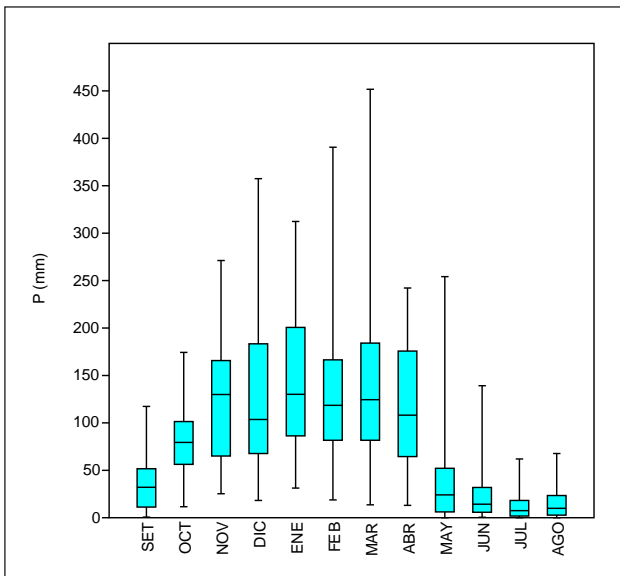


Figura 11. Las Breñas INTA

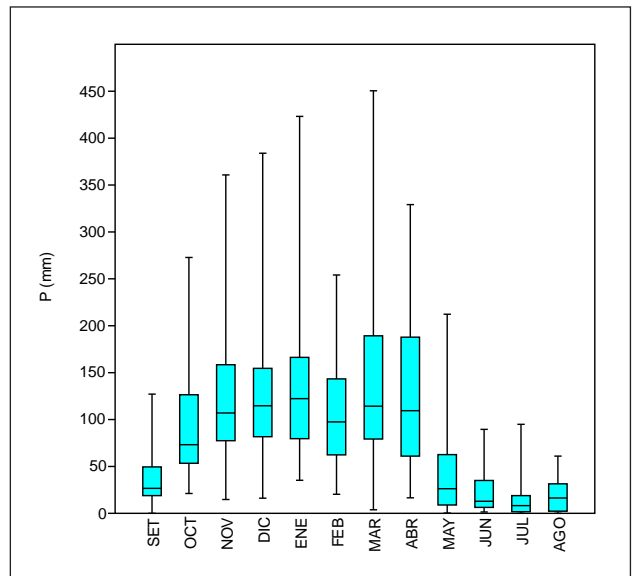


Figura 12. Roque Sáenz Peña INTA

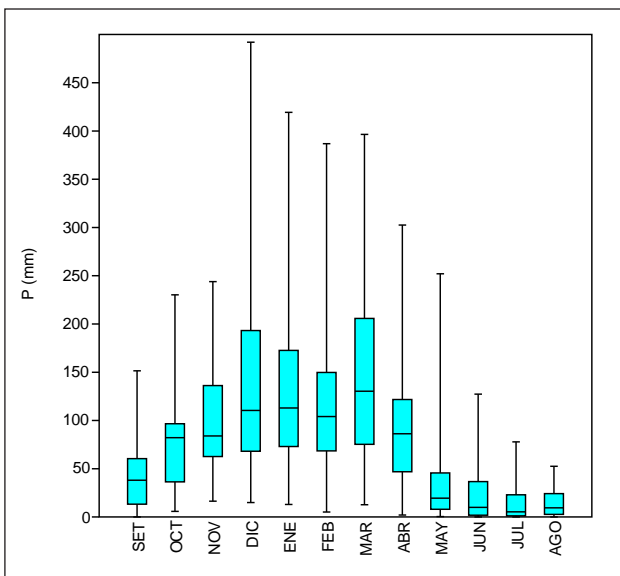


Figura 13. Ceres Aero SMN

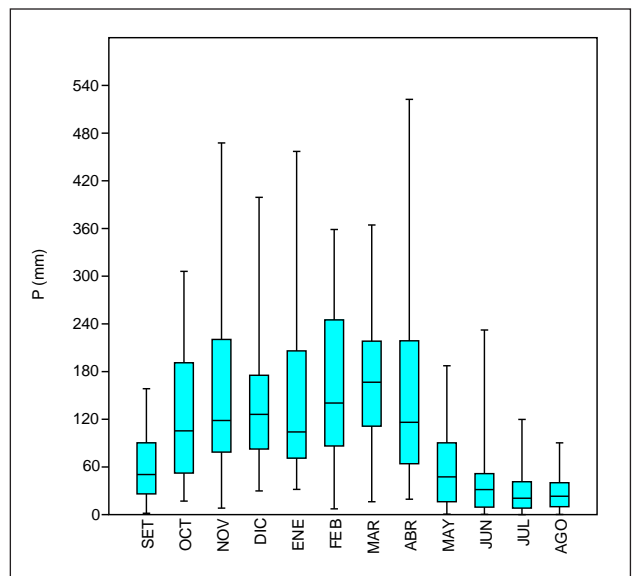


Figura 14. Reconquista INTA

Esta variabilidad estacional se ve confirmada por los Índices de Concentración (IC) de precipitación que se presentan en la Tabla 3 y que se obtienen mediante la suma de la precipitación mensual para los meses consecutivos de mayor precipitación, dividido un tercio de la suma de la precipitación para los nueve meses restantes. Cuando éste índice se encuentra más cercano al valor 1 las precipitaciones se presentan homogéneamente distribuidas a lo largo del año, a medida que se aleja de 1 más estacional es el comportamiento. Índices de concentración mayores a dos indican presencia de estacionalidad. Las estaciones Rivadavia y Campo Gallo presentan valores de Índice de Concentración mayores a 3. El menor índice corresponde a El Colorado que es la estación situada más al este, donde la cercanía con las grandes masas de agua que son los ríos Paraná y Paraguay, atenúan el efecto de variabilidad climática, no llegando este valor a 2. En conclusión la concentración de la precipitación mensual va aumentando de este a oeste.

**Tabla 3.** Índices de concentración de la precipitación. Serie 1970-2010.

Estación	IC
Rivadavia SMN	3.30
Las Lomitas SMN	2.23
El Colorado INTA	1.68
Campo Gallo INTA	3.10
Las Breñas INTA	2.17
R. S. Peña INTA	1.93
Ceres Aero SMN	2.26
Reconquista INTA	1.91

#### 4. CASO DE MITIGACIÓN A LA SEQUÍA EN ZONAS HÚMEDAS: PROVINCIA DE FORMOSA

La provincia de Formosa está ubicada en la zona norte de la República Argentina, ocupa íntegramente el área central del Gran Chaco, perteneciendo el sector este de la provincia al Chaco Húmedo y el oeste al Chaco Seco. Cuenta con abundantes recursos hídricos superficiales como los ríos Bermejo, Paraguay y Pilcomayo, y grandes lagunas y bañados como el emblemático bañado La Estrella, embalse Laguna Yema, laguna La Salada, estero Bellaco y riachos menores, según se puede apreciar en la Figura 15.

Las lluvias y caudales de los cursos de agua presentan una variabilidad temporal significativa, dando lugar a una alternancia de períodos húmedos y secos y a la ocurrencia de crecidas y estiajes severos.

