



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

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2

VOL. 8
SEPT. 2016

1688-2873

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL

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

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief

Roberto Pizarro

Editor Ejecutivo / Executive Editor

Miguel Doria

UNESCO

Coordinador de Edición / Editorial Coordinator

Joaquín Jaffif

UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design

Ser Gráficos

Diseño de Portada / Cover Design

Gabriel Soumis-Dugas

UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Modelación hidrodinámica bidimensional
del río Paraná inferior
Two-dimensional hydrodynamic modelling of the
lower Paraná river 1
- Basile, Pedro A.; Riccardi, Gerardo; Peruzzo, Florencia y
García, Marina**
- Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la
simulación de la calidad agua de fuentes superficiales.
Caso de estudio: cuenca del río La Vieja, Colombia
Integration of Weap and Qual2k models for the
simulation of water quality surface sources. Case study:
La Vieja river basin, Colombia..... 14
- Jaramillo, María Fernanda; Galvis, Alberto; Escobar, Marisa;
Forni, Laura; Purkey, David; Siebel, Jack Siebel; Lozano,
Gabriel; Rodríguez, Cesar; Castaño, Juan; Sabas, Carlos**
- Diagnóstico de la erosión hídrica en la cuenca del río
Tuxpan, Nteracruz, México
Diagnosis of water erosion of the Tuxpan river basin,
Veracruz, Mexico 25
- José Isidro Melchor-Marroquín; Jorge Luis Chagoya-Fuentes**
- Índices de cambio climático en la cuenca del río Sabinal,
Chiapas, México
Climate change indices in the rio sabinal basin, Chiapas,
Mexico 36
- José Alonso Figueroa Gallegos**
- Modelo participativo de organización para la gestión integrada
de los recursos hídricos en la cuenca del río Tapenagá
Organization participatory model for the integrated
water resources management at Tapenagá river basin..... 42
- Cano, Elvio O.; Schreider, Mario I.; Ruberto, Alejandro R.**
- Caracterización de la calidad de las aguas del embalse
Maurín, para su uso sostenible. Municipio Bauta, provincia
Artemisa, Cuba
Characterization of water quality from Maurín reservoir
for its sustainable use, Bauta city council, Artemisa province,
Cuba 55
- Laiz Averhoff, Orlando R.**
- Modelación hidráulica bidimensional de los desborde
El Chañaral y La Garrapata del río Pilcomayo
Two-dimensional modeling of Pilcomayo river
El Chañaral and La Garrapata Overflows..... 71
- Testa Tacchino, Alejo J. S; Gyssels, Paolo; Corral, Mariano;
Pagot Mariana; Vargas, Constanza; Farías, Héctor D.;
Rodríguez, Andrés**
- Tendencias de precipitación y cambio climático
en la cuenca del río Conchos, México
Trends of precipitation and climate change
in the basin of the river Conchos, Mexico..... 79
- Martínez Austria, Poliopetro F.; Irula Lutzow, Federico**

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

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

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
y envíelo a
aqualac@unesco.org.uy

SUSCRIPTIONS

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

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

EDITORIAL

En las últimas décadas, el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (PHI) ha presentado una serie de soluciones innovadoras que han contribuido a abordar diversos desafíos relacionados con la seguridad hídrica. En estrecha interconexión con su función como programa intergubernamental, único del sistema de las Naciones Unidas dedicado a la investigación, gestión, educación y creación de capacidades vinculadas al agua, la Fase PHI-VIII se diseñó mediante un amplio proceso de consulta con los Estados Miembros a fin de abordar los asuntos más apremiantes vinculados al agua a nivel mundial. Su objetivo principal es fomentar la seguridad hídrica, concepto ampliamente vinculado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en general, y con el Objetivo número 6 en particular, para garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos, prestando especial atención a los más desfavorecidos: los pobres, las mujeres, los niños, los pueblos indígenas y las poblaciones rurales, por mencionar algunos. Con este objetivo global, la Fase PHI-VIII se ha estructurado en torno a seis ejes temáticos clave que tienen por propósito mejorar la seguridad hídrica en respuesta a los desafíos locales, regionales y mundiales. Estos ejes temáticos abarcan los desastres relacionados con el agua y los cambios hidrológicos; las aguas subterráneas; la escasez y calidad del agua; los asentamientos humanos; la ecohidrología y la educación en temas de agua. Todos los actores involucrados en el Programa Hidrológico Internacional han promovido activamente una mejor comunicación entre quienes trabajan o son afectados por el agua, que de hecho somos todas las personas. Es difícil subestimar el papel que ha jugado el PHI en el fortalecimiento de los vínculos entre la política, la ciencia y el desarrollo de capacidades, fundamentales para asegurar el logro de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible asociados que a su vez están interconectados entre sí a través del agua. En este contexto, Aqua-LAC, la revista científica del PHI en América Latina y el Caribe, desempeña un importante rol en la difusión de los resultados de la investigación científica, no sólo en el ámbito de la ciencia, sino también en la formulación de políticas y en la mejora de capacidades. Al comparar con otros campos del conocimiento, el agua sigue siendo en gran medida (incluso diría misteriosamente) sub investigada, sub-financiada, a menudo mal entendida y pasada por alto. Es posible afirmar que sabemos más acerca del estado del agua en Marte que en varias cuencas y acuíferos de nuestro planeta (lo que significa que aún no sabemos prácticamente nada sobre ellos).

Los temas abordados en este número de Aqua-LAC brindan una variada muestra de los aspectos críticos del agua en América Latina y el Caribe, incluyendo su calidad y el cambio climático, por mencionar solo algunos. A este respecto, esta edición presenta ocho artículos que contribuyen a la difusión del conocimiento generado en la región y de esta forma a un mayor conocimiento de los asuntos que afectan a los distintos Estados Miembros. Finalmente, estos artículos aportan conocimiento para la toma de decisiones y los procesos de formulación de políticas, fundamentales para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la seguridad hídrica. Un objetivo que se ajusta a la "raison d'être" de Aqua-LAC y, de hecho, del PHI. Sin más, agradezco a los colaboradores y espero que disfruten de su lectura.

Andras Szollosi-Nagy
Presidente
Consejo Intergubernamental del Programa Hidrológico
Internacional
UNESCO

EDITORIAL (ENGLISH)

Over the last decades, UNESCO's International Hydrological Programme (IHP) has presented a series of innovative solutions that contributed to address a multitude of challenges related to freshwater security. Closely interconnected with its role as a unique intergovernmental programme of the UN system devoted to water research, water resources management, education and capacity building, the eight phase of IHP was prepared through a comprehensive consultation process with Member States to address the most pressing matters affecting water worldwide. Its main focus intends to foster water security, a concept deeply interlinked with the Sustainable Development Goals in general, and with its Sixth Goal in particular, in order to guarantee the availability of water, its sustainable management and the provision of sanitation for all people, paying particular attention to those typically most disadvantaged: the poor, women, children, indigenous peoples and rural populations, to name a few. With this overall objective in sight, IHP-VIII is structured around six key thematic axes that aim to improve water security in response to local, regional, and global challenges. These themes encompass water related disasters and hydrological changes, groundwater, water scarcity and quality, human settlements, ecohydrology and water education.

The International Hydrological Programme has actively promoted an enhanced communication among diverse stakeholders working or affected by water issues, which are in fact all of us. It is hard to underestimate the role of IHP in enhancing the linkages between policy, science and capacity development, which are fundamental to ensure the efficient attainment of the Agenda 2030 and the related Sustainable Development Goals that are all linked together by water.

In this context, Aqua-LAC, the scientific journal of IHP in Latin America and the Caribbean, plays an important role in disseminating the results of scientific research, not only in the science sphere, but also to inform policy making and to promote the enhancement of capacities. When compared with other fields of knowledge, water is still largely (I would even say mysteriously) under-researched, underfunded, often misunderstood and overlooked. It is symptomatic to say that we know more about the status of water in Mars than in several basins and aquifers in our planet (which is to say that we still know virtually nothing about it).

The topics addressed in this issue of Aqua-LAC provide a broad sampling of the critical aspects affecting water on Latin America and the Caribbean, including water quality and climate change issues, to name but a few. In this respect, the current issue of Aqua-LAC presents eight papers that contribute to the dissemination of the knowledge generated in the region and thereby contribute to a better knowledge of the issues affecting different Member States.

These articles ultimately contribute to the decision-making and policy-making processes, fundamental to achieve the Sustainable Development Goals and water security. A purpose that fits the 'raison d'être' of Aqua-LAC and indeed of IHP. While thanking the contributors I hope you will enjoy reading them.

ASN Chairperson
Intergovernmental Council
International Hydrological Programme
UNESCO

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

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

Contenido

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

Idioma

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

Aceptación de los manuscritos

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

Proceso de revisión

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

Derechos de reproducción (Copyrights)

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

Responsabilidad

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

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

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

Contents

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

Languages

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

Acceptance of manuscripts

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

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

Review process

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

Copyrights

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

Disclaimer

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

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

TWO-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODELLING OF THE LOWER PARANA RIVER

Basile, Pedro A.^{1,2}; Riccardi, Gerardo^{1,2,3}; Peruzzo, Florencia^{1,4} y Garcia, Marina^{1,2}

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación del modelo matemático bidimensional CCHE2D para caracterizar la hidrodinámica del Río Paraná Inferior, en el tramo comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe-Océano. La batimetría del cauce se definió a partir de relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior (DNVN-DPI) entre los años 2010 y 2012. Asimismo, para definir los límites del cauce se utilizaron imágenes satelitales y cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Se realizaron simulaciones, en régimen permanente e impermanente, utilizando respectivamente caudales aforados y caudales generados mediante transformación de niveles (z_w) en caudales (Q), con la curva z_w -Q del km 448. Los caudales simulados variaron entre 11640 m³/s y 28600 m³/s, a los cuales le corresponden tiempos de excedencia de 97,7 % y 0,3 % respectivamente. De esta manera, se representaron condiciones de aguas bajas, medias y altas del río. Los resultados del modelo hidrodinámico fueron contrastados con mediciones de caudales realizadas mediante ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) por FICH (2004-2006) y con niveles hidrométricos diarios registrados en Rosario (km 416) y en Puerto San Martín (km 448) por la Prefectura Naval Argentina (PNA). Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, obtenidos en el proceso de calibración del modelo, variaron entre 0,024 s/m^{1/3} y 0,025 s/m^{1/3}, mientras que, la viscosidad turbulenta y las tensiones adicionales de Reynolds se estimaron a partir del modelo de dos ecuaciones κ - ϵ . Los resultados obtenidos indican que el modelo hidrodinámico simula satisfactoriamente la dinámica del flujo en el tramo estudiado, tanto en régimen permanente como impermanente; ya sea en lo que concierne a la reproducción de niveles hidrométricos, pendientes hidráulicas, profundidades, distribución de velocidades y caudales específicos en secciones transversales; como así también, en lo que respecta a los caudales derivados en las bifurcaciones del cauce.

Palabras clave: Hidráulica fluvial, Modelación hidrodinámica bidimensional, río Paraná.

Abstract

This paper presents the implementation of CCHE2D two-dimensional mathematical model to characterize the hydrodynamics of the Lower Paraná River, in the reach comprised between km 410-452 of Santa Fe-Ocean Waterway. River bathymetry was defined from surveys conducted by the National Waterways Division-Lower Paraná District (NWD-LPD) between 2010 and 2012. In addition, to define the limits of the channel satellite images and nautical charts from the Naval Hydrographic Service (NHS) were used. Steady and unsteady flow simulations were performed using respectively measured discharges in the reach and generated discharges by transforming water levels (z_w) in discharges (Q) with the z_w -Q curve at km 448. The discharges ranged between 11640 m³/s and 28600 m³/s, which correspond to exceedance times of 97.7% and 0.3% respectively. Thus, low, medium and high water stages were represented. Model results were verified with discharge measurements made with ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) conducted by FICH (2004-2006) and with daily water levels observed at Rosario (km 416) and Puerto San Martin (km 448) by Argentina Naval Prefecture (ANP). The values of Manning's roughness coefficient, obtained in the calibration process, ranged between 0.024 s/m^{1/3} and 0.025 s/m^{1/3}, while the turbulent viscosity and the additional Reynolds stresses were estimated from the two equations model κ - ϵ . The model satisfactorily represents the flow dynamics in the studied reach, for both steady and unsteady flow; with respect to the reproduction of water levels, hydraulics slopes, water depths, velocity and specific discharge distributions in cross sections; as well, as to the derived flows at channel bifurcations.

Keywords: Fluvial hydraulics, Two-dimensional hydrodynamic modelling, Paraná River.

¹ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR) – Argentina.

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR) – Argentina.

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR) – Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Argentina.

pbasile@fceia.unr.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

La presión antrópica sobre los grandes ríos del planeta ha aumentado considerablemente en los últimos años, como consecuencia de su explotación para satisfacer diversas necesidades humanas (Habersack y Haspel, 2012). Consecuentemente, el manejo integrado y sustentable de tales sistemas fluviales requiere cada vez más el uso de herramientas de modelación como soporte para la planificación y toma de decisiones (James y Marcus, 2006; Matthies et al. 2007).

En este sentido, la modelación hidrodinámica de grandes ríos aluviales constituye la base para el análisis de importantes problemas hidroambientales. Por un lado, los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente la dinámica del flujo hídrico pueden ser utilizados para representar otros procesos asociados, tales como, el transporte de sedimentos, la erosión-sedimentación del lecho, la erosión de márgenes, el transporte de contaminantes, etc. Por otro lado, la modelación permite la evaluación de distintas alternativas de diseño de obras fluviales (presas, espigones, muelles de atraque, protecciones de márgenes, dragados, etc.), así como también, permite analizar, en el marco de los estudios de evaluación de impacto ambiental, las perturbaciones que las mismas le generan al medio físico ante diferentes escenarios de alimentación líquida y sólida.

El grado de detalle de la representación hidrodinámica es función del tipo de problema y exactitud de las predicciones requeridas, de la calidad de los datos disponibles y de las escalas espaciales y temporales en las cuales el modelo debe operar (Di Silvio, 1992; De Vries, 1993).

En grandes ríos aluviales de llanura con lechos de arena (Yangtze, Orinoco, Ganges-Brahmaputra, Mississippi, Paraná, etc.), el ancho del cauce para márgenes llenas puede ser del orden del kilómetro y la correspondiente profundidad media del orden de decenas de metros.

Es decir, los mismos se caracterizan por su elevada relación ancho profundidad ($B/h_m \approx 50 - 200$), por su baja pendiente ($S_w \approx 10^{-4} - 10^{-5}$) y por la gran extensión del valle aluvial, cuyo ancho puede ser del orden de decenas de kilómetros (Parker, 2006; Wilkerson y Parker, 2011, Lewin y Ashworth, 2014).

La representación hidrodinámica en grandes ríos, a escala de tramo para simular el flujo en el cauce principal o incorporando además el flujo en la planicie de inundación y eventualmente el transporte de sedimentos, ha sido realizada utilizando modelos 3D (Sandbatch et al., 2010; Jia et al., 2010; Nicholas et al., 2012), 2D (Zhou et al., 2009; Nicholas et al., 2012; Guerrero y Lamberti, 2012; Tung et al., 2015), Cuasi-2D (Wilson et al., 2007; Neal et al., 2009; Nicholas et al., 2012; Garcia et al., 2015) e híbridos 1D-2D (Werner et al., 2005, Rolim da Paz et al., 2011).

El presente trabajo se plantea como objetivo implementar un modelo matemático 2DH para caracterizar la hidrodinámica del río Paraná Inferior, en el tramo comprendido entre Bella Vista (BVI) y Villa Gobernador Gálvez (VGG), es decir, entre el km 452 (extremo aguas arriba) y el km 410 (extremo aguas abajo) de la ruta de navegación troncal Santa Fe-Océano. En dicho tramo se desarrolla la mayor parte del complejo portuario del Área Gran Rosario (Timbúes – Arroyo Seco), el cual se ha convertido en el frente portuario fluvial más importante de América del Sur en lo relativo al movimiento de granos, subproductos y aceites vegetales. Por el mismo se exporta aproximadamente el 70 % de la producción total anual de agrograneles de Argentina (Basile et al., 2013).

Además de su utilización para la navegación fluvial (comercial y recreacional), el mismo es aprovechado para satisfacer el abastecimiento de agua (consumo humano, industrial, enfriamiento de centrales térmicas) y como cuerpo receptor de contaminantes. Por lo tanto, el conocimiento de la hidrodinámica (y del transporte de sedimentos) es un requerimiento fundamental para evaluar, en general, todo tipo de intervención antrópica en dicho tramo. En esta primera etapa, que aquí se presenta, se plantea la calibración de los procesos hidráulicos. Sucesivamente, se prevé implementar el módulo de simulación del transporte de sedimentos y de los procesos de erosión-sedimentación del lecho, para estudiar la evolución morfológica del tramo, en particular, la evolución de los pasos críticos para la navegación presentes en el tramo, los cuales son mantenidos con dragados periódicos.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la **Figura 1** se presenta la ubicación del tramo km 410-452 del río Paraná en estudio. El caudal módulo, correspondiente al período 1970-2014 en Puerto San Martín (PSM, km 448), es igual a 17500 m³/s, mientras que, durante la crecida extraordinaria de 1983, el caudal máximo alcanzó aproximadamente los 60000 m³/s, con casi 30000 m³/s fluyendo en el cauce principal y el resto sobre la planicie de inundación (Garcia et al., 2015). En dicho evento, el nivel hidrométrico máximo en Rosario (ROS, km 416) alcanzó los 9,21 m IGN (donde m IGN indica el nivel en metros, referido al cero del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina) y la planicie fue completamente inundada con una profundidad media del orden de los 4 m, en un ancho de 50 km. El caudal mínimo registrado en PSM es aproximadamente igual a 7000 m³/s. Por lo tanto, la relación entre el caudal máximo y el mínimo es igual a 8,5, es decir, un valor bajo, similar al correspondiente a otros grandes ríos del planeta. Si consideramos solo el flujo en el cauce principal, dicha relación tiene un valor igual a 4,3. Por otra parte, la pendiente de la superficie libre entre PSM y ROS varía entre $1,4 \times 10^{-5}$ para aguas bajas ($z_w < 5,5$ m IGN en ROS) y $4,3 \times 10^{-5}$ para aguas altas ($z_w > 7,3$ m IGN en ROS).