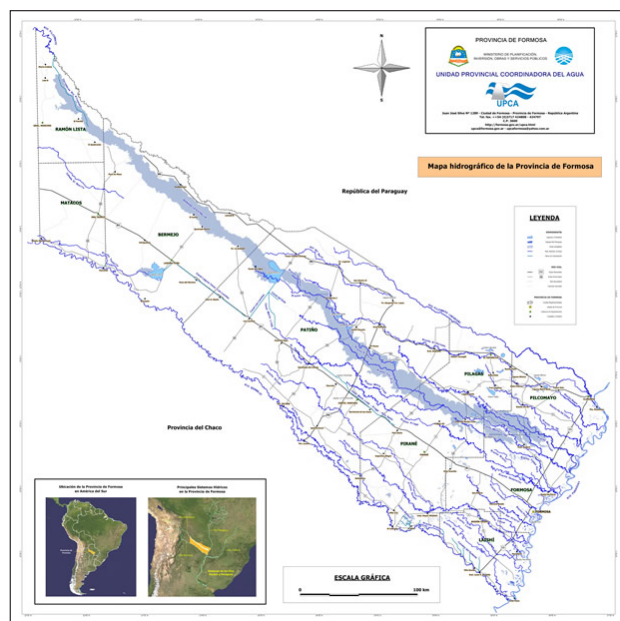
En la Figura 16 se observa que las precipitaciones anuales están en el rango de los 1450 a los 650 mm, decreciendo de este a oeste, mientras que la evapotranspiración potencial varía entre los 1000 a los 1300 mm anuales aproximadamente,

aumentando de este a oeste en contraposición con las precipitaciones.

Esto da un panorama de las características de la provincia, en el sector oeste hay menos precipitación y más Evapotranspiración Potencial (ETP), resultando un balance hídrico deficitario, mientras que en el sector este el balance deficitario se presenta en algunos meses (Figura 17).

Parece contradictorio que una de las provincias con más cursos de agua del país, siendo la mayor parte de su límite norte el río Pilcomayo, su límite este el río Paraguay y su límite sur el río Bermejo, tenga incapacidad de abastecer de agua a sus pobladores y las actividades productivas que desarrollan.

La Tabla 4 resume los más recientes acontecimientos hídricos ocurridos en la provincia, tanto por excesos o déficits. Esta alternancia natural de exceso y déficit condicionan las actividades económicas y de desarrollo en los centros urbanos y rurales, debido a que la infraestructura de la región no está adaptada suficientemente a la variabilidad, lo que lleva a plantear la necesidad de mejorar la capacidad de regulación actual de las lagunas y bañados por medio de nuevas obras y de optimizar la operación de éstas.



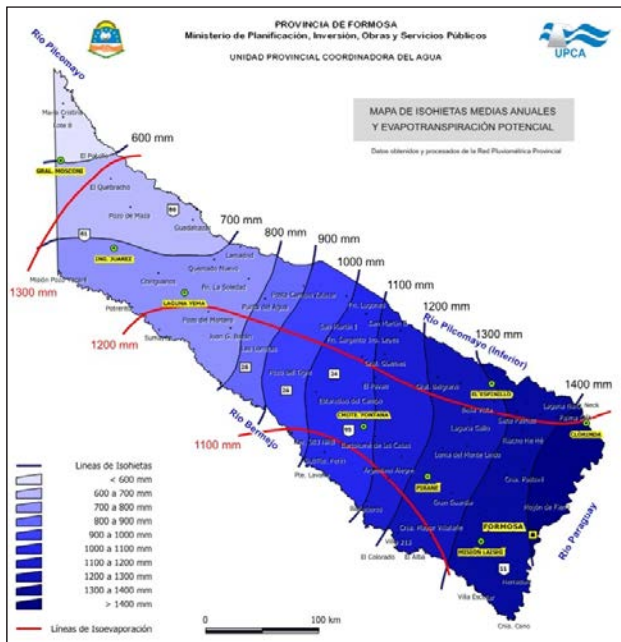
**Figura 15.** Red hidrográfica de la provincia de Formosa. (Fuente: Unidad Provincial Coordinadora del Agua, en Cristanchi, 2015)

Comparando las Figuras 15 y 17, se aprecia que hay agua superficial suficiente, pero que hay meses deficitarios. Se requiere entonces optimizar su uso, para lograr satisfacer las demandas los meses más acuciantes. Sobre este punto Cristanchi (2015) y Cristanchi et al. (2017), presentan un trabajo cuyo objetivo general fue optimizar los recursos hídricos del bañado La Estrella, uno de los cuerpos de agua más importantes de Formosa, a través de la aplicación del Sistema de Soporte de Decisión MIKE HYDRO BASIN. La propuesta consideraba realizar