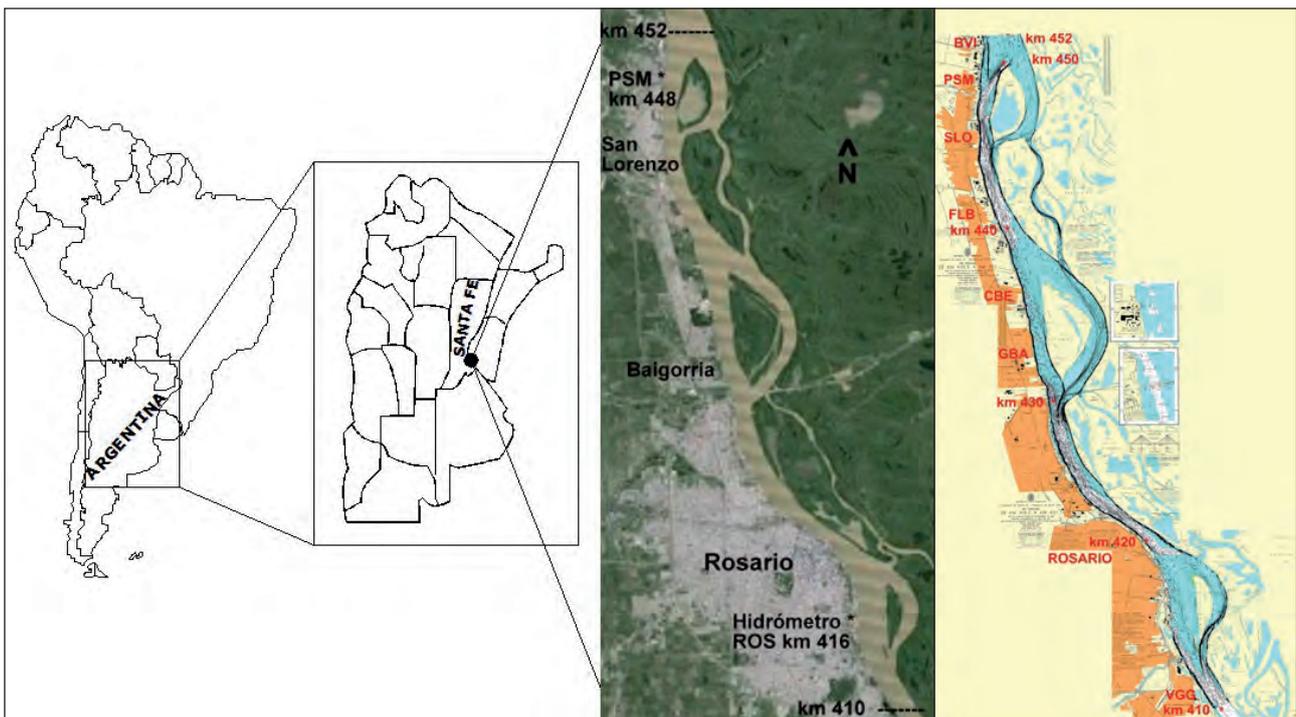


Figura 1.- Ubicación del tramo km 410-452 del Río Paraná. Imagen Landsat Google-Earth© (izq.) y Cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), superpuestas con isóbatas de relevamientos de la Dirección Nacional Vías Navegables – Distrito Paraná Inferior (DNVN-DPI) (der.).

A macro-escala, el cauce principal muestra una configuración morfológica caracterizada por una sucesión de expansiones, donde se observan islas vegetadas, interconectadas con tramos más estrechos y profundos. La relación entre el ancho y la profundidad media varía en un orden de magnitud, $25 < B/h_m < 250$. En efecto, el ancho máximo del cauce en el tramo (sin considerar las islas) es aproximadamente de 2500 m y le corresponde una profundidad media para márgenes llenas de 10 m, por lo tanto, $B/h_m \approx 250$. Por otra parte, el ancho mínimo (excluyendo los riachos Paraná Viejo e Invernada) es de 600 m, con una profundidad media de 24 m, es decir, $B/h_m \approx 25$. La profundidad máxima en el tramo, correspondiente al nivel hidrométrico medio en Rosario (6,5 m IGN), es del orden de los 31 m.

El lecho es de arena, con diámetro d_{50} variando entre 0,26 mm y 0,32 mm, y desvío estándar geométrico variando entre 1,46 y 1,85. El sedimento fino predominante, transportado en el río Paraná Medio e Inferior, proviene de la cuenca alta del río Bermejo, que tributa al río Paraguay, el cual a su vez descarga en el río Paraná. El transporte de sedimentos promedio total anual que ingresa al sistema, está en el orden de 150×10^6 t/año, de los cuales aproximadamente el 83 % está compuesto por sedimento limo arcilloso, que es transportado en suspensión como carga foránea (Amsler y Drago, 1999). A lo largo del cauce se observan albardones naturales sobre la planicie aluvial en inmediaciones de la margen izquierda.

3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la simulación numérica hidrodinámica se utiliza el modelo matemático bidimensional horizontal CCHE2D, que simula la hidrodinámica en flujo permanente, impermanente y cuasi-permanente; el transporte de sedimentos por clases granulométricas; el cambio de composición granulométrica del sedimento del lecho y la correspondiente erosión-sedimentación. El modelo CCHE2D es desarrollado por el National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCCHE) - Universidad de Mississippi (Jia y Wang, 2001).

Integrando las ecuaciones de Reynolds sobre la profundidad de flujo, bajo la suposición de movimientos verticales despreciables, la tercera ecuación dinámica se reduce a la distribución hidrostática de la presión y de los dos restantes, se obtienen las ecuaciones dinámicas 2D-H.

Integrando, en forma análoga, la ecuación de continuidad 3D, se obtiene la ecuación de continuidad 2D-H. Por lo tanto, las ecuaciones utilizadas por el modelo CCHE2D para representar la hidrodinámica son (Jia y Wang, 2001):

Continuidad:

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum en dirección x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad (2)$$

Momentum en dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (3)$$

donde z_w : nivel de la superficie libre del agua, h : profundidad de flujo, u y v : velocidades medias en la vertical en direcciones x e y respectivamente, ρ : densidad del agua, g : aceleración de la gravedad, τ_{bx} y τ_{by} : tensiones de corte sobre el fondo en direcciones x e y respectivamente, las cuales se expresan como:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u U}{h^{1/3}} \quad (4a)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v U}{h^{1/3}} \quad (4b)$$

donde n : coeficiente de rugosidad de Manning, U : módulo vector velocidad y τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} y τ_{yy} tensiones turbulentas o tensiones adicionales de Reynolds promediadas en vertical.

Las tensiones turbulentas se expresan, de acuerdo a la analogía de Boussinesq, en función de la viscosidad turbulenta o viscosidad cinemática de remolino ν_t y del tensor de velocidad de deformación medio:

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \rho \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5a)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \rho \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5b)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \rho \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5c)$$

El valor de ν_t puede ser determinado con las siguientes opciones i) cálculo de un valor promedio en vertical, obtenido por integración de la distribución parabólica de viscosidad cinemática de remolino, ii) estimación con un modelo de longitud de mezcla integrado en profundidad, iii) determinación a partir de un modelo κ - ϵ integrado en profundidad, siendo κ : energía cinética turbulenta y ϵ : función de disipación y iv) estimación con el modelo de Smagorinsky.

La resolución de las ecuaciones se realiza con el Método de Elementos Eficientes, que es un tipo de método de colocación dentro del Método de los Residuos Ponderados. Ulteriores detalles pueden consultarse en Jia y Wang (2001).

Para la implementación del modelo se utiliza la plataforma bajo entorno Windows© CCHE-GUI 3.0 (Zhang, 2006) en conjunción con el mallador de dominios geométricos complejos CCHE-MESH 3.0 (Zhang y Jia, 2009), que incluye varias técnicas para la generación y optimización de mallas computacionales estructuradas ajustadas al contorno.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la implementación del modelo, se comenzó definiendo la topobatemetría del cauce a partir de relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Distrito Paraná Inferior (DNVN-DPI) entre los años 2010 y 2012. Asimismo, para definir los límites del cauce se utilizaron imágenes satelitales y cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) (Figura 1).

La base de datos topobatemétricos se importó con CCHE-MESH y se generó una malla estructurada RL (Ryskin y Leal, 1983), en coordenadas curvilíneas ajustadas al contorno con controles de suavización, resultando en promedio $\Delta s=100$ m y $\Delta n=45$ m (relación de aspecto promedio igual a 2.2).

Sucesivamente se le asignaron las cotas IGN a los nodos mediante el método de interpolación por triangulación.

En la **Figura 2** se presentan dos imágenes de la constitución del modelo, brindada por la plataforma CCHE-GUI, donde se observa el tramo en estudio con la malla computacional (izquierda) y con los niveles del lecho, expresados en m IGN (derecha).

Se realizaron simulaciones en régimen permanente utilizando caudales aforados en el tramo por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH, 2004 y 2006) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en Timbúes (www.hidricosargentina.gov.ar).

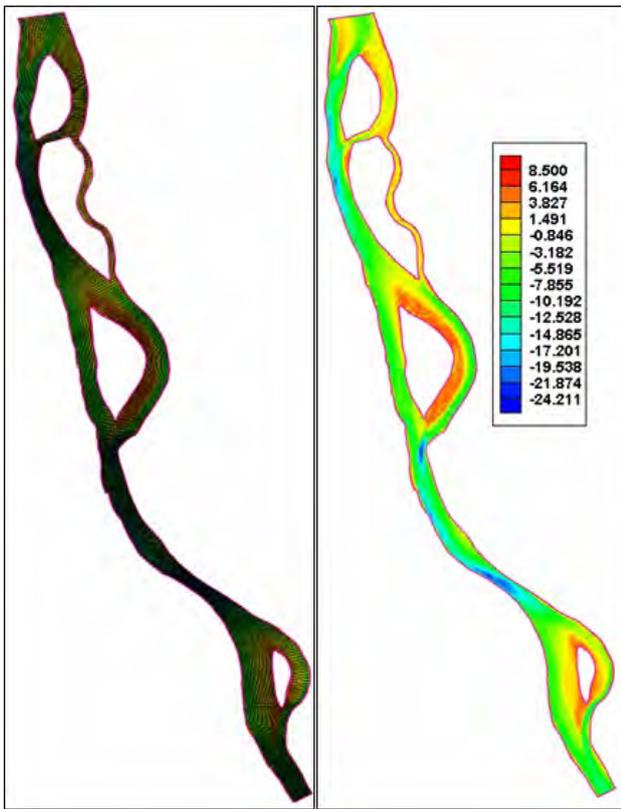


Figura 2.- Malla computacional (izq.) y Nivel del lecho en (m) IGN (der.) del río Paraná km 410-452.

Asimismo, se realizaron simulaciones en régimen impermanente del 01/11/04 al 31/12/04. Los caudales utilizados para las simulaciones variaron entre 11640 m³/s y 28600 m³/s, tal como se observa en la **Tabla 1**.

De acuerdo a la curva de duración de caudales en Puerto San Martín (PSM, km 448) correspondiente al período 1970-2014, a tales caudales le corresponden tiempos de excedencia de 97,7 % y 0,3 % respectivamente (ver **Figura 3**). De esta manera, se representaron condiciones de aguas bajas, medias y altas del río.

Como condiciones de borde, en el caso de flujo permanente, en el contorno aguas arriba se especificó el caudal aforado y aguas abajo el nivel hidrométrico.

Este último se obtuvo extrapolando el valor registrado en el Hidrómetro de Rosario (ROS) en el km 416, utilizando la pendiente de la superficie libre entre PSM y ROS para la fecha del aforo.

En el caso de flujo impermanente se especificaron, en el contorno aguas arriba un hidrograma Q(t) generado con la curva nivel hidrométrico-caudal y los correspondientes niveles hidrométricos diarios en PSM y en el contorno aguas abajo, un limnigrama z_w(t) extrapolado a partir del limnigrama registrado en ROS, con el mismo criterio explicado anteriormente.

Tabla 1.- Caudales simulados, tiempos de excedencia de Q, niveles hidrométricos y pendientes.

| Fecha | Qx10 ³ (m ³ /s) | t exc. (%) | z _w PSM (m) IGN | z _w ROS (m) IGN | S _w x10 ⁻⁵ (-) |
|--------------|--|---------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| 31/08/2001 | 11,64 | 97,72 | 5,17 | 4,47 | 2,19 |
| 21/02/2006 | 14,31 | 80,18 | 6,05 | 5,23 | 2,56 |
| 09/06/2005 | 17,49 | 50,81 | 7,17 | 6,24 | 2,91 |
| 21/12/2004 | 19,57 | 31,23 | 7,92 | 6,94 | 3,06 |
| 02/04/2003 | 22,74 | 8,99 | 8,59 | 7,53 | 3,31 |
| 16/08/1982 | 26,76 | 1,44 | 9,10 | 8,03 | 3,34 |
| 04/01/1983 | 28,60 | 0,26 | 9,98 | 8,86 | 3,50 |
| Nov.-Dic. 04 | 15,3-20,0 | 71-27 | 6,38-7,96 | 5,48-6,94 | 2,81-3,19 |

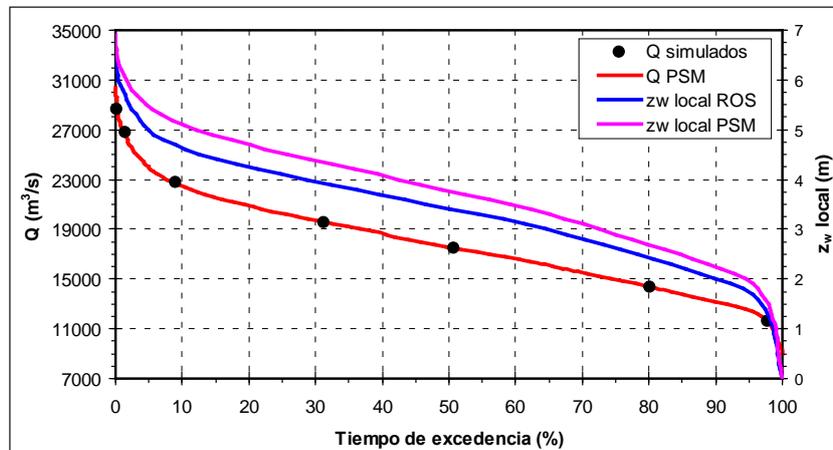


Figura 3.- Curvas de duración de niveles hidrométricos locales (PSM y ROS) y caudales (PSM), período 1970-2014.

En ambas situaciones (flujo permanente e impermanente) se realizaron diversas corridas de calibración variando el coeficiente de rugosidad de Manning dentro de límites físicamente plausibles y de acuerdo a investigaciones previas en el tramo (FICH, 2006; Guerrero y Lamberti, 2012). Los valores obtenidos variaron entre 0,024 s/m^{1/3} y 0,025 s/m^{1/3}. Para evaluar la viscosidad turbulenta y estimar las tensiones adicionales de Reynolds se especificó el modelo de dos ecuaciones κ - ϵ .

En las simulaciones se trataron de reproducir los niveles hidrométricos registrados en los Hidrómetros de ROS (km 416) y PSM (km 448), las correspondientes pendientes de la superficie libre del agua, las distribuciones de velocidades y caudales específicos observadas en diferentes secciones transversales.

Asimismo, se intentaron reproducir los caudales observados, derivados por el brazo derecho e izquierdo, en cuatro bifurcaciones: i) Isla El Banco a la altura del muelle Pampa en PSM, km 449; ii) Isla Rosita a la altura del muelle Sulfacid en Fray Luis Beltrán (FLB), km 440; iii) Isla Carlota, Paso

Borghi-Destilería en Capitán Bermúdez (CBE), km 436 y iv) Isla Ing. Sabino Corsi a la altura de la Ciudad Universitaria de Rosario, km 416,5. En la **Figura 1** (der.) se indican las distintas localidades mencionadas.

5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Simulaciones en régimen permanente

En la **Tabla 2** se presentan los niveles hidrométricos observados y calculados, referidos al cero del IGN, en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM) y en Rosario (ROS), correspondientes a las simulaciones con caudal constante.

En dicha Tabla también se especifica el caudal, el coeficiente de rugosidad de Manning y el error relativo E_r de los niveles hidrométricos calculados respecto a los observados, para cada simulación. E_r varía entre 0,12 % y 1,87 % en PSM (km 448) y entre 0,12 % y 1,34 % en ROS (km 416). Si existen valores $E_r > 0$ y $E_r < 0$, para calcular el promedio (\bar{E}_r) se considera el valor absoluto de los mismos, y se expresa como $\pm \bar{E}_r$.