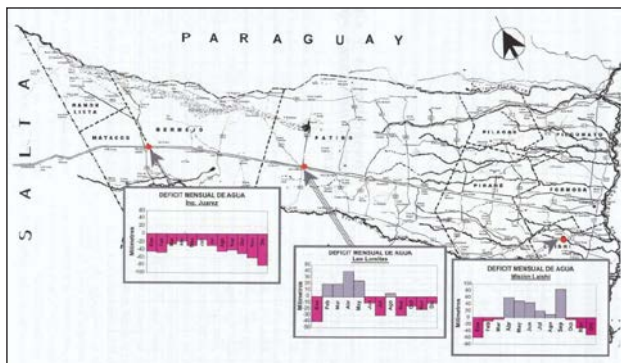


modelaciones con las obras existentes, nuevas obras y políticas de operación de las mismas, de manera tal que la alternancia natural entre excesos y déficits resulte mínima.

Se realizaron modelaciones para escenarios de demanda y obras actuales. Se identificaron entonces los meses críticos donde se presentaba falta de agua en las cinco localidades estudiadas. Un segundo escenario con propuesta de obras menores que permitieran satisfacer las demandas actuales de las poblaciones aprovechando, los meses en que hay agua entre el embalse del bañado y los canales principales de distribución, es decir desde marzo hasta noviembre, para la recarga y almacenamiento de los embalses.



**Figura 16.** Isolíneas de Precipitación y de ETP medias anuales. (Fuente: Unidad Provincial Coordinadora del Agua, en Cristanchi, 2015).



**Figura 17.** Distribuciones de la deficiencia de agua. Fuente: FORMOSA Recursos, Ambiente y Posibilidades para el Desarrollo, en Cristanchi, 2015 ).

Por último se modeló un tercer escenario para una demanda proyectada a 20 años y una propuesta de obra de mayor envergadura que permitan aprovechar

un mayor volumen de agua ofrecido por el bañado La Estrella.

En líneas generales las obras propuestas fueron una ampliación de la capacidad de los reservorios que ya se tenían en la mayoría de las localidades y mejora de la capacidad de conducción de los canales principales del agua desde el bañado, aumento de los depósitos de agua potable e incluso canales de conexión desde los canales principales hasta las plantas de agua potable de las localidades. Con las obras propuestas se atenuó la falta de agua. Se aprecia de este modo que no son necesarias grandes obras inmediatas para paliar las necesidades vinculadas al agua. Sólo se requiere estudios del sistema físico y de la oferta hídrica. Situarlo en el contexto social de usos y demandas, y diseñar medidas estructurales y no estructurales que permiten satisfacer esas demandas.

**5. CASO DE MITIGACIÓN A LA SEQUÍA EN ZONAS HÚMEDAS: PROVINCIA DE SANTA FE**

El otro caso práctico de acción en la zona es la implementación, por parte del gobierno de la provincia de Santa Fe, de Unidades Experimentales de Cosecha de Agua, denominadas UECA, como aportes a los municipios y comunas más perjudicados por la sequía. Se consideran estas UECA, una obra eficaz y de bajo costo, útil para la captación y almacenamiento de agua de lluvia en condiciones de sequía, destinada al abrevado de hacienda, con la intención de que sean de uso comunitario.

Este proyecto permite entre otras cosas:

- La asistencia a pequeños y medianos productores ganaderos, que accedan a constituir sistemas asociativos o comunitarios para la construcción y mantenimiento de estas obras, que posibiliten el abastecimiento de agua a su propia hacienda;
- Difundir y practicar una técnica simple de apoyo a la actividad ganadera, para luego replicarla en otros ámbitos de la provincia
- Movilizar la propia iniciativa de los productores, para la construcción masiva estas obras que introducen un nuevo concepto (natural y económico), de aprovechamiento del agua de lluvia en sus explotaciones.

Para su implementación se firmó en 2009 un Convenio entre el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASPyMA) y la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Regional Reconquista, para construir en la región, cinco Unidades Experimentales de Cosecha de Agua (UECA), como obras comunitarias: el agua almacenada es compartida por varios productores. Han sido financiadas por la provincia, utilizando fondos nacionales de emergencia por sequía. Las mismas revisten un carácter experimental,

**Tabla 4.** Escenarios hídricos más recientes en la provincia de Formosa.

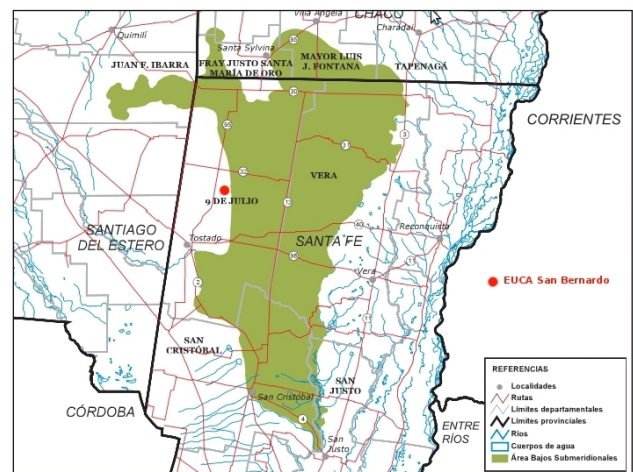
Años	Situación hídrica	Consecuencias
1982/1983/1984	Se registraron las mayores inundaciones en toda Formosa	30.500 evacuados y cuantiosas pérdidas económicas a causa de crecidas en los ríos Bermejo, Paraguay y Pilcomayo
1987 1988	Sequias durante 6 meses Sequias durante 5 meses	Esto incidió en millones de hectáreas afectando la disponibilidad de agua para consumo humano, cultivos, ganados y pasturas, con pérdidas económicas significativas y consecuencias sociales indeseables
2006/2007	Inundaciones debido no sólo a los desbordes de los ríos Bermejo y Pilcomayo como consecuencia de las precipitaciones registradas en las altas cuencas, sino también por las excesivas precipitaciones caídas dentro del territorio provincial	Anegamiento del 30% de la superficie total de la provincia, lo que ha generado la evacuación de las poblaciones ribereñas a los ríos, pérdidas económicas y materiales.
2007/2008	Se registraron grandes valores hidrométricos	La provincia anegada en un 35% de la superficie total.
2008/2009	Sequias durante 8 meses	
2011/2012	Sequías	Grandes pérdidas en los rindes de las cosechas por falta de agua, sobre todo por la evaporación que provocan las altas temperaturas, Los de segunda no se pudieron sembrar. Fuertes implicancias sobre todo económicas y sociales. Afecta al pequeño agricultor, al productor, y a toda la cadena agroindustrial, provocando un círculo vicioso que lleva a la desinversión y a la reducción de la mano de obra.
2012/2013	Sequias durante 6 meses	Pérdidas de cosechas, mortandad de ganado por falta de pasto y de agua. Los molinos, sacaban agua amarga o salada porque las napas se han ido salinizando por la ausencia de lluvias

cuyo objeto además de la provisión de agua a los productores ganaderos asociados, es determinar mediante mediciones sistemáticas (lluvias, niveles hidrométricos, niveles freáticos, volumen de agua extraído), la eficiencia de las parcelas, para optimizar sus diseños y costos.

El sistema propuesto por el MASPyMA fue pensado como un sistema comunitario ganadero, por lo que el desarrollo de un plan de gestión es de suma importancia. Para ello Cristina (2015) y Cristina et al. (2015), proponen pautas para su uso considerando la obras localizada en el Establecimiento “Las Patricias”.