Tabla 2.- Niveles hidrométricos obs. y calc. en PSM (km 448) y ROS (km 416), error rel. y error rel. promedio.

| Fecha | Q (m ³ /s) | z _w obs. (m) IGN | | Simul. N° | n (s/m ^{1/3}) | z _w calc. (m) IGN | | E _r (%) | | Ē _r (%) | |
|------------|-----------------------|-----------------------------|------|-----------|-------------------------|------------------------------|------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | | PSM | ROS | | | PSM | ROS | PSM | ROS | PSM | ROS |
| 31/08/2001 | 11640 | 5,17 | 4,47 | S1-C5R1 | 0,025 | 5,18 | 4,53 | 0,19 | 1,34 | 0,59 | 0,96 |
| 21/02/2006 | 14310 | 6,05 | 5,23 | S2-C4R3 | 0,025 | 6,11 | 5,26 | 0,99 | 0,57 | | |
| 09/06/2005 | 17490 | 7,17 | 6,24 | S3-C2R6 | 0,024 | 7,18 | 6,26 | 0,14 | 0,32 | 0,20 | 0,45 |
| 21/12/2004 | 19570 | 7,92 | 6,94 | S4-C1R5 | 0,025 | 7,94 | 6,98 | 0,25 | 0,58 | | |
| 02/04/2003 | 22740 | 8,59 | 7,53 | S5-C3R4 | 0,024 | 8,60 | 7,57 | 0,12 | 0,53 | 1,00 | ±0,37 |
| 16/08/1982 | 26760 | 9,10 | 8,03 | S6-C7R3 | 0,024 | 9,27 | 8,04 | 1,87 | 0,12 | | |
| 04/01/1983 | 28600 | 9,98 | 8,86 | S7-C9R2 | 0,025 | 10,08 | 8,82 | 1,00 | -0,45 | | |

Considerando que el límite para aguas bajas se asocia a un tiempo de excedencia del 80 % (z_w < 5,5 m IGN en Rosario) y para aguas altas a un tiempo de excedencia del 20 % (z_w > 7,3 m IGN en Rosario), el

consiguiente rango de aguas medias es 5,5 m IGN ≤ z_w ≤ 7,3 m IGN. Sobre la base de esta división, los errores relativos promedio de niveles hidrométricos son 0,59 %, 0,2 % y 1 % en PSM y 0,96 %, 0,45 % y ±0,37 % en ROS, para aguas bajas, medias y altas, respectivamente. Mientras que, los errores relativos promedio correspondientes a las pendientes de la superficie libre, que se estiman a partir de los valores de Tabla 2, son del ±5,4 % para aguas bajas, -1,6 % para aguas medias y ±10 % para aguas altas.

En las cinco imágenes de la **Figura 4** se presentan los resultados de la simulación en flujo permanente S4-C1R5 correspondiente a Q=19570 m³/s (aforo FICH, 2004), donde se muestra la situación final a lo largo del tramo de i) nivel hidrométrico (z_w), ii) profundidad

de flujo (h), iii) módulo del vector velocidad (U), iv) módulo del vector caudal específico (q) y v) módulo del vector tensión de corte sobre el fondo (τ_b). Por razones de espacio solo se presentan las imágenes de la simulación S4-C1R5.

En la **Figura 4** se observa que las mayores profundidades, velocidades y, consecuentemente, caudales específicos y tensiones de corte sobre el lecho se desarrollan sobre los brazos derechos en todas las bifurcaciones, es decir, sobre la margen Santafesina y no sobre los brazos izquierdos adyacentes al valle aluvial. En particular, para la simulación S4-C1R5, la tensión de corte sobre el lecho, preponderante a lo largo de los brazos derechos, es del orden de 5 N/m². Por lo tanto, considerando d₅₀ ≈ 0,3 mm, la misma es aproximadamente 27 veces superior a la tensión de corte crítica del sedimento del lecho (τ_{bc50} ≈ 0,186 N/m²).

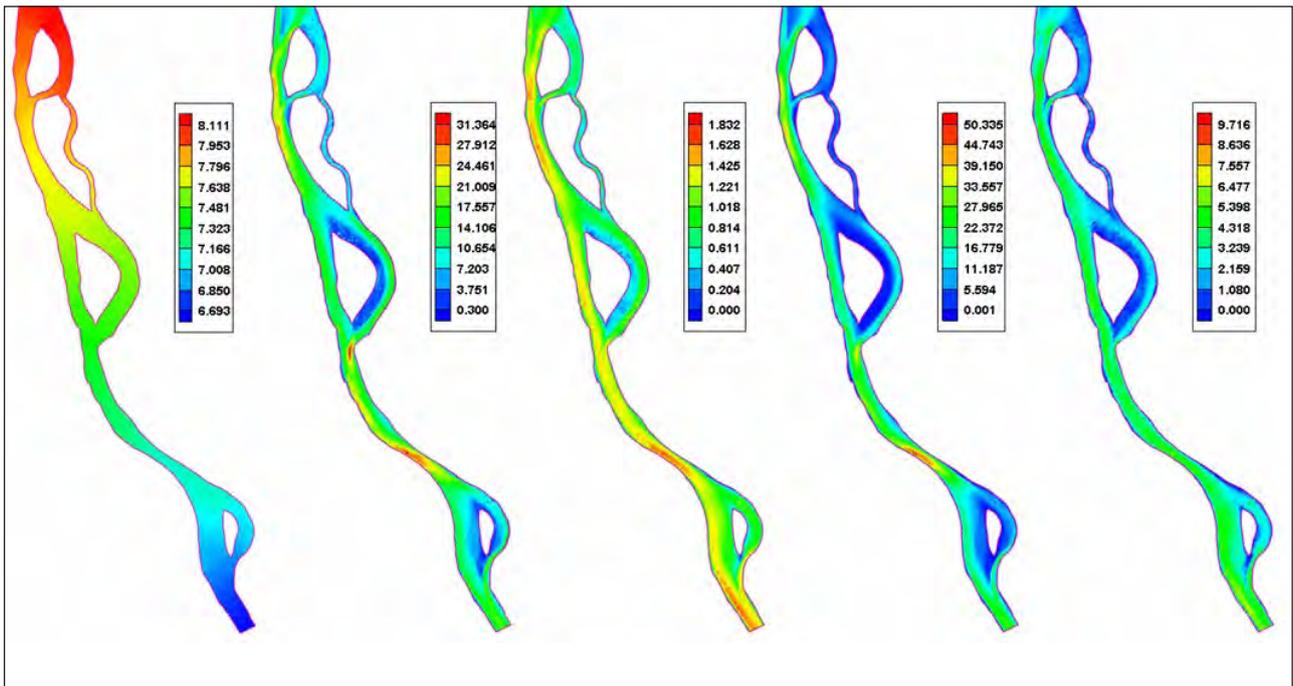


Figura 4.- Simulación S4-C1R5, Q=19570 (m³/s) - 21/12/2004. De izquierda a derecha: z_w (m) IGN, h (m), U (m/s), q (m²/s) y τ_b (N/m²).

En la **Figura 5a** se presenta una comparación entre caudales específicos calculados y observados en la sección km 429 (a la altura del balneario La Florida en Rosario), correspondiente a la simulación S4-C1R5 (Q=19570 m³/s).

Se nota que la distribución de caudales específicos en la sección transversal es muy bien reproducida por el modelo. El error relativo promedio, entre valores calculados y observados, es igual a $\pm 5\%$.

Debido a que, aguas arriba de la confluencia los mayores caudales son derivados por el brazo derecho, el thalweg en la zona de la confluencia se recuesta sobre la Isla Invernada-Espinillo (sobre

margen izquierda del cauce) y se extiende varios kilómetros aguas abajo, generando, por lo tanto, la distribución asimétrica de los caudales específicos que se observa en la **Figura 5a**.

Para la misma sección, en la **Figura 5b** se presentan los niveles hidrométricos calculados y observados, conjuntamente con el nivel del lecho del MDT generado con CCHE-MESH y los niveles del lecho extraídos del relevamiento batimétrico (todos los niveles referidos al IGN). Se observa una buena correspondencia entre los valores de profundidad ($h=z_w-z_b$) observados y calculados. El error relativo promedio, entre valores puntuales calculados y observados de profundidad de flujo, es igual a $\pm 4,4\%$.

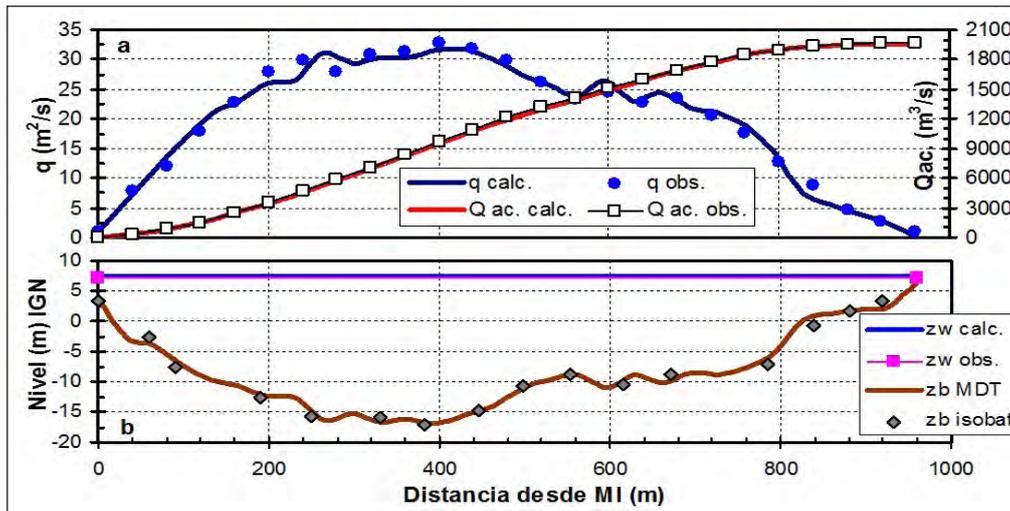


Figura 5.- Simulación S4-C1R5, Q=19570 m³/s. Sección transversal km 429. **a)** Comparación de la distribución de caudales específicos q calculados y observados y correspondiente curva de caudales acumulados Qac. **b)** Nivel hidrométrico calculado y observado; nivel del lecho del MDT y nivel del lecho observado a partir de relevamiento batimétrico.

En la **Figura 6** se presenta la ubicación de las secciones utilizadas para determinar la derivación de caudales en cada una de las cuatro bifurcaciones consideradas: i) Isla El Banco-km 449, ii) Isla Rosita-km 440; iii) Isla Carlota-km 436 y iv) Isla Ing. Sabino Corsi-km 416,5. En dicha Figura, en la imagen de la batimetría (derecha), queda evidenciado con más detalle que en la **Figura 4**, que el thalweg

principal se desarrolla por los brazos derechos de las bifurcaciones.

En la **Figura 6** (izquierda), en una zona limitada con línea discontinua, se muestra la distribución de q en cada bifurcación para la simulación S4-C1R5 ($Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$). Por razones de espacio solo se presentan las imágenes correspondientes a esta simulación.

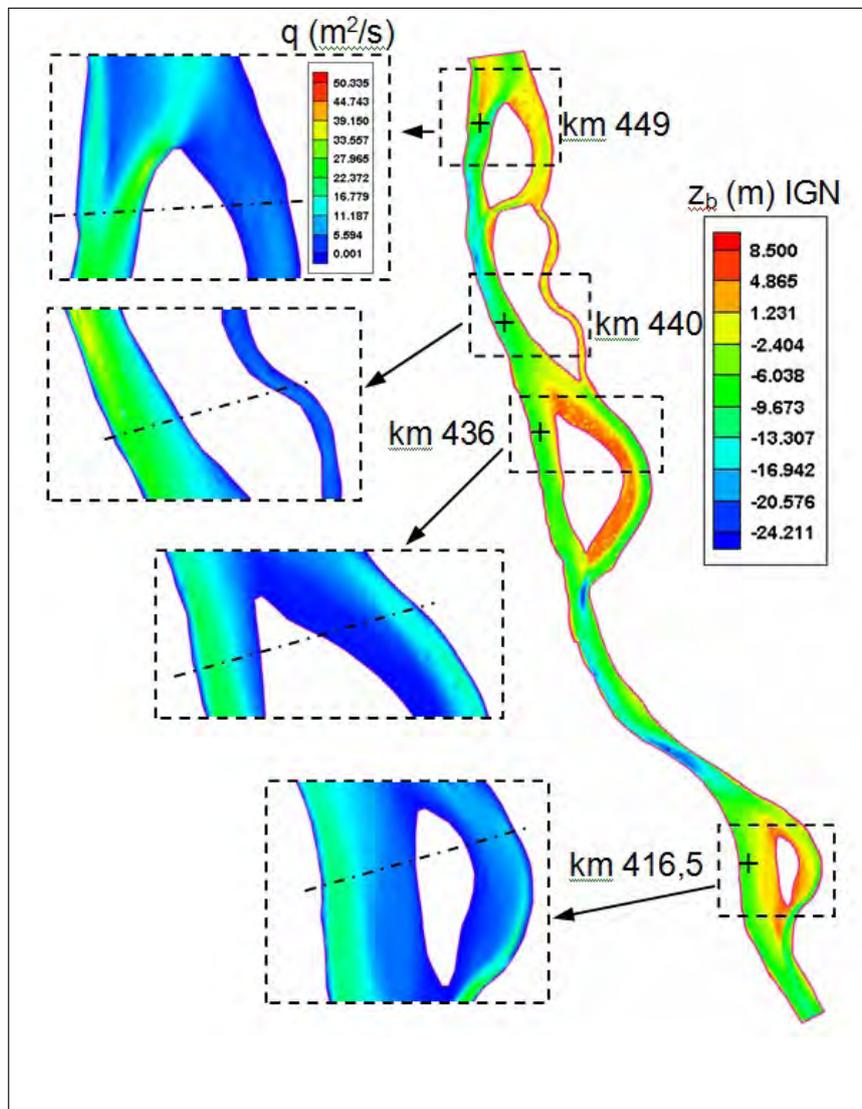


Figura 6.- Ubicación de los kms 449, 440, 436 y 416,5 en la imagen de la batimetría (derecha) y distribución de q en cada una de las bifurcaciones consideradas (izquierda) para la simulación S4-C1R5 ($Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para cada una de las simulaciones se determinaron los caudales derivados por cada brazo y se los compararon con los caudales observados. En la **Figura 7** se presenta una comparación, entre valores calculados y los valores observados, del porcentaje del caudal total Q que es derivado por los brazos derecho (BD) e izquierdo (BI) en las bifurcaciones: **a)** km 449, **b)** km 440; **c)** km 436 y **d)** km 416,5.

Se aprecia que los caudales observados, derivados en dichas bifurcaciones, son adecuadamente reproducidos por el modelo. En particular, en el km 449

(**Figura 7a**) se nota que el caudal derivado por el BD, calculado con el modelo, es aproximadamente del 82 % para aguas bajas y disminuye levemente al 77 % para aguas altas. Por consiguiente, el caudal derivado por el brazo izquierdo aumenta del 18 % (aguas bajas) al 23 % (aguas altas).

En el km 440 (**Figura 7b**), el BD es el de mayor jerarquía y, según las simulaciones realizadas, por el mismo se deriva aproximadamente el 90 % del caudal total para aguas bajas, el cual aumenta gradualmente hasta el 95 % para aguas altas. Consecuentemente,

el caudal derivado por el BI, denominado Riacho Paraná Viejo, disminuye gradualmente del 10 % para aguas bajas al 5 % para aguas altas.

En el Paso Borghi-Destilería, km 436 (**Figura 7c**), el BD es el de mayor jerarquía y es el actual canal de navegación, por el mismo, de acuerdo al modelo, se deriva aproximadamente el 67 % del caudal total para aguas bajas, el cual disminuye gradualmente hasta el 61 % para aguas altas. Consecuentemente, el caudal derivado por el BI, aumenta gradualmente del 33 % para aguas bajas al 39 % para aguas altas.

En el km 416,5 (**Figura 7d**), el brazo derecho, denominado canal de los muelles, debe ser dragado para mantener la vía navegable operativa con 32 pies al nivel de referencia z_w (80 %). Por dicho brazo, el modelo estima que se deriva aproximadamente el 77 % del caudal total para aguas bajas, el cual disminuye muy levemente hasta el 76 % para aguas altas. Consecuentemente, el caudal derivado por el BI, aumenta progresivamente del 23 % para aguas bajas al 24 % para aguas altas.