Esta UECA está ubicada dentro de la región del Chaco Húmedo, en el departamento 9 de Julio de la provincia de Santa Fe, en la localidad de San Bernardo, distante 65 km aproximadamente de Tostado. Este distrito es uno de los más afectados por la sequía. También se encuentra cercana a una gran zona de características particulares denominadas “Bajos Submeridionales” (Figura 18). Para su construcción, los técnicos del Ministerio y la UTN decidieron que una vieja aguada era el lugar propicio y armaron allí un área de captación de 10 hectáreas con 2 represas de 3 millones de litros cada una, más una de decantación. Se instalaron caudalímetros y freáticos, más una pequeña

estación agrometeorológica. La obra incluyó un convenio con 8 productores de la zona para que puedan abastecerse.



**Figura 18.** Bajos Submeridionales y ubicación de la UECA “Las Patricias” (Fuente: FVSA y FUNDAPAZ, en Cristina, 2015).

La Figura 19 muestra la foto área (izquierda) y el croquis de un sistema de cosecha de agua de lluvias mediante camellones (derecha), de los desarrollados por los menonitas, quienes fueron pioneros e

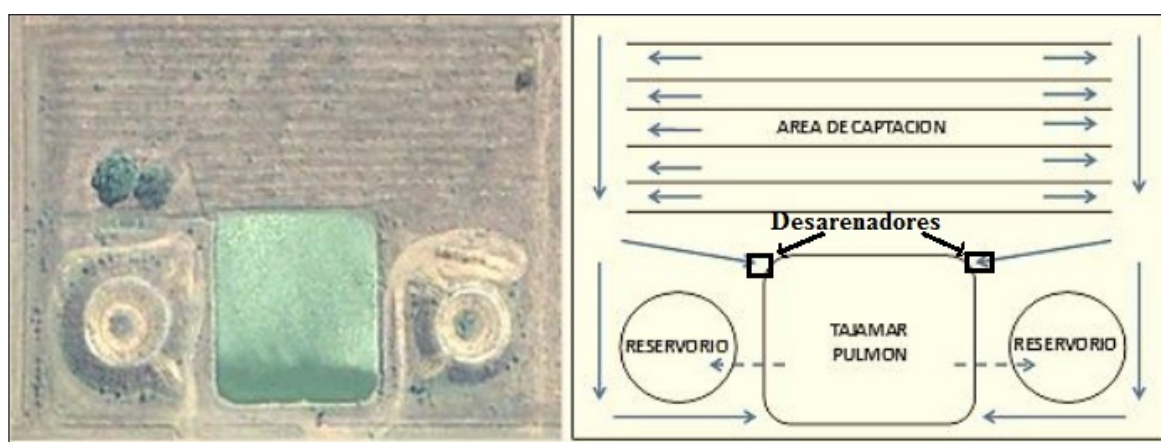
innovadores en este tipo de diseños en la zona del Chaco Paraguayo.

El mismo funciona del siguiente modo: Una vez identificadas las zonas aptas para acumular el agua de lluvia, como ser bajos naturales o zonas con depresiones, en tajamares o pulmones cuya capacidad se obtiene teniendo en cuenta la oferta hídrica y la demanda ganadera. Para construir estos reservorios, es necesario realizar un movimiento de suelo, que puede ser aprovechado para construir un reservorio o tanque elevado de contención de agua, denominado tanque Chaco, donde mediante motobomba o molinos de viento se eleva el agua desde el tajamar al tanque. Los mismos pueden tener varios metros de altura y diámetros superiores a los 20 o 30 metros. Se los suele reemplazar por

tanques de metal o de hormigón armado, cuando el suelo no es cohesivo.

Una vez lograda la carga hidráulica en los reservorios elevados, mediante tubería, se hace llegar el agua por gravedad a los bebederos, ubicados estratégicamente, los cuales pueden estar alejados distancias considerables de los tanques de almacenamiento.

Algunos sistemas cuentan además con 2 perforaciones o pozos calzados, cuyo diámetro es aproximadamente de 2 a 3 metros, los cuales pueden ser utilizados para extraer agua subterránea, mediante drenes horizontales y mezclarla, con la proveniente de la cosecha de agua de lluvia almacenada en los tajamares.