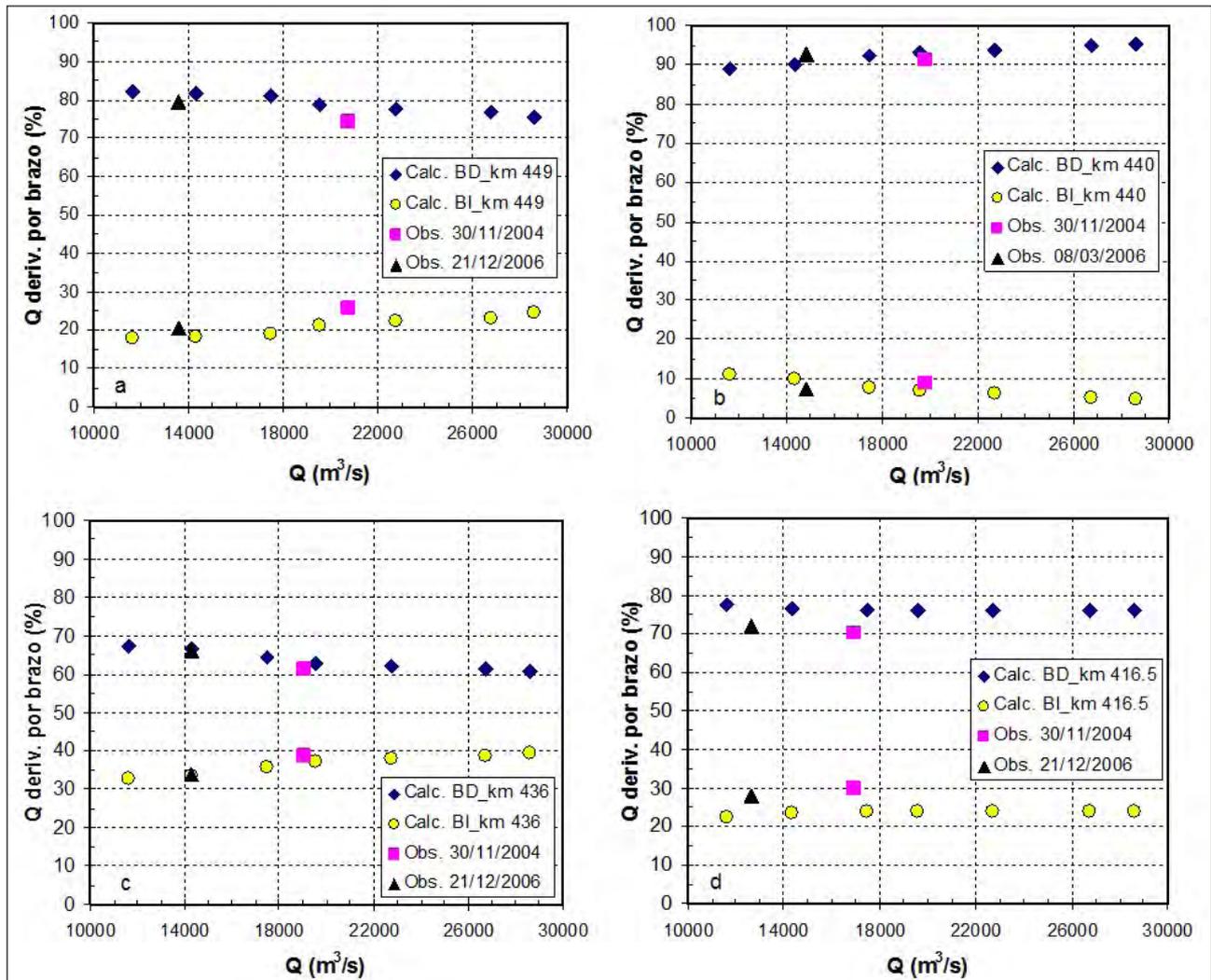


Figura 7.- Comparación entre valores calculados y observados del porcentaje del caudal total Q derivado por brazos derecho (BD) e izquierdo (BI) en las bifurcaciones: **a)** km 449, **b)** km 440, **c)** km 436 y **d)** km 416,5.

Cabe señalar que, entre el km 418 y 430 se encuentra la Isla Invernada-Espinillo, resultante del adosamiento de las dos islas homónimas Invernada y Espinillo (ver **Figura 1**). El brazo izquierdo que se observa en dicha Figura, se corresponde con el riacho Invernada, el cual no ha sido representado físicamente en el modelo ya que, de acuerdo a las mediciones disponibles (FICH, 2004); por el mismo se deriva un caudal muy pequeño, menor al 1 % del caudal total. Es decir, prácticamente la totalidad del

caudal se deriva por el brazo derecho, cuyo cauce es limitado por la Isla Invernada-Espinillo sobre margen izquierda y por la ciudad de Rosario sobre margen derecha.

A los valores de porcentaje de caudal derivado por el brazo derecho, simulados con el modelo en cada bifurcación, se les ajustaron las ecuaciones de regresión lineal (6), (7), (8) y (9), ($R^2 > 0,95$), para las bifurcaciones del cauce kms 449, 440, 436 y 416,5, respectivamente.

$$\%Q(BD_km449) = -4,112 \times 10^{-4} Q + 87,404 \quad (6)$$

$$\%Q(BD_km440) = 3,612 \times 10^{-4} Q + 85,318 \quad (7)$$

$$\%Q(BD_km436) = -3,920 \times 10^{-4} Q + 71,488 \quad (8)$$

$$\%Q(BD_km416,5) = -5,828 \times 10^{-4} Q + 77,646 \quad (9)$$

Mediante dichas ecuaciones se calcularon los porcentajes del caudal total derivado por el brazo derecho, para los aforos realizados por FICH (2004, 2006), y se determinaron los errores relativos respecto a los correspondientes porcentajes observados en los aforos. En la **Tabla 3** se presentan los resultados de dicha comparación cuantitativa, donde se observa que los errores relativos promedio son iguales a 4,36 %, ±1,81 %, ±2,36 % y 7,63 %, para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5, respectivamente.

Tabla 3.- Porcentaje del caudal total Q derivado por brazo derecho en bifurcaciones del cauce; obs., calc., error relativo y error relativo promedio.

| Fecha aforo | Q (m³/s) | Bifurc. (km) | % Q (BD) | | E _r (%) | Ē _r (%) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|--------------------|--------------------|
| | | | Obs. | Calc. | | |
| 30/11/2004 | 20790 | 449,0 | 74,30 | 78,85 | 5,77 | 4,36 |
| 21/02/2006 | 13617 | 449,0 | 79,40 | 81,80 | 2,93 | |
| 30/11/2004 | 19818 | 440,0 | 91,20 | 92,48 | 1,38 | ±1,81 |
| 08/03/2006 | 14839 | 440,0 | 92,70 | 90,68 | -2,23 | |
| 02/12/2004 | 19075 | 436,0 | 61,40 | 64,01 | 4,08 | ±2,36 |
| 08/03/2006 | 14315 | 436,0 | 66,30 | 65,88 | -0,64 | |
| 25/11/2004 | 16901 | 416,5 | 70,00 | 76,75 | 8,80 | 7,63 |
| 26/05/2006 | 12634 | 416,5 | 72,00 | 76,98 | 6,47 | |

5.2 Simulaciones en régimen impermanente

Con respecto a las simulaciones en régimen impermanente, los limnigramas calculados reproducen adecuadamente los observados en PSM y ROS. En la **Figura 8** se presentan los limnigramas calculados y observados, en las estaciones hidrométricas mencionadas, conjuntamente con el hidrograma de entrada al tramo. En dicha Figura se puede apreciar que los ajustes logrados son muy satisfactorios. En efecto, para cuantificar el grado de ajuste en ambas estaciones (PSM y ROS) se calcularon los coeficientes de Nash-Sutcliffe (1970):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [z_w(i \Delta t)_{obs.} - z_w(i \Delta t)_{calc.}]^2}{\sum_{i=1}^N [z_w(i \Delta t)_{obs.} - \bar{z}_{w_{obs.}}]^2} \quad (10)$$

donde, $\bar{z}_{w_{obs.}}$ es el valor medio de los niveles hidrométricos z_w , observados en un intervalo de tiempo $N\Delta t$.

Este coeficiente puede variar en un rango desde $-\infty$ a 1. $E=1$ corresponde a un ajuste perfecto entre niveles calculados y observados. $E=0$ indica que los niveles simulados por el modelo son tan precisos como la media de los valores observados, mientras que, $-\infty < E < 0$ indica que la media observada es mejor que la simulación del modelo.

En definitiva, cuando el coeficiente E más se acerca a la unidad, mejor es la concordancia entre valores calculados y observados. Para ambas estaciones los valores obtenidos fueron cercanos a la unidad, $E=0,987$ (PSM) y $E=0,991$ (ROS).

Los caudales de entrada al tramo han sido adecuadamente especificados a partir de la curva z_w -Q obtenida con los datos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación para el período 2000-2014. En efecto, se observa una diferencia no significativa del 1,8 % entre el caudal estimado con la curva z_w -Q para el día 21/12/2004 (19927 m³/s) y el aforado por FICH (2004) en la misma fecha (19570 m³/s).

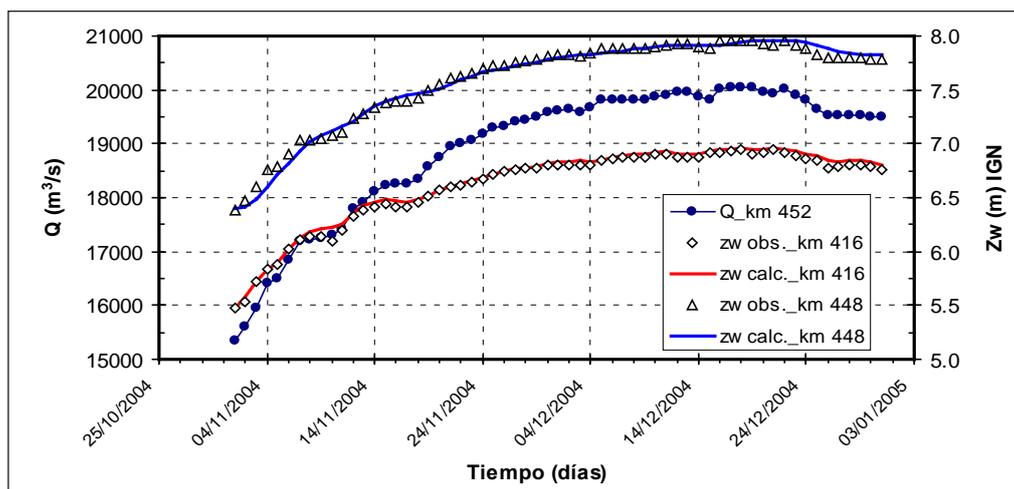


Figura 8.- Caudal en función del tiempo, en entrada (km 452), y comparación de limnigramas observados y calculados en km 416 (Hidrómetro Rosario) y km 448 (Hidrómetro Puerto San Martín).

Para la misma simulación de noviembre a diciembre de 2004 (régimen impermanente), en la **Figura 9** se presenta el nivel del lecho (z_b) y la evolución

temporal del nivel hidrométrico calculado (z_w), ambos en (m) y referidos al IGN; en función de la progresiva longitudinal. En dicha Figura, PSM (km 448) y ROS (km 416) se ubican en las progresivas longitudinales +4000 m y +36000 m respectivamente.

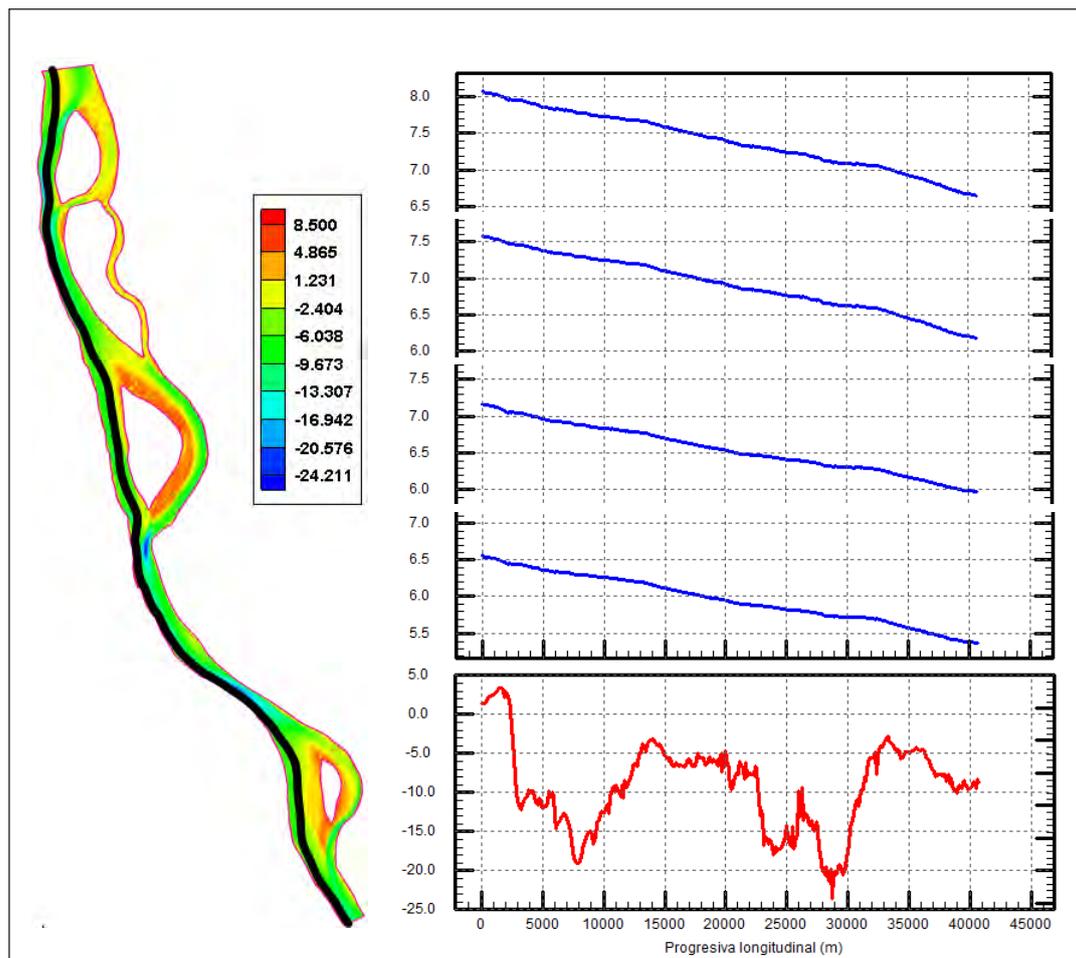


Figura 9.- Nivel del lecho (z_b) y nivel del agua (z_w), ambos en (m) IGN, en función de la progresiva longitudinal (a lo largo del perfil indicado a la izquierda), correspondiente a la simulación de noviembre y diciembre de 2004. Desde abajo hacia arriba (derecha): z_b , z_w (t=1 día), z_w (t=7 días), z_w (t=15 días) y z_w (t=45 días).

6. CONCLUSIONES

Se ha implementado el modelo CCHE2D para simular la hidrodinámica, en régimen permanente e impermanente, en un tramo de 42 km (km 410 – km 452) del río Paraná. Los caudales aforados, utilizados para las simulaciones en régimen permanente y los caudales especificados en la simulación en régimen impermanente, barren todo el rango de duraciones que se observa en la curva de duración de caudales de Puerto San Martín (PSM, km 448). De esta manera, se ha caracterizado el comportamiento hidrodinámico para condiciones de aguas bajas, medias y altas del río.

Los resultados del modelo hidrodinámico han sido contrastados con mediciones de caudales con ADCP y con niveles hidrométricos registrados en el hidrómetro de Rosario (ROS, km 416) y Puerto San Martín (PSM, km 448). El modelo ha representado satisfactoriamente la dinámica del flujo en el tramo estudiado, tanto en régimen permanente como impermanente; ya sea en lo que concierne a la reproducción de niveles hidrométricos, pendientes de la superficie libre, profundidades de flujo, distribución de velocidades y caudales específicos en secciones transversales, como así también, en lo que respecta a la representación de los porcentajes del caudal total que son derivados en las bifurcaciones del cauce.

En las simulaciones en régimen permanente, el error relativo de los niveles hidrométricos calculados respecto a los observados, varía entre 0,12 % y 1,87 % en PSM (km 448) y entre 0,12 % y 1,34 % en ROS (km 416). Mientras que, los errores relativos promedio para aguas bajas, medias y altas son 0,59 %, 0,2 % y 1 % en PSM y 0,96 %, 0,45 % y $\pm 0,37$ % en ROS, respectivamente. Los errores relativos promedio, correspondientes a las pendientes de la superficie libre, son del $\pm 5,4$ % para aguas bajas, $-1,6$ % para aguas medias y ± 10 % para aguas altas. Los errores relativos promedio, entre valores calculados y observados, de caudal específico y profundidad de flujo (S4-C1R5, km 429), son iguales a ± 5 % y $\pm 4,4$ %, respectivamente.

Los porcentajes del caudal total, que son derivados en las cuatro bifurcaciones del cauce analizadas, son reproducidos adecuadamente. Los errores relativos promedio, entre valores calculados y observados, son iguales a 4,36 %, $\pm 1,81$ %, $\pm 2,36$ % y 7,63 %, para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5, respectivamente.

En relación a las simulaciones en régimen impermanente, los limnigramas calculados reproducen satisfactoriamente a los observados en PSM y ROS. En efecto, los valores obtenidos del coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), para ambas estaciones, fueron cercanos a la unidad: $E=0,987$ (PSM) y $E=0,991$ (ROS).

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID 19-1368, 19-1358, ING509 e ING514 y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos-hidráulicos facilitados.

BIBLIOGRAFÍA

Amsler, M.L. y Drago, E. 1999. A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay rivers. Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale rivers. Manaus, Brazil.

Basile, P.A.; Riccardi, G.A.; Zimmermann, E.; Stenta, H.; Bussi, P. y Mangiameli, P. 2013. Aprovechamiento del Río Carcarañá-Tercero como Vía Fluvial Navegable. Parte I: Diseño del Sistema de Transporte y de la Vía Fluvial. Cuadernos del CURIHAM, 19 (2013), 51-69.

De Vries, M. 1993. River Engineering. Publication F10, Faculty of Civil Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, Holanda.

Di Silvio, G. 1992. Modelling Sediment Transport under Different Hydrological and Morphological Circumstances. Dynamics of Gravel-Bed Rivers. Edit. P. Billy, R.D. Hey, C.R. Thorne y P. Tacconi. J. Wiley & Sons Ltd.

FICH, 2004. Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de La Invernada, Río Paraná. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – UNL, Diciembre 2004.

FICH, 2006. Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de La Invernada. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – UNL, Julio 2006.

García M.; Basile, P.A.; Riccardi, G. y Rodríguez, J.F. 2015. Modelling extraordinary floods and sedimentological processes in a large channel-floodplain system of the Lower Paraná River (Argentina). International Journal of Sediment Research, 30(2), 150-159.

Guerrero, M. y Lamberti, A. 2012. Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paraná. International Journal of Sediment Research, 28 (4), 458-469.