**Figura 19.** Sistema de cosecha por método de camellones (Fuente: Nosetto et. al., 2012 en Salas Solis, 2013).

Respecto a cómo se colecta o cosecha el agua de lluvia, existen diversas metodologías, desde superficies preparadas exclusivamente para dichas tareas hasta adecuación de áreas multipropósito, como por ejemplo caminos doble uso, es decir para tránsito y colecta del agua de lluvia.

En el sistema menonita, la más empleada es destinar y adecuar un área determinada para realizar la cosecha de agua de lluvia. Esta adecuación consiste en desmalezar y acomodar el terreno, para dejar al mismo con una serie de camellones u ondulaciones por la que escurrirá el agua de lluvia. La precipitación que cae sobre los camellones, es colectada por un canal lateral, perpendicular a los camellones, el que a su vez conduce el agua hacia un desarenador y sedimentador y posteriormente al tajamar o pulmón. Diseñado el sistema con las pendientes de los camellones y de los canales, adecuadas para el tipo de terreno y para evitar erosiones, posee una alta eficiencia, ya que permite cosechar entre el 60 y el 80 % de la precipitación caída.

Según el propietario del establecimiento donde está emplazada la UECA "Las Patricias", es complicado usarla para fines comunitarios, porque cuando la sequía se acentúa, el agua se agota rápido y no

alcanza para abastecer a muchos usuarios, pero sí a un establecimiento.

Según cálculos, esa UECA alcanza para mantener abastecidos unos 500 animales durante 6 meses, dependiendo la época del año, porque cuando aumenta la temperatura ambiente, el consumo aumenta.

Si bien las UECA implementadas, están diseñadas para un uso ganadero exclusivo, la ubicada en "Las Patricias", cuenta con la particularidad que la cosecha de lluvia se realiza con el objetivo de almacenarla en una represa especialmente diseñada para contrarrestar pérdidas por evaporación y recargar los acuíferos. De esta manera se obtiene el beneficio que durante el proceso de infiltración, los minerales presentes en el suelo, son absorbidos por el agua llevando de ésta manera la calidad de la misma a ser más adecuada para la ganadería ya que el rodeo necesita una cierta cantidad de estos minerales para su desarrollo (Basán Nisckish, 2015). La gran infiltración, con valores de 10 cm por día, resulta apropiado porque favorece la recarga de los pozos y la mejora calidad del agua subterránea.

Desde el Ministerio de Aguas destacan que la seguridad de disponer de agua para abrevado



de hacienda ha repercutido favorablemente en el sostenimiento de la actividad ganadera (generalmente de cría) durante los años más críticos de la sequía. Pero también que la realización de estas obras de tipo comunitarias, requiere la conformación de una unidad de administración y mantenimiento, lo que incentiva el desarrollo de prácticas asociativas entre pequeños Productores Rurales.

En el año 2013 se extendió la idea para abastecer de agua a pequeñas localidades y parajes del norte santafesino siendo utilizadas y administradas en forma comunitaria, proveyendo agua a los pobladores tanto con fines domésticos como productivos.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

El problema de la escasez de agua se refiere a la cantidad, la calidad y su accesibilidad ya que la misma no siempre esta uniformemente distribuida en el espacio y en el tiempo, ni aprovechable en forma directa. Por lo que se requieren estudios de disponibilidad de agua que permitan caracterizar el comportamiento medio de las zonas.

El análisis de las precipitaciones en una región húmeda permite poner en evidencia que la vulnerabilidad a la escasez de agua no se limita a las regiones caracterizadas climáticamente como áridas y semiáridas. Con la salvedad que una gestión adecuada del recurso en estas regiones, permite asignar y controlar el agua durante el ciclo anual.

En la provincia de Formosa el agua se presenta en abundancia en determinados épocas del año y su aprovechamiento es clave para satisfacer las demandas básicas. La modelación mediante el modelo MIKE HYDRO BASIN permitió analizar escenarios que posibilitan satisfacer las demandas durante todo el año y controlar los excesos, con mínimas inversiones por parte del estado. Se demuestra entonces que la gestión eficiente del agua es posible mediante estudios del recurso y la adopción de políticas adecuadas.