Habersack, H. y Haspel, D. 2012. Sediment loads and processes in large rivers. International Journal of Sediment Research, 28 (4) I.

James L.A. y Marcus, W.A. 2006. The human role in changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect. Geomorphology, 79 (2006), 152–171.

- Jia, D., Shao, X., Wang, H. y Zhou, G. 2010. Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River. *Advances in Water Resources*, 10.1016/j.advwatres.2010.01.002, 348-360.
- Jia, Yafei y Wang, Sam S.Y. 2001. CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2001-01, Ago. 2001.
- Matthies, M.; Giupponi, C. y Ostendorf, B. 2007. Environmental Decision Support Systems: Current Issues, Methods and Tools. *Environmental Modelling & Software*, 22 (2), 123-127.
- Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.
- Neal J., Fewtrell T. y Mark T. 2009. Parallelisation of storage cell flood models using OpenMP. *Environmental Modelling & Software*, 24 (7) 872-877.
- Nicholas, A.P.; Sandbach, S.D.; Ashworth, P.J.; Amsler, M.L.; Best, J.L.; Hardy, R.J.; Lane, S.N.; Orfeo, O.; Parsons, D.R.; Reesink, A.J.H.; Sambrook Smith, G.H. y Szupiany, R.N. 2012. Modelling hydrodynamics in the Rio Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced-complexity and physics based models applied to a large sand-bed river. *Geomorphology*, 169–170 (2012), 192–211.
- Lewin, J. y Ashworth, P.J. 2014. Defining large river channel patterns: Alluvial exchange and plurality. *Geomorphology* 215 (2014) 83–98.
- Parker, G. 2006. Summer short course on Environmental Fluid Mechanics: Theory, Experiments and Applications. Karlsruhe, Germany, June 12-23, 2006. Basic data on bankfull characteristics of sand-bed rivers (<http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg>).
- Rolim da Paz, A.; Collischonn, W.; Tucci, C.E.M. y Padovani, C.R. 2011. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal, Brazil. *Hydrological Processes*, 25 (9), 1498-1516.
- Ryskin, G. y Leal, L.G. 1983. Orthogonal mapping. *Journal of Computational Physics*, 50(1), 71-100.
- Sandbach, S.D., Hardy, R.J., Lane, S.N., Parsons, D.R., Best, J.L., Ashworth, P.J., Reesink, A.J.H., Amsler, M.L., Szupiany, R.N., Nicholas, A.P., Orfeo, O., Sambrook Smith, G.H. 2010. Three-dimensional modelling of a very large river: the Rio Paraná. *River Flow 2010*: In: Dittrich, A., Koll, Ka., Aberle, J., Geisenhainer, P. (Eds.), Bundesanstalt fuer Wasserbau, 409–417.
- Tung T. Vu; Phuoc K.T. Nguyen; Lloyd H. C. Chua y Adrian W. K. Law 2015. Two-Dimensional Hydrodynamic Modelling of Flood Inundation for a Part of the Mekong River with TELEMAC-2D. *British Journal of Environment & Climate Change*. 5(2), 162-175, 2015, Article N° BJEECC.2015.013.
- Werner, M.G.F., Hunter N.M. y Bates P.D. 2005. Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *Journal of Hydrology*, 314 (2005) 139–157.
- Wilkerson, G.V. y Parker, G. 2011. Physical Basis for Quasi-Universal Relationships Describing Bankfull Hydraulic Geometry of Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (7), 739–753.
- Wilson, M., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., Frappart, F. and Famiglietti, J. 2007. Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophysical Research Letters*, 34 (15).
- Zhang, Yaoxin 2006. CCHE-GUI: Graphical User Interface for CCHE2D Model. Users Manual - Version 3.0. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2006-02, Oct. 2006.
- Zhang, Yaoxin y Jia, Yafei 2009. CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator. Users' Manual - Version 3.0. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2009-01, Feb. 2005.
- Zhou, G., Wang, H., Shao, X. y Jia, D. 2009. Numerical model for sediment transport and bed degradation in the Yangtze River channel downstream of Three Gorges reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 729–740.

INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS WEAP Y QUAL2K PARA LA SIMULACIÓN DE LA CALIDAD AGUA DE FUENTES SUPERFICIALES. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO LA VIEJA, COLOMBIA

INTEGRATION OF WEAP AND QUAL2K MODELS FOR THE SIMULATION OF WATER QUALITY SURFACE SOURCES. CASE STUDY: LA VIEJA RIVER BASIN, COLOMBIA

Jaramillo, María Fernanda¹; Galvis, Alberto¹; Escobar, Marisa²; Forni, Laura²; Purkey, David²; Siebel, Jack Siebel²; Lozano, Gabriel³; Rodríguez, Cesar³; Castaño, Juan⁴; Sabas, Carlos⁴

Resumen

En esta investigación se evaluó el impacto de las aguas residuales domésticas y agroindustriales en la cuenca del río La Vieja, Colombia, considerando como factores para la evaluación el crecimiento poblacional, el desarrollo agroindustrial y los efectos de la variabilidad y el cambio climático. La evaluación de la calidad del agua se logró mediante la integración de las herramientas de modelación WEAP (Water Evaluation And Planning System) y QUAL2K, que permitió realizar el análisis dendrítico (sistema ramificado de 11 fuentes hídricas que tributan al cauce principal) del comportamiento de la cantidad y la calidad del agua del río La Vieja. La cuenca del río La Vieja se localiza al centro sur de Colombia, con una extensión aproximadamente de 2.880 km². Las principales ventajas de la integración de los modelos corresponden a la posibilidad de modificar la cinética de degradación de los contaminantes por tramo de río en el modelo QUAL2K y la dinamización de los resultados de este modelo en pasos de tiempo mensual, beneficio que aporta el modelo de planificación WEAP. La integración de modelos tuvo como resultado principal la identificación del comportamiento espacio temporal de los parámetros de calidad del agua Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Temperatura (T) en una escala de agregación mensual en el año de línea base considerado como 2011 y la evaluación de la implementación de dos estrategias de control de la contaminación hídrica: sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de tratamiento anaerobio para la remoción de carga orgánica en el beneficio del café. Los valores de concentración de DBO no superan los 5 mg/L en el escenario de línea base. La concentración de OD se encontró entre 4 y 9.5 mg/L. Los resultados obtenidos, representan el comportamiento del río La Vieja, que cumple con la normatividad local para los usos actuales del agua.

Palabras claves: Integración de modelos, WEAP, QUAL2K, Calidad del Agua, Río La Vieja-Colombia.

Abstract

In this research we evaluate the domestic and agro-industrial sewage water impact on "La Vieja" river basin, Colombia, considering as factors to evaluate: Population growth, agro industrial development, climate variability effects and climate changes. Water quality evaluation was achieved through the integration of the modeling WEAP (Water evaluation and planning system) and QUAL2K, this allowed to make the dendritic analysis (analysis of 11 tributaries and of the main stem of the river) of the quantity and quality dynamic of the La Vieja river. La Vieja river basin is located in the south center of Colombia. It is approximately 2.880 km². The main advantages of the models integration are: The possibility to modify the degradation of the kinetic of the pollutants by elements of the river in the QUAL2K model and that it was possible to have results of QUAL2K in monthly time steps dynamically, benefit that it is provided by the WEAP model. The models integration had as a main result the identification of the space - time performance of the quality parameters of the water quality OD, DBO5 and temperature in a scale of monthly aggregation in the base line year considered as 2011 and the evaluation of the implementation of two water contamination control strategies such as: Sewage water treatment systems and anaerobe treatment systems for the removal of organic load in coffee profit. The BOD concentration values do not exceed 5 mg / L in the baseline scenario. OD concentration was between 4 and 9.5 mg/L. The results represent the behavior of La Vieja river, which meets the local regulations for current uses of water

Key words: Models Integrations, WEAP, QUAL2K, Water Quality, La Vieja river, Colombia.

¹ Investigador Instituto CINARA, Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. maria.f.jaramillo@correounivalle.edu.co, alberto.galvis@correounivalle.edu.co

² Investigador Senior, Instituto SEI, Davis, California, Estados Unidos. marisa.escobar@sei-us.org

³ Investigador Grupo CIDERA, Universidad del Quindío, Colombia. galozano@uniquindio.edu.co

⁴ Investigador Grupo EIS, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. jmc@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de la calidad de los recursos hídricos superficiales en las cuencas colombianas se ha incrementado debido a la disposición de aguas residuales de origen doméstico y agroindustrial sin considerar los objetivos de calidad de los cuerpos hídricos receptores (MAVDT, 2010). Bajo el marco normativo colombiano, los objetivos de calidad de los cuerpos hídricos deben ser determinados por las Autoridades Ambientales mediante el desarrollo del instrumento de planificación "Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico". En la cuenca del río La Vieja en Colombia, la contaminación hídrica de las fuentes superficiales es causada de manera similar por disposición de aguas residuales de origen doméstico y agroindustrial y los objetivos de calidad del agua para esta fuente, no han sido definidos al año 2015.

La cuenca del río La Vieja se localiza en el centro occidente de Colombia, forma parte de la Ecorregión del Eje Cafetero y tiene una extensión de 2.880 km²

que abarcan los departamentos Quindío (68%), Valle del Cauca (22%) y Risaralda (10%) (Figura 1). En función de los parámetros climatológicos y de acuerdo con la caracterización realizada por CRQ *et al.*, (2008), la cuenca del río La Vieja presenta un comportamiento bimodal de la precipitación característico de la zona andina como consecuencia de la convergencia intertropical con dos periodos húmedos (marzo-abril-mayo y octubre-noviembre-diciembre) y dos periodos secos (enero-febrero y junio-julio-agosto-septiembre). La precipitación media anual multianual corresponde a 2.072 mm/año, con precipitaciones máximas de 2.400 mm/año y mínimas de 1.700 mm/año. Respecto a la temperatura, esta puede oscilar entre los 4°C en zonas con elevación superior a los 4.000 m.s.n.m y 24°C en zonas con elevación aproximada a los 950 m.s.n.m. El gradiente de este parámetro respecto a la elevación corresponde a una disminución de 0,87 °C por cada 100 m.s.n.m.



Figura 1. Localización zona de estudio

El rendimiento hídrico de toda el área de drenaje del río La Vieja (2.880 km²) fue estimado en 34 L/s-km² con una oferta hídrica de 2.975 Mm³/año. El mayor aportante de oferta hídrica dentro del sistema corresponde a la subcuenca del río Quindío (277 km²) con una oferta hídrica de 187 Mm³/año y rendimiento específico de 21 L/s-km². El menor aportante corresponde a la cuenca de la quebrada El Loro (7 km²) con una oferta hídrica de 4,57 Mm³/año y un rendimiento específico de 18 L/s/km² (CRQ *et al.*, 2008).

En función de la magnitud de los vertimientos de aguas residuales domésticas, se realizó en esta investigación, un análisis a los Programas de Saneamiento y Manejo de Vertimientos de los municipios ubicados en la cuenca del río La Vieja, en el cual se identificó que el 87% de la carga contaminante que genera el sector doméstico (7,5 ton DBO₅/día), se destina sin tratamiento a fuentes hídricas superficiales. El 13% restante, que corresponde a 1,2 ton DBO₅/día, se destina a las fuentes hídricas superficiales luego de realizarse

únicamente un tratamiento a nivel primario para la remoción de sólidos.

En el sector agroindustrial el aporte de carga contaminante al río La Vieja corresponde al 45 % (7,5 ton DBO₅/día), de los cuales el 31% (2,3 ton DBO₅/día) es proveniente del sector cafetero. Ambos sectores doméstico y agroindustrial aportan 95% de la contaminación puntual al río La Vieja. Razón por la cual se hace necesaria la evaluación de estrategias de prevención y control de la contaminación hídrica enfocadas en estos sectores.

Debido a la situación anterior, este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la generación y disposición de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas en la calidad del agua del río La Vieja y once de sus principales afluentes, a través de la integración de los modelos QUAL2K y WEAP. Esta integración de modelos se realiza por primera de forma dendrítica para más de 4 fuentes tributarias a un cauce principal y mediante la utilización de un modelo hidrológico para la cuenca del río La Vieja, previamente desarrollado en WEAP.

Este artículo presenta los resultados de la integración de los modelos WEAP y QUAL2K desarrollada de manera conjunta entre el SEI y el Instituto Cinara de la Universidad del Valle. La relevancia de esta investigación corresponde la construcción de una herramienta de modelación integrada de los dos modelos de simulación, en el caso de estudio de la cuenca del río La Vieja en Colombia. Con los modelos integrados fue posible evaluar el comportamiento de la calidad del agua superficial del río La Vieja y de 11 de sus principales afluentes. Los parámetros evaluados correspondieron al caudal, mediante el desarrollo de un modelo hidrológico y de demanda, la DBO₅, el OD y la T.

La integración de los modelos permitió dinamizar la escala temporal de las simulaciones que se realizan con el modelo QUAL2K obteniendo resultados de cantidad y calidad en WEAP para cada paso de tiempo, mientras que el modelo QUAL2K permitió una modelación de tipo dendrítico y en la cual la cinética de degradación de los parámetros modelados pudo ser modificada según las condiciones físicas del sistema.

3. METODOLOGÍA

La evaluación del impacto de las aguas residuales domésticas e industriales se realizó mediante la integración del modelo WEAP en su versión más actualizada y QUAL2K (versión 2.07). En función de los modelos empleados, el modelo QUAL2K es un modelo para el análisis del comportamiento de la calidad del agua, respaldado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). Este modelo considera el flujo de agua como unidimensional y permanente. Para la simulación del transporte de sustancias contaminantes QUAL2K emplea el balance de calor y temperatura en función de datos meteorológicos horarios, introducidos en un espacio de ciclo diario.

El QUAL2K simula sistemas hídricos de tipo dendrítico y el cauce es considerado completamente mezclado horizontal y verticalmente. El modelo acepta entradas puntuales y no puntuales (distribuidas) de cargas contaminantes y caudales. La fuente hídrica simulada es representada como una sucesión de tramos o segmentos llamados elementos computacionales, a través de los cuales se efectúan los correspondientes balances de masa, flujo y calor (EPA, 2013). Así mismo, el programa QUAL2K utiliza dos formas para representar el carbono orgánico, siendo éstas: DBO rápida y DBO lenta. Además, simula condiciones de anoxia reduciendo a cero las tasas de oxidación. Para procesos de denitrificación el modelo emplea una reacción de primer orden (Chapra, 2008).

El modelo QUAL2K ha sido empleado ampliamente para estudiar el comportamiento de la calidad del agua de fuentes superficiales en diferentes partes del

mundo. Algunas de sus aplicaciones en el contexto de la evaluación de impactos y toma de decisiones frente a una gestión integral del recurso hídrico han sido desarrolladas. Zainudin *et al.*, (2010) realizó la evaluación de la calidad del agua del río Tebrau para analizar la influencia de los vertimientos industriales y la implementación de diferentes estrategias de saneamiento como parte del plan de gestión de su cuenca.

Pai *et al.*, (2010) realizó la evaluación del impacto del tratamiento de agua residual tratada con sistemas ecológicos de la ciudad de Taichung, Taiwan, utilizando la modelación del cuerpo hídrico antes y después de la implementación de los sistemas. El QUAL2K también ha sido usado para analizar la calidad del agua, bajo el impacto de la implementación de reuso de efluentes provenientes de canales agrícolas en Egipto (Rashed y El-Sayed, 2014)

El modelo WEAP es considerado como una herramienta de planificación integrada de recursos hídricos, que puede ser implementada para representar las condiciones actuales de un sistema hídrico (superficial o subterráneo) en un área determinada. WEAP es usado para evaluar la demanda y opciones de suministro incorporando los objetivos ambientales y normativos del contexto específico de análisis (Yates *et al.*, 2005). Mediante WEAP es posible evaluar los impactos futuros de un sistema a través de la modelación de escenarios. Esta capacidad de WEAP contribuye a enfrentar uno de los retos más complejos de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), que es la planificación de los recursos con una visión a largo plazo y mediante una evaluación integrada de diferentes alternativas de gestión. Esta visión de WEAP ha permitido apoyar la planificación de los recursos hídricos, proporcionando un análisis común y un marco de gestión de información que permite involucrar a diferentes actores y tomadores de decisiones en un proceso de planificación abierto (Phurisamban, 2014).

El fundamento conceptual del modelo WEAP es el principio básico de balance de masa. A través de este principio se puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de los sistemas hídricos, incluyendo análisis hidrológicos lluvia-escorrentía, recarga potencial de los acuíferos por precipitación, generación de energía hidroeléctrica y calidad del agua (Vicuña *et al.*, 2009). Por medio de rutinas programadas en WEAP, es posible evaluar de manera integrada los componentes citados y otra variedad de elementos de análisis para la planeación y evaluación de los recursos hídricos, como son instrumentos normativos de un contexto específico y escenarios de cambio climático.

La herramienta WEAP, también ha sido diseñada para ser integrada con otros modelos de simulación, permitiendo con esto realizar análisis de tipo robusto. En la evaluación de la calidad del agua WEAP puede ser integrado con el Modelo QUAL2K. La principal ventaja del desarrollo de integración entre estos dos modelos, ha sido la simulación continua de WEAP, permitiendo realizar análisis de resultados para cada paso de tiempo continuo en todo el horizonte de evaluación (Yates *et al.*, 2005).

Para la calidad del agua, el modelo WEAP puede modelar contaminantes conservativos y no conservativos. Contaminantes conservativos son modelados a través de un balance de masa y los contaminantes no conservativos son modelados con diversos métodos que son incorporados en WEAP. Los parámetros que son posibles modelar con WEAP son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura (T), sales y Sólidos Suspendidos Totales (SST). A través de la conexión entre los modelos WEAP y QUAL2K, es posible modelar un grupo al menos 20 parámetros de calidad de agua de forma simultánea (Yates *et al.*, 2005). Recientemente se desarrolló un Sistema

de Soporte a la Decisión (DSS) para la toma de decisiones y para la evaluación de la calidad del agua de la cuenca del río Litani, en el marco de los planes nacionales de gestión del agua en el Líbano. El análisis de calidad del agua se realizó mediante el uso de las rutinas de calidad del agua en WEAP, para OD y DBO₅ desarrolladas por Chapra (2008). El modelo desarrollado permitió evaluar el impacto de diferentes sistemas de tratamiento de agua municipales bajo diferentes escenarios de clima (Assaf y Saadeh, 2008).

La primera integración de los modelos WEAP y QUAL2K se realizó en el año 2007, permitiendo modelar hasta 4 fuentes hídricas de manera simultánea, debido a la limitación del modelo QUAL2K en su versión 2.04. Bajo la presente investigación, en el año 2013-2014 se desarrolló la integración computacional de la versión más reciente del modelo WEAP y el modelo QUAL2K en su versión V.2.07, que permitió modelar de manera simultánea hasta 12 fuentes hídricas.

El esquema metodológico de la modelación de calidad de agua, mediante la integración de los modelos, se presenta en la Figura 2.

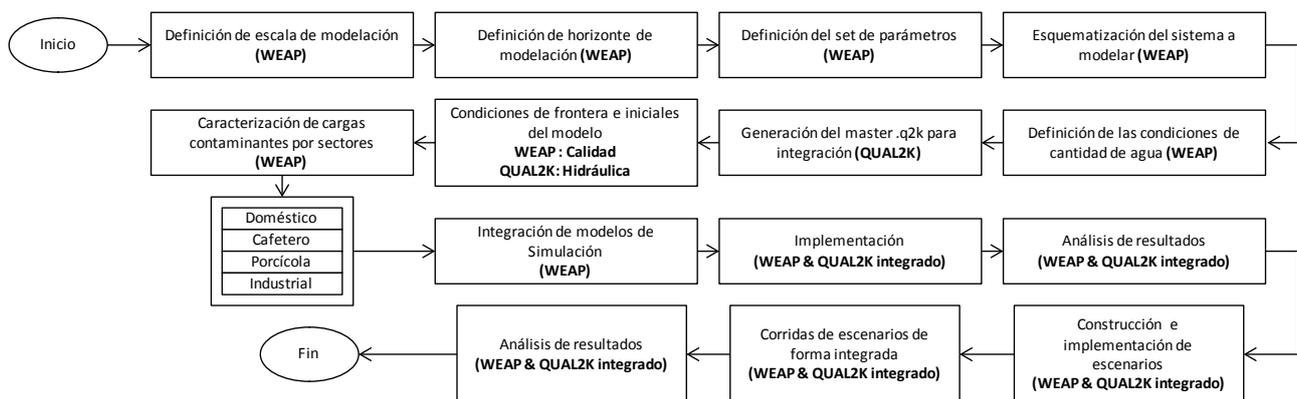


Figura 2.- Esquema metodológico de integración de modelos WEAP y QUAL2K

El primer paso consistió en la definición de la escala temporal de análisis a paso de tiempo mensual. La caracterización de la cantidad de agua y la demanda hídrica del sistema fue desarrollada con base en la modelación hidrológica del río La Vieja, realizada por Lozano *et al.*, (2015), que empleó tres puntos de monitoreo de caudal, para la comparación entre las simulaciones realizadas y los registros históricos. La selección de escala de tiempo mensual, para la calidad de agua, fue coherente con la escala temporal del modelo hidrológico empleado en WEAP. Adicionalmente los registros históricos de calidad de agua corresponden a monitoreos puntuales, suministrados por la Autoridades Ambientales,

representan el comportamiento típico de cada paso de tiempo mensual simulado.

En la caracterización de la cantidad de agua se realizaron dos modelos, un modelo histórico que fue calibrado y validado para un periodo comprendido entre 1970 y 2010 y un modelo "futuro" para análisis de escenarios en el periodo comprendido entre 2011 y 2050. Para la modelación de la calidad de agua se empleó el modelo "futuro" de cantidad y demanda de agua desarrollado por Lozano *et al.*, (2015). El año de línea base para la modelación de calidad fue el 2011, que permitió el uso de información existente (Tabla 1) para una calibración preliminar

Tabla 1. Fuentes de información para la calidad del agua en la cuenca del río La Vieja.

| Fuente de información | Descripción | Parámetros monitoreados | Periodo y frecuencia de monitoreo |
|--|--|--|--|
| CVC, UTP y Aguas y Aguas | Muestreos históricos de calidad en el cauce principal del río La Vieja y río Consota | DBO, OD, pH, T, SST, Nitratos, Sulfatos, Fosfatos, Coliformes, Dureza, Turbiedad | Periodo: 2006 - 2010 Frecuencia: muestreo semestral (invierno-verano) |
| Universidad del Quindío <i>et al.</i> , (2012) | Histórico de muestreos de calidad en el cauce principal del río Consota | DBO, SST, pH, T, Coliformes | 2007 - 2010 |
| Universidad del Quindío <i>et al.</i> , (2012) | Programa de monitoreo de la cantidad y la calidad del recurso hídrico. | DBO, SST, pH, T OD, Coliformes totales y fecales | Periodo: 2011 Frecuencia: Seguimiento de masa de agua mediante monitoreo de 57 puntos |

La estimación de cargas contaminantes por sectores productivos se realizó con base en la revisión de literatura y algunas caracterizaciones de vertimientos realizada por la Universidad del Quindío *et al.*, (2012). Las cargas contaminantes del sector cafetero se estimaron con base en la metodología desarrollada por Comité de Cafeteros y CVC (2012). Todos los vertimientos fueron representados en WEAP como cargas puntuales, que fueron localizadas de forma distribuida en la cuenca según su ubicación en las diferentes subcuencas y su aporte a los afluentes.

Los criterios considerados para la determinación de cargas fueron específicos para cada sector productivo. Para el sector doméstico se consideró la población de cada municipio y la carga contaminante generada por habitante/día. Para el sector industrial se consideraron las auto declaraciones de carga contaminante vertida en los cuerpos hídricos, que realizan las industrias a las autoridades ambientales y para los sectores cafetero y porcícola: se consideraron los periodos de producción, las cargas contaminantes por unidad productiva y la producción de cada sector. En el sector cafetero se consideró el manejo que los caficultores colombianos realizan a los subproductos del café. Los parámetros de calidad del agua definidos para esta investigación correspondieron a DBO₅, OD y Temperatura.

El sistema hídrico modelado se consideró de tipo dendrítico con 11 afluentes al río La Vieja, que corresponde al cauce principal. La esquematización para la modelación de calidad se realizó en el componente de modelación hidrológica en WEAP. Para la esquematización se consideraron dos características hidrológicas: i) la red de drenaje que considera 150 áreas de drenaje (denominadas catchments en el modelo WEAP) y ii) la elevación de la media de la cuenca que determina la dirección

de flujo del agua desde el terreno al cauce de modelación.

Para la esquematización de la zona de estudio en WEAP, se emplearon coberturas cartográficas correspondientes al límite de la cuenca del río La Vieja, las subcuencas, coberturas de suelo, los límites departamentales, las cabeceras municipales, la red hídrica y el modelo digital de terreno. Para la caracterización hidráulica se emplearon secciones transversales del río La Vieja y de sus principales tributarios. Con esta información y datos de aforos de la zona se obtuvieron las relaciones caudal-profundidad-ancho de cada fuente a simular por tramos.

Una vez realizada la caracterización de la calidad y la cantidad de agua en WEAP, se desarrolló la esquematización en QUAL2K (V.2.07) que permitió la integración de los modelos de simulación. Para la integración de los modelos de manera computacional, se modificó el código de programación de WEAP que permitió la lectura de los datos hidroclimáticos como condiciones de frontera desde el WEAP para ser migrados al modelo QUAL2K.

Para el análisis de escenarios de calidad de agua frente al cambio climático, el horizonte de modelación se definió con el modelo "futuro" desarrollado para el periodo 2011 y 2050, que permitió analizar escenarios de cambio climático construidos específicamente para la zona de estudio con el apoyo del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés).

Otros escenarios para la evaluación del impacto de las aguas residuales en la cuenca del río La Vieja fueron construidos mediante la implementación del análisis XLRM, el cual es una metodología para la identificación y construcción del problema asociado al manejo de los recursos hídricos.

El XLRM contextualiza, de manera participativa, el problema, sus causas y efectos a través de la caracterización de incertidumbres y estrategias que contribuyen al mejoramiento del sistema físico, que en este caso consiste los recursos hídricos (Valencia *et al.*, 2013). Mediante el desarrollo de 2 sesiones de trabajo con diferentes actores de la cuenca del río La Vieja, se identificaron las incertidumbres (X) y estrategias (L) para la gestión del agua en el contexto local. Mediante el combinatorio de las incertidumbres y estrategias se construyeron los escenarios que fueron simulados bajo la integración de los modelos (R) que permitieron extraer medidas de desempeño (M), que para este caso correspondieron a indicadores de calidad del agua como DBO₅, OD y T.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Línea base de la cantidad de agua

Los resultados de la modelación hidrológica realizada fueron calibrados en WEAP, aplicando dos de las métricas estadísticas planteadas en Moriasi

et al., (2007): i) la métrica de Nash Sutcliffe, que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) en comparación con la variación de datos de medición “información” (Nash y Sutcliffe, 1970) y el estadístico del PBIAS que evalúa el sesgo

midiendo la tendencia media de los datos simulados para ser mayor o menor que sus contrapartes observados (Gupta et al., 1999). La estimación de las métricas descritas se presenta en las ecuaciones [1] y [2].

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,mean})^2} \right] \quad (1)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs})} \right] \quad (2)$$

Donde

$Y_{i,obs}$: caudal observado en el mes i

$Y_{i,sim}$: caudal simulado en el mes i

$Y_{i,mean}$: caudal promedio observado del periodo de análisis

Los resultados de la modelación hidrológica obtenidos por Lozano et al., (2015), sobre la cual posteriormente se realizó la modelación de la calidad del agua, se presentan en la Figura 3. Mediante la estimación de las métricas NASH y PBIAS se observó el buen ajuste de los datos simulados con el WEAP con respecto a

los datos de caudales históricos registrados se en las estaciones hidrométricas Alambrado, Cartago y La Española. Los índices NASH y PBIAS para cada estación respectivamente fueron: Alambrado 0,72 y -5,41; Cartago 0,78 y 2,88 y La Española 0,56 y -22,70.

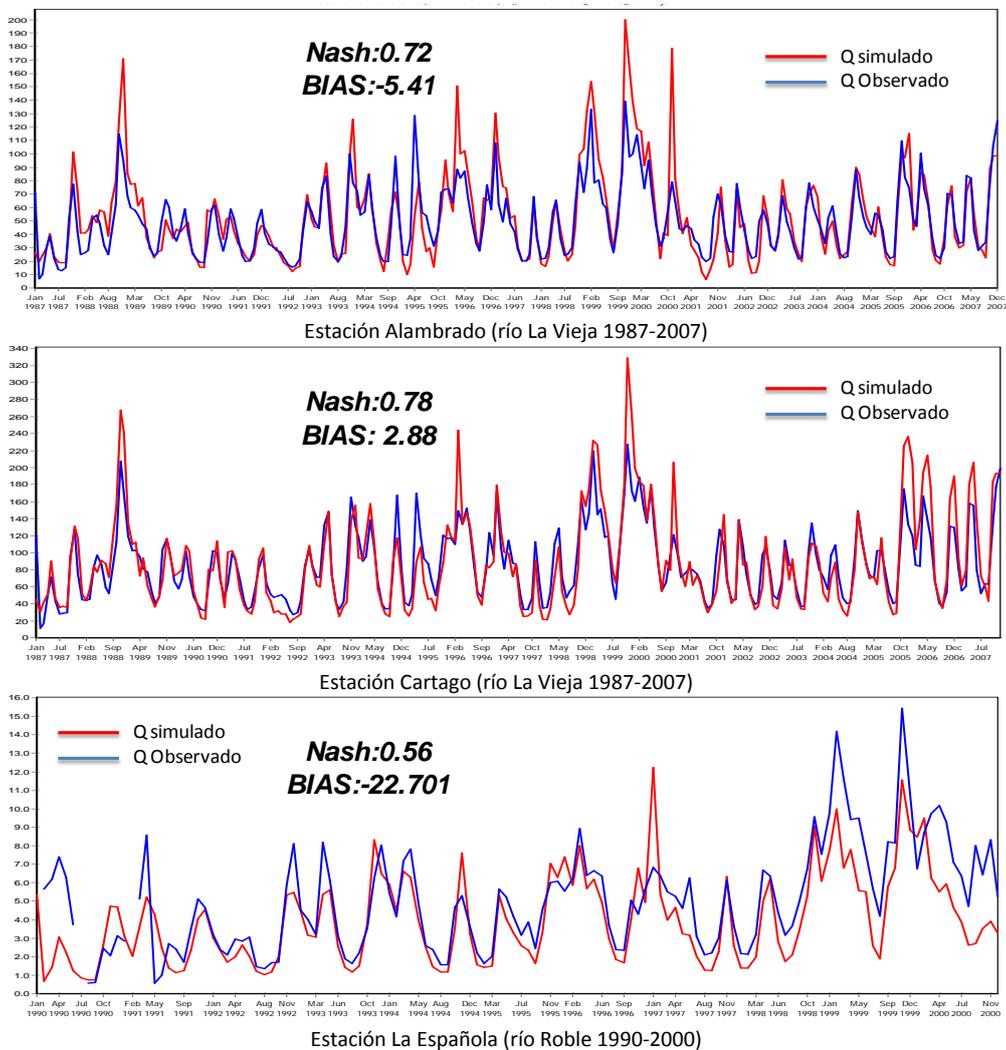


Figura 3.- Calibración del modelo hidrológico en las estaciones Alambrado, Cartago y La Española

4.1. Línea base de la calidad del agua

El sistema dendrítico modelado fue esquematizado y sistematizado en WEAP (Figura 4). Los resultados de la integración de modelos para la línea base,

considerada en el mes de enero del año 2011, se presenta en las Figuras 5 y 6 que corresponden a los perfiles longitudinales para el Caudal, la DBO_5 la T y el OD en el cauce principal del río La Vieja.

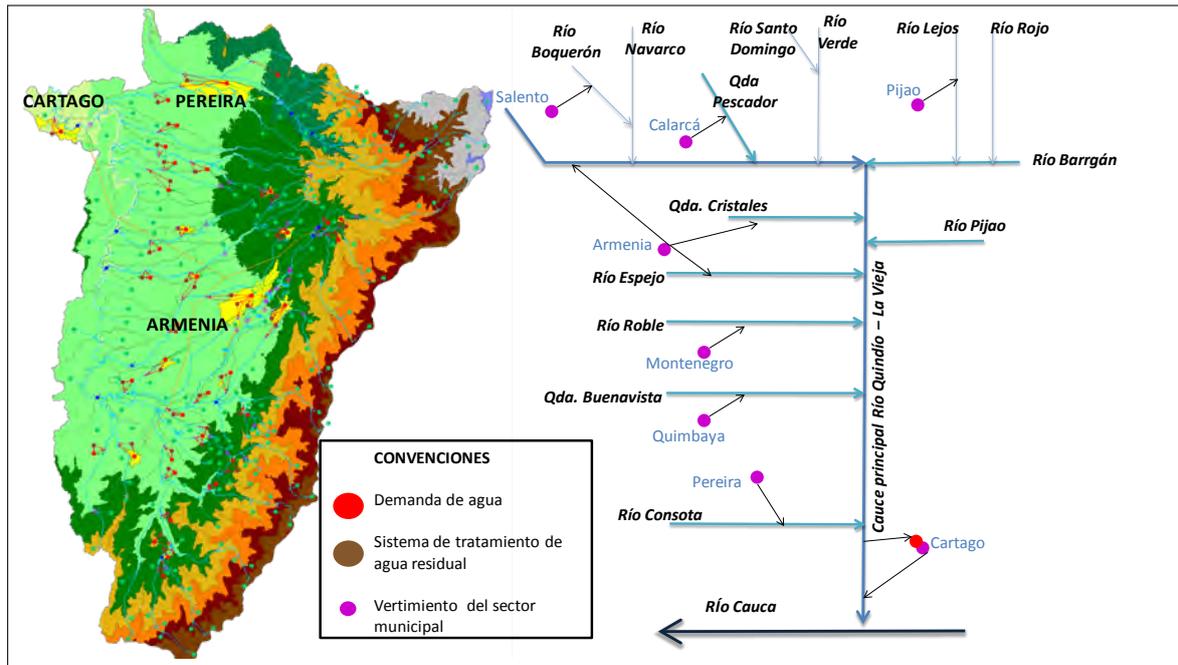


Figura 4.- Esquematación del sistema dendrítico modelado en WEAP

El perfil de la DBO₅ y del OD para el sistema hídrico modelado, y en comparación con las observaciones históricas realizadas, se presenta en la Figura

5-superior. La condición de cantidad y temperatura asociada a las observaciones históricas se presenta en la Figura 5-Inferior.