En el caso de la provincia de Santa Fe, para paliar la disponibilidad de agua superficial, una de las medidas que se pudo adoptar es la construcción de un sistema de cosecha de agua. De este modo se almacena en los meses de lluvia y se aprovecha en los meses secos. En definitiva no es diferente al sistema natural de almacenamiento, como un lago o un bañado, sólo que requiere un diseño que asegure satisfacer las demandas que se proponen cubrir, considerando también, en lo posible, una proyección a futuro. Con la implementación de estos sistemas, los usos que se pueden satisfacer son variados y dependerán de las necesidades y demandas de la región. Incluso se advierte que la implementación de estas técnicas de cosecha de agua contribuiría significativamente a la gestión de eventos extremos por excesos hídricos.

## 7. REFERENCIAS

Basán Nickisch M. y Lahitte A. 2011. Una alternativa de manejo eficiente de los recursos hídricos para ganadería en el norte de Santa Fe. INTA, Reconquista, Pcia de Santa Fe, Argentina.

Basán Nickisch M. y Sánchez L. 2015. Alternativas de manejo de los recursos hídricos para ganadería en el norte de Santa Fe. Revista Voces y Ecos de INTA, Reconquista, Pcia de Santa Fe, Argentina.

CEDEX. 2003. Manual de Usuario CHAC. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

Cristanchi, MA. 2015. Optimización de los recursos hídricos de un sistema de llanura, mediante la aplicación del Sistema de Soporte de Decisión MIKE BASIN. Caso de estudio Bañado La Estrella, Formosa. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

Cristanchi, MA.; Hämmerly, R. y Valiente MA. 2017. Optimización de los recursos hídricos de un sistema de llanura por aplicación del sistema de soporte de decisión Mike Basin. Caso de estudio bañado La Estrella (Formosa). XXVI Congreso Nacional del Agua, Córdoba, Argentina.

Cristina IM. 2015. Cosecha de agua de lluvia para abastecimiento ganadero. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

Cristina, IM.; Hämmerly, R. y Basán Nickisch M. 2015. Cosecha de agua de lluvia para abastecimiento ganadero. XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Entre Río, Argentina. ISBN 978-987-27407-4-0.

Hämmerly, R. 2012a. Listado de información nacional potencialmente disponible para el balance hídrico a nivel Cuenca del Plata (Argentina). Informe Final Subcomponente II.1 Balance Hídrico Integrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

Hämmerly, R. 2012b. Antecedentes de balance hídrico en Cuenca del Plata. (Argentina). Informe Final Subcomponente II.1 Balance Hídrico Integrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

INTA 2010. Atlas climático digital de la República Argentina. Editores: Bianchi Alberto, Rubí Cravero y Silvia Ana Carla. Salta, Pcia de Salta, Argentina.

MASPyMA 2010. Memoria Técnica UECA San Bernardo. Ministerio da Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

MASPyMA 2012. Informe Técnico de Comisión al Establecimiento "Las Patricias", San Bernardo. Responsable: Sánchez, Luciano et. al., Reconquista, Santa Fe. Ministerio da Agua, Servicios Públicos y Medio Ambiente, Santa Fe, Pcia de Santa Fe, Argentina.

Salas Solis, C.V. 2013. La cosecha de agua de lluvia en áreas áridas y semiáridas. Tesis de Grado. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. México.

### **Páginas WEB**

[https://es.wikipedia.org/wiki/The\\_World\\_Factbook](https://es.wikipedia.org/wiki/The_World_Factbook)

<http://mapas.ambiente.gob.ar/>

[www.formosa.gov.ar](http://www.formosa.gov.ar)

Instituto Geográfico Nacional (IGN), <http://www.ign.gob.ar/sig250>, <http://www.ign.gob.ar/sig#descarga>