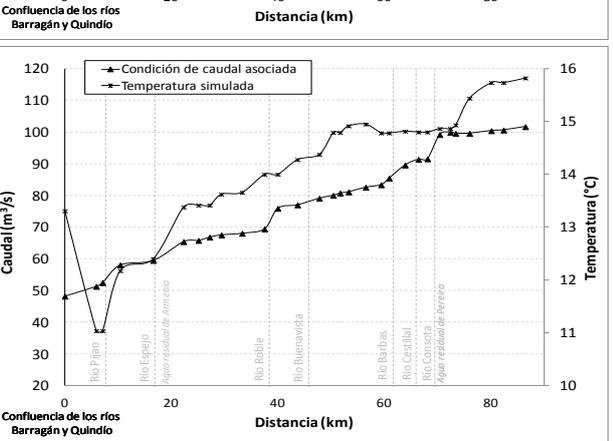
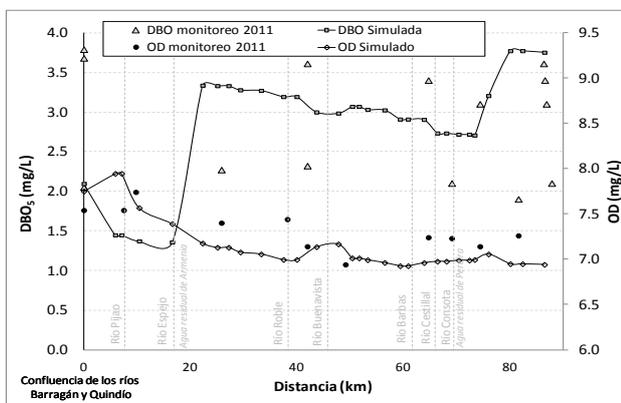


Figura 5.- Perfiles de calidad del río La Vieja. Condición de línea base (Enero 2011). Superior: Perfil de DBO₅ y OD simulado y monitoreado 2011. Inferior: Condición de cantidad y temperatura simuladas, asociadas a las condiciones del monitoreo de enero de 2011

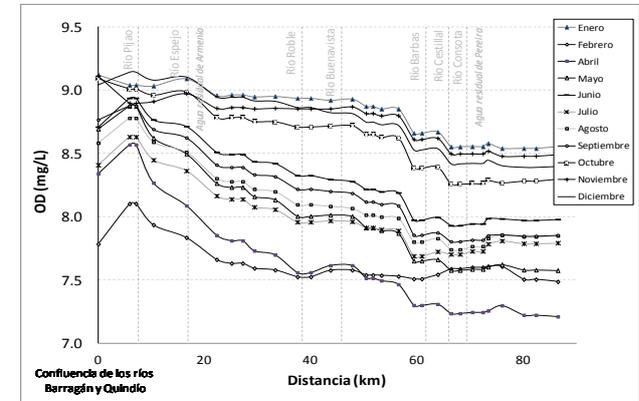
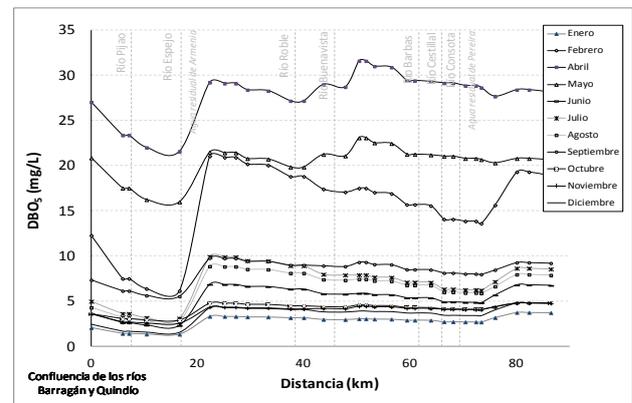


Figura 6.- Variación mensual de la calidad del agua Superior: Perfil de DBO₅ simulada 2011. Inferior: Perfil de OD simulado 2011

En función de la DBO₅, se observó que la modelación representa las condiciones típicas históricas para el cauce principal. Especialmente el primer incremento de la concentración de la DBO₅ se presenta aguas abajo del río Espejo, en el cual se vierten las residuales domésticas de Armenia, aproximadamente a 16,6 km desde la confluencia de los ríos Quindío y Barragán. El segundo incremento de la DBO₅ corresponde al impacto del río Consota, que recibe las aguas residuales del municipio de Pereira, aproximadamente a 72,4 km del nacimiento del río La Vieja. En el total de su tránsito, el río La Vieja incrementa su DBO₅ aproximadamente en 2 mg/L desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca.

De la comparación del perfil de OD simulado respecto a las mediciones históricas puntuales, la modelación representó las condiciones del cauce principal (Figura 5-superior). Especialmente el comportamiento del OD es el esperado, presentando mayor magnitud de concentración hacia el nacimiento del sistema hídrico. A medida que el río es impactado la concentración de OD disminuye en aproximadamente 1 mg/L desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Cauca.

En la Figura 6 se observa la variación espacio-temporal de la DBO₅ y el OD, debido a la dinamización mensual de la simulación con WEAP. La variación mensual de la DBO₅ presenta valores máximos en los meses de abril y mayo, meses en los cuales se realiza la cosecha principal de Café en la región. Esto implica una mayor generación de carga contaminante (2,3 ton DBO₅ /día), dando como resultado el comportamiento de los perfiles simulados (Figura 6-superior).

Los meses de menor concentración de la DBO₅ corresponden a octubre, noviembre, diciembre y enero. En estos meses, aunque se realiza beneficio de café, generando aportes de carga contaminantes al cuerpo receptor, la condición hidrológica favorece a la dilución de la carga contaminante por efecto de la precipitación. En los meses correspondientes a Julio, agosto y septiembre no se realiza beneficio de Café por tanto el aporte de carga contaminante es menor. Sin embargo la condición hidrológica de verano, hace que la contaminación de otros sectores (Doméstico e Industrial) impacte el cuerpo receptor obteniendo el perfil de calidad simulado.

La variación temporal del OD que presenta valores mínimos en los meses de febrero, abril, julio y agosto y valores máximos en los meses de enero, diciembre, octubre y noviembre (Figura 6-inferior). Esto obedece a la variación en el aporte de las cargas contaminantes de los diferentes sectores y al comportamiento climatológico de la zona de estudio.

En todas las simulaciones realizadas para la condición de Línea Base (a escala mensual para el año 2011) se observó el efecto de las descargas de agua residual de los diferentes sectores mediante el aumento de la DBO₅ y disminución del OD en el recorrido del cauce principal del río La Vieja.

4.2 Análisis de escenarios de calidad de agua

Los resultados asociados a la construcción y simulación de escenarios de control de la contaminación hídrica, surgen de la implementación del análisis XLRM, ajustados a cada uno de los componentes de análisis en el sistema de recursos hídricos (cantidad y calidad), donde se identificaron para el estudio de la calidad del agua del río La Vieja, 4 tipos de incertidumbres y 3 estrategias de prevención y control de la contaminación (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del XLRM para la construcción de escenarios de calidad del agua

| XLRM | TIPO / SECTOR | INCERTIDUMBRE / ESTRATEGIA |
|-------------------|-------------------------------|---|
| Incertidumbre (X) | Clima | Variabilidad Climática |
| | | Cambio Climático |
| | Urbano | Cambio demográfico |
| | | Consumo de agua por persona |
| Agrícola | Variabilidad en la producción | |
| Estrategias (L) | Municipio | Implementación de Sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) |
| | Cafetero | Implementación de beneficio ecológico |
| | | Implementación de Sistema modular de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de beneficio de café (SMTA) |

En función de las incertidumbres en esta investigación se desarrollaron 30 escenarios de cambio climático con el apoyo del NCAR, de los cuales 6 fueron priorizados para el caso de estudio, siendo estos representativos del clima histórico analizado y de las condiciones extremas en función de la Temperatura y la Precipitación.

Para este artículo, la calidad del agua fue analizada en el escenario climático con incremento en la precipitación en un 7% y un aumento de temperatura de 1,2 °C respecto al clima histórico. La variabilidad climática del año de referencia 2011 fue considerada con base en el período histórico, como resultado del modelo hidrológico implementado con variaciones bimodales características de la zona de estudio. El cambio demográfico fue considerado bajo 3 posibles valores según las proyecciones del DANE (2005) y el consumo de agua por persona se mantuvo constante para el desarrollo de las simulaciones presentadas en este artículo.

En la identificación de las estrategias de calidad de agua, los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, propuestos por los municipios de la cuenca del río La Vieja, cumplirán con el requerimiento normativo colombiano con una eficiencia de remoción de la DBO₅ del 80%. Los Sistemas de tratamiento anaeróbico identificados para el sector cafetero fueron propuestos con una eficiencia de remoción de DBO₅ del 70% (Roa *et al.*, 2009).

En función de la construcción de las estrategias de control de la contaminación hídrica, en la implementación de Plata de Tratamiento de Aguas Residual (PTAR) para el sector municipal se consideraron 3 elementos: i) año de inicio de

la PTAR, ii) cobertura de la PTAR en función del sistema de recolección de las aguas residuales del municipio y iii) la eficiencia de remoción de la DBO₅. En total fueron considerados 20 municipios en la zona de estudio (Tabla 3).

Tabla 3. Implementación de PTAR en los municipios de la cuenca del río La Vieja

| Municipio | Elemento 1. Implementación PTAR | | | Elemento 2. Aumento de la cobertura | | | Elemento 3. Aumento de la eficiencia | | |
|------------|---------------------------------|------------|-----------|-------------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------|------------|-----------|
| | Año de inicio | Eficiencia | Cobertura | Año | Eficiencia | Cobertura | Año | Eficiencia | Cobertura |
| Caicedonia | 2011 | 88 | 35 | 2015 | 88 | 100 | | | |
| Cartago | 2019 | 50 | 100 | | | | 2033 | 80 | 100 |
| Armenia | 2033 | 80 | 71 | | | | | | |
| Buenavista | 2011 | 70 | 70 | | | | | | |
| Buenavista | 2019 | 80 | 30 | | | | | | |
| Calarca | 2023 | 80 | 52 | | | | | | |
| Calarca | 2023 | 80 | 48 | | | | | | |
| Circacia | 2023 | 80 | 73 | | | | | | |
| Córdoba | 2015 | 80 | 100 | | | | | | |
| Filandia | 2019 | 80 | 19 | | | | | | |
| Filandia | 2019 | 80 | 81 | | | | | | |
| Génova | 2023 | 80 | 100 | | | | | | |
| Montenegro | 2023 | 80 | 10 | | | | | | |
| Montenegro | 2019 | 80 | 90 | | | | | | |
| Tebaida | 2011 | 65 | 70 | 2015 | | 100 | 2015 | 80 | |
| Pijao | 2023 | 80 | 100 | | | | | | |
| Salento | 2011 | 65 | 70 | 2015 | | 100 | 2015 | 80 | |
| Salento | 2011 | | 30 | | | | | | |
| Quimbaya | 2019 | 80 | 100 | | | | | | |
| Pereira | 2018 | 30 | 70 | 2025 | | 100 | 2025 | 80 | |
| Ulloa | 2011 | 80 | 30 | 2015 | 80 | 100 | | | |
| Alcalá | 2023 | 80 | 100 | | | | | | |

En la construcción de la estrategia de implementación de SMTA para el sector cafetero, se consideró la variación temporal de la producción de carga contaminante de acuerdo con el comportamiento de los periodos de beneficio en la región, que corresponden a una cosecha principal en los meses de marzo, abril y mayo y una cosecha menor o mitaca en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Combinadas incertidumbres y estrategias, se obtuvieron 57 escenarios de calidad del agua. Cada escenario fue simulado y comparado con su situación tendencial (condición en la cual no se implementa ninguna estrategia, pero si existe impacto por las incertidumbres) en dos horizontes de evaluación 2019 y 2033 (Figura 7).

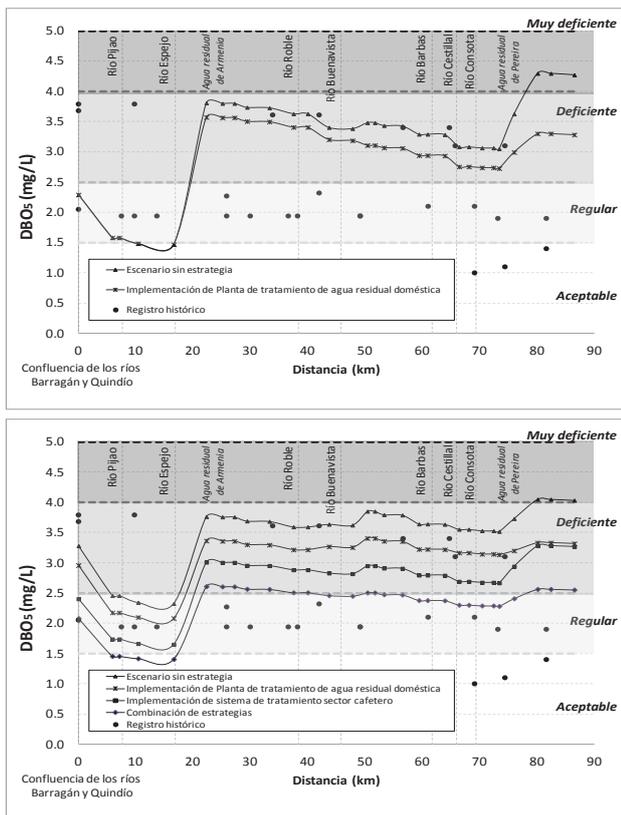


Figura 7.- Evaluación de escenarios en el río La Vieja. Superior: Año de evaluación 2019. Inferior: Año de evaluación 2033.

En la Figura 7-superior se presenta la evaluación de la implementación de PTAR al año 2019. Se observó que tanto la situación tendencial como el escenario de implementación de PTAR presentan un comportamiento similar, sin embargo, la condición de calidad del río La Vieja presenta un incremento luego de su paso por el municipio de Armenia, con un decremento de aproximadamente 0,5 mg /L de DBO_5 . Esta condición de mejora tiende a incrementarse a medida que el cauce del río La Vieja transcurre, recibiendo las aguas residuales tratadas de los 19 municipios restantes.

En la Figura 7-inferior se presenta la evaluación de los escenarios implementados al año 2033. Todos los escenarios presentan la misma tendencia en el comportamiento de la DBO_5 , sin embargo la estrategia combinada entre implementación de PTAR y SMTA presenta el mejor impacto en el cauce principal del río La Vieja, incluso recuperando el río desde una condición catalogada de “Deficiente” a “Regular” para fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, de acuerdo con el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

En la evaluación de las dos estrategias de prevención y control de la contaminación hídrica, se observa un mejoramiento del cauce principal, en función de la DBO_5 , debido a la implementación de estrategias de manera simultánea y a escala de cuenca.

5. CONCLUSIONES

Con la integración de los modelos WEAP y QUAL2K, para la simulación de la calidad del agua de fuentes hídricas superficiales, fue posible evaluar el impacto de las aguas residuales provenientes del sector doméstico y agroindustrial. Esta integración de las herramientas computacionales es de utilidad debido a la simbiosis de escalas espacio-temporales de ambos modelos y por permitir modificar parámetros en los diferentes elementos de río. Esta integración permite la dinamización de la escala espacio-temporal y la integración entre modelos hidrológicos y de cauces superficiales.

Con el modelo de línea base desarrollado y calibrado para el caso de estudio, es posible evaluar escenarios para la prevención y control de la contaminación hídrica en la cuenca del río La Vieja. Estos escenarios pueden ser desarrollados en el marco del análisis de decisiones robustas y con objetivo de planificación ambiental.

El modelo desarrollado para la evaluación de escenarios permitió evaluar estrategias para el control de la contaminación a escala de cuenca. La importancia de este tipo de evaluación, corresponde a la simplificación de sistemas de complejos que contribuyen a la planificación hídrica por sectores y a diferentes tipos de actores. La cuenca como unidad de análisis representa un sistema complejo, que mediante la integración de los modelos WEAP y QUAL2K puede ser analizada de forma sistémica y en el marco de las decisiones robustas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno de los Estados Unidos de América por la financiación del proyecto “Construcción de capacidades frente al Cambio Climático: Ríos del páramo al valle por urbes y campiñas”, a través de La Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y bajo la coordinación técnica del Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI).

También expresan sus agradecimientos a los socios directos del proyecto: Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Aguas y Aguas de Pereira, Grupo de investigación CIDERA de la Universidad del Quindío, Grupo de Investigación EIS de la Universidad Tecnológica de Pereira y al grupo de investigación GIRH del Instituto Cinara de la Universidad del Valle.

7. BIBLIOGRAFÍA

Assaf, H., y Saadeh, M. (2008). Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based

- decision support system. *Environmental Modelling & Software*, 23(10), 1327-1337.
- Chapra, S. (2008). *Surface water-quality modeling*, Waveland press, Long Grove, Estados Unidos.
- Comité de Cafeteros, y CVC. (2012). *Taller regional para la definición de cargas contaminantes del sector cafetero*. Cartago, Colombia.
- CRQ, CVC, CARDER, UAESPNN, MAVDT, IDEAM, y GTZ. (2008). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja*.
- DANE. (2005). *Censo general*. Colombia.
- EPA. (2013). *River and Stream Water Quality Model (QUAL2K)*. <<http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html>>.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., y Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Lozano, G., Rodríguez, C., Purkey, D., Escobar, M., Castaño, J., Sabas, C., Galvis, A., y Jaramillo, M. F. (2015). *Modelación hidrológica de cuencas hidrográficas en WEAP como una herramienta de evaluación y adaptación al cambio climático. Caso de estudio cuencas de los ríos La Vieja y Otún en la región cafetera de Colombia* En: *Water Week Latinoamérica 2015*, Santiago de Chile, Chile.
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico*
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Pai, T.-Y., Huang, J.-T., Wang, S.-C., Chang, D.-H., Huang, K.-J., Lee, C.-C., Lin, S.-R., Tseng, C.-H., Sung, P.-J., y Leu, H.-G. (2010). Evaluation of Ecological Water Purification Processes in Dali River Using QUAL2K. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 20(4), 239-243.
- Phurisamban, R. (2014). *Addressing Climate Change Adaptation in Water Resource Management: A Case Study of the Sacramento Region*. University of California, Berkeley.
- Rashed, A. A., y El-Sayed, E. (2014). Simulating Agricultural Drainage Water Reuse Using QUAL2K Model: Case Study of the Ismailia Canal Catchment Area, Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5).
- Roa, G., Oliveros, C., Álvarez, J., Ramírez, C., Sanz, J., Davila, M., Álvarez, J., Zambrano, D., Puerta, G., y Rodríguez, N. (2009). *Beneficio ecológico del Café, Chichiná, Colombia*.
- Valencia, J., Forni, L., Castaño, J., Purkey, D., Escobar, M., Sabas, C., Lozano, G., Rodríguez, C., Galvis, A., y Jaramillo, M. (2013). *Aplicación de la metodología XLRM para la definición de escenarios de modelación en WEAP: Una herramienta para la construcción de modelos de cambio climático*. En: *AGUA2013. Seminario Manejo del riesgo en el ciclo del agua.*, Cali, Colombia.
- Vicuña, S., Coello, C., y Cisneros, F. (2009). *Modelación hidrológica de recursos hídricos de la cuenca del río Paute*. En: *XII Seminario Latinoamericano: Agua y Cambio Climático*, Chile.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., y Huber-Lee, A. (2005). WEAP21. A demand, priority, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500.
- Zainudin, Z., Rahman, N. A., Abdullah, N., y Mazlan, N. F. (2010). Development of Water Quality Model for Sungai Tebrau using QUAL2K. *Journal of Applied Sciences*, 10, 2748-2750.

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO TUXPAN, VERACRUZ, MÉXICO.**DIAGNOSIS OF WATER EROSION OF THE TUXPAN RIVER BASIN, VERACRUZ, MÉXICO.**José Isidro Melchor-Marroquín¹; Jorge Luis Chagoya-Fuentes²**Resumen**

En la cuenca del río Tuxpan, las intensas lluvias que ocurren dentro de su área, generan gran cantidad de sedimentos que son transportados y depositados en la parte baja de su cauce que reducen su profundidad, lo cual provoca que sea dragado frecuentemente en los últimos 11 kilómetros antes de desembocar al mar, ya que es utilizado como canal de navegación para barcos de gran calado que arriban al puerto de Tuxpan, el cual es uno de los tres más importantes de Veracruz, México. Por lo anterior y como primer paso para entender el problema de erosión hídrica en la cuenca del río Tuxpan, se realizó el presente estudio cuyos objetivos fueron identificar las áreas con riesgo de erosión hídrica y estimar la pérdida de suelo, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo ($A=R*K*LS*C$), con la técnica de álgebra de mapas en ARCGIS 10.1. Los resultados indican que el riesgo promedio de erosión hídrica varía de 19.4 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, valores superiores a la clasificación de los grados de severidad establecidos por la FAO (1980). La erosión actual promedio de la cuenca es ligera en el 2.52 %, moderada en el 71.38 %, alta en el 9.42 % y muy alta en el 16.88 % de su área. Dos subcuencas abarcaron la mayor superficie y riesgo de erosión con 70.4 % y 89.2 %, respectivamente, cuyo grado de severidad fluctuó de 21.5 a 1,971.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Las áreas más afectadas son las partes alta y media de la cuenca con mayor pendiente; las menos afectadas son las áreas con vegetación y las partes bajas, planas y zonas pantanosas.

Palabras clave: Ecuación Universal Pérdida Suelo, álgebra de mapas, ArcGis.

Abstract

In the basin of the Tuxpan River due heavy rains large amounts of sediment are generated, which are transported and deposited in the channel bottom, reducing its depth. Since deep-draft ships navigate the river, the last 11 km before the river mouth have to be dredged frequently. This situation is relevant because the height port of Tuxpan is the third more important in Veracruz, México. This study was conducted as a first step to understand water erosion in the river basin and its objectives were to identify areas with a risk of water erosion as well as to estimate soil loss by means of the universal soil loss equation ($A=R*K*LS*C$) with the algebra maps technique in ARCGIS 10.1. The average risk of water erosion in the five sub-basins varied from 19.4 to 794.9 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, which are higher values than those indicated by the severity degrees classification of FAO (1980). Current erosion is light in 2.52 %, moderate in 71.38 %, high in 9.42 % and very high in 16.88 %, of the river basin area. Two sub-basins had the greater surface and risk of erosion with 70.4% and 89.2%, respectively. Additionally, their severity levels ranged from 21.5 to 1971.5 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The more affected areas were the upper and middle steepest basin parts. Areas with vegetation cover, lowlands and wetlands were the less affected.

Key words. Universal Soil Loss Erosion, map algebra, ArcGis.

1. INTRODUCCIÓN

En México, la erosión hídrica del suelo está presente en 22.72 millones de hectáreas, que representa el 11.9% del territorio nacional. Este fenómeno, que se origina por la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es posiblemente el tipo de erosión más importante de todos, ya que es irreversible y de magnitud significativa. Se calcula que para tener un centímetro de suelo mineral en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, razón por lo que se considera como un recurso natural no renovable dentro de la escala de tiempo humana. (Montes *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013).

Para la planificación del uso del suelo y desarrollo de estrategias de conservación, es necesario estimar las tasas de erosión e identificar las áreas vulnerables. En general, los métodos para evaluar la erosión se dividen en dos: directos e indirectos; los primeros proporcionan datos precisos pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos, ya que la información se obtiene de mediciones a nivel superficial de la erosión; mientras que los indirectos son modelos basados en relaciones estadísticamente significativas entre variables, cuando se cuenta con una razonable base de datos, destacando entre estos, la Ecuación Universal de

¹ Programa de Investigación Manejo Forestal Sustentable y Servicios Ambientales. Campo Experimental Ixtacuaco. CIRGOC-INIFAP. Tlapacoyan, Veracruz, México. melchor.jose@inifap.gob.mx

² Consultor particular. Área de Servicios Ecosistémicos. Tuxpan, Veracruz. México. chagoyajorge@hotmail.com

Pérdida de Suelo (EUPS), que considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado de la interacción de factores naturales (clima, suelo y topografía) y antropogénicos (uso y manejo de la tierra) (Wischmeier y Smith, 1965). Dado que la EUPS es un método que permite obtener un producto en poco tiempo y a bajo costo, es relativamente fácil de aplicar y se utiliza con sistemas de información geográfica (SIG), ya que los factores que integran la ecuación tienen una clara representación geográfica sobre el territorio, ha resultado ser un modelo práctico y accesible que ha sido utilizado a diferentes escalas en diversas partes del mundo (Orúe *et al.*, 2007; Pastrana, 2014).

A partir de que Figueroa *et al.* (1991) adaptaron la EUPS a las condiciones de México, su aplicación para estimar la erosión hídrica en el país se ha generalizado, mediante la técnica de álgebra de mapas dentro de un SIG. Santacruz (2011), menciona que la ventaja de la EUPS es que el índice de erosividad permite considerar de modo más preciso las diferencias de pluviosidad de una tormenta a otra, o de una estación a otra, cuando se tiene información de la red pluviométrica; mientras que Pérez (2013), señala que el más completo y sofisticado modelo de erosión, es un complejo proceso basado en un programa de computadora llamado Water Erosion Prediction Project (WEPP), el cual calcula sobre una base diaria los procesos hidrológicos, el crecimiento de las plantas y descomposición de los desechos; sin embargo, en su misma complejidad tiene su ventaja y desventaja, ya que si no se cuenta con la información que requiere, se vuelve inoperante y poco confiable. El mismo autor concluye que la EUPS, es un modelo adecuado para estimar la tasa de erosión hídrica, con resultados satisfactorios para la elaboración de planes de manejo y conservación de suelo, razón por la que se aplicó en el presente estudio.

De los estudios realizados sobre la estimación de erosión hídrica para diversas condiciones del país, Arellano (1994), con la aplicación directa de la EUPS y cartografía 1:250,000, estimó que la erosión hídrica actual para la costa de Chiapas, México, era de 123 a 2,148 Mg^{3z} ha⁻¹ año⁻¹. En estudios realizados para estimar la erosión hídrica con la técnica de álgebra de mapas en un SIG, Pando *et al.* (2003), estimaron tasas de 23 a 149 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la microcuenca del Río Potosí, Nuevo León; Flores *et al.* (2003), en la cuenca el Jihuite, Jalisco, estimó de 2.2 hasta 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que López (2005) estimó que la erosión hídrica total en la microcuenca El Calabozo, Michoacán, fue 6235 Mg ha⁻¹ año⁻¹; Cano *et al.* (2007) estimaron que el 58 % de la superficie de la microcuenca Santa Rita, Nuevo León, tuvo de valores de 50 a 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que Pastrana (2014), menciona un promedio de 3.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la cuenca San miguel, Coahuila. La

variabilidad de los datos mencionados, como es de esperarse, se debe a las condiciones particulares de los factores climáticos, uso y manejo del suelo y características físicas del terreno.

En el norte de Veracruz, México, se encuentra la cuenca del Río Tuxpan, que aprovecha la desembocadura del río como canal de navegación (11 km de longitud, 150 m de ancho y 12 m de profundidad), para los barcos de gran calado que arriban al puerto del mismo nombre y que es el tercero más importante de Veracruz. En 2015, el puerto movilizó 10.75 millones de toneladas de carga, que representó 151,543.00 millones de pesos (API-Tuxpan, 2011). Anualmente el río incrementa su caudal por las precipitaciones generadas en su cuenca hidrológica, arrastrando gran cantidad de sedimentos que se depositan en los últimos kilómetros de su cauce y reducen su profundidad, siendo necesario dragarlo anualmente para mantener las condiciones de navegación. Esta situación se vuelve estratégicamente relevante ya que durante el 2016 iniciará actividades el puerto de contenedores donde la profundidad del cauce del río será determinante para la entrada de barcos de gran calado.

Por otra parte, hasta la fecha no se han realizado estudios sobre evaluación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan, debido a lo anterior y como primer paso para dimensionar la cantidad de sedimentos generados en la cuenca, se realizó el presente estudio el cual consistió en estimar la pérdida de suelo e identificar las áreas con riesgo de erosión hídrica, mediante la aplicación de la EUPS con la técnica de álgebra de mapas en la cuenca mencionada; la información generada ayudará a la toma de decisiones en planeación y gestión de acciones territoriales para la conservación y recuperación de suelos en las diferentes subcuencas. Todo con el propósito de reducir la erosión hídrica y el arrastre de sedimentos hacia el cauce utilizado como canal de navegación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del Área de Estudio

La cuenca se localiza en la región hidrográfica RH27D, Cuenca Río Tuxpan y está formada por cinco subcuencas (A, B, C, D y E) (Figura 1). Se ubica entre los paralelos 20° 18.45' y 21° 15.88' de latitud Norte y los meridianos 97° 17.9' y 98° 31.03' de longitud Oeste. Tiene una superficie total de 5,887.96 km² y un perímetro de 457.37 km, distribuido en los estados de Veracruz (72%), Puebla (15.34%) e Hidalgo (12.62%). Sus dos afluentes principales son el Río Vinazco, que nace en el estado de Hidalgo, y el Pantepec, que nace en el estado de Puebla, ambos penetran en territorio veracruzano y en el municipio de Temapache, unen sus aguas conformando este río cuyo escurrimiento superficial medio anual es de 2,076 millones de m³ y drena en el Golfo de México.

³ z Mg = ton

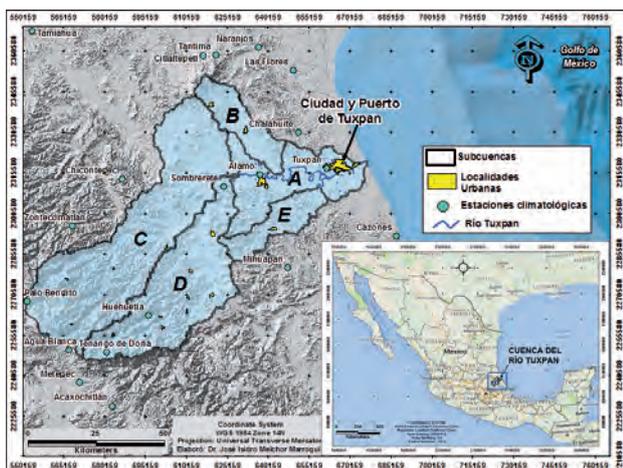


Figura 1.- Ubicación de la Cuenca RH27D, Río Tuxpan y las subcuencas (A, B, C, D y E) que la conforman, en el estado de Veracruz, México.

Con base en la clasificación climática de Koeppen, modificada por García (1978), los clima existentes en la cuenca son el Am(f), que corresponde a cálido húmedo, seguido por el Aw(2)x, cálido subhúmedo; Cf, templado húmedo y (A)C(m)(f) que corresponde a semicálido **húmedo**. Con base en las normales de precipitación de 19 estaciones climatológicas, ubicadas dentro y alrededor de la

cuenca con información de 59 años, se tiene que la precipitación promedio anual es de 1,300.1 mm, con una máxima y mínima de 2,204.5 y 609. mm, respectivamente (Figura 1) (SMN, 2015). El material geológico predominante en la cuenca corresponde a rocas sedimentarias y rocas ígneas intrusivas y extrusivas, constituidas por lutita arenisca, caliza lutita, y arenisca conglomerado. Respecto al relieve, predomina el sistema de topografía de sierra alta escarpada, seguida por el de valle de laderas tendidas con llanura, lomerío típico, valle con llanuras, sierra baja volcánica, meseta típica y meseta compleja con lomeríos; las pendientes varían de 3% al 100% considerando las cinco subcuencas (INEGI, 2015).

2.2. Insumos cartográficos

Se utilizó material cartográfico obtenido de INEGI (2015) (Tabla1), el cual fue procesado con la técnica de algebra de mapas en el marco del software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012). Esta técnica consiste en crear un mapa raster para cada uno de los componentes de la EUPS; una vez creados los mapas, se realiza una multiplicación entre ellos, mediante la extensión Spatial Analyst de ArcGIS 10.1, por medio del uso de la herramienta Raster Calculator, para finalmente obtener el mapa raster con los valores de erosión hídrica (Colín *et al.*, 2013).

Tabla 1. Cartografía utilizada para la estimación de la erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan.

| Referencia | Escala | Formato |
|---|-------------|---------|
| Continuo de Elevaciones Mexicano CEM 3.0 | 1:50,000 | Raster |
| Red Hidrográfica de México | 1:50,000 | Shape |
| Uso del Suelo y Vegetación de México Capa Unión | 1:250,000 | Shape |
| Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico de México | 1:250,000 | Shape |
| Mapa Base de México | 1:1,000,000 | Shape |
| Conjunto Vectorial de Entidades de México | 1:250,000 | Shape |

Fuente: INEGI (2015).

2.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) fue desarrollada por Wischmeier y Smith (1965) y validada para México por Figueroa *et al.* (1991) para estimar la pérdida de suelo promedio anual. La EUPS es un modelo en el que la pérdida de suelo está expresada como masa por unidad de área por unidad de tiempo y es una función del efecto combinado de seis factores expresados en la ecuación 1:

$$A=R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde:

A = Promedio anual de pérdida de suelo por hectárea expresado en Mg * ha⁻¹ año⁻¹.

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ * mm⁻¹ / ha⁻¹ hr⁻¹.

K = Factor de erosionabilidad del suelo.

S = Factor del grado de pendiente, es adimensional.

L = Factor del grado de longitud de la pendiente, es adimensional.

C = Factor del manejo de vegetación, es adimensional.

P = Factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola, es adimensional.

La EUPS estima la erosión hídrica actual cuando se incluyen todos los factores que la integran; en cambio si no se incluye el factor P, estima la erosión hídrica potencial, es decir, la cantidad de suelo que se estaría perdiendo sin prácticas de conservación de suelo. La clasificación de la erosión hídrica utilizada fue la propuesta por la FAO (1980) (Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de pérdida de suelo por erosión hídrica.

| Nivel | Mg * ha ⁻¹ año ⁻¹ |
|----------|---|
| Nula | < 2 |
| Ligera | 2-10 |
| Moderada | 10-50 |
| Alta | 50-200 |
| Muy Alta | > 200 |

Fuente: FAO (1980).

2.3.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)

El factor erosividad de la lluvia *R*, definida como la capacidad potencial de ésta para causar erosión, es medida por medio de los índices de erosividad. Este factor se estimó a partir de la regionalización de precipitación hecha por Cortés (1991), quien determinó un mapa de isoerosividad con 14 regiones; así, la cuenca del Río Tuxpan se ubica en la región XIII y le corresponde la ecuación cuadrática (2) para el cálculo del factor *R*:

$$R = [10.7427 (P) - 0.00108 (P^2)] \quad (2)$$

con una $r^2 = 0.97$

Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ * mm⁻¹/ha⁻¹ hr⁻¹.

P = Normales de precipitación media anual en mm.

r^2 = Coeficiente de determinación.

El factor *R* se determinó para cada subcuenca con el método de isoyetas de las normales de precipitación obtenidas de las estaciones climatológicas ubicadas dentro y alrededor de la cuenca. Posteriormente se generó el mapa raster del factor *R* con el software ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012).

2.3.2. Factor de Erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo se define como la tasa de pérdida de suelo por cada unidad de índice de erosividad, cuando la pendiente y su longitud, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo son constantes e iguales a uno (Figueroa *et al.* 1991). Con base en el conjunto de datos vectoriales edafológico 1:250 mil (INEGI, 2015), los valores del factor *K* se asignaron a cada polígono de unidad de suelo de la cuenca conforme a datos generados por FAO (1980) y actualizados para México por Figueroa *et al.* (1991). El mapa vectorial de suelo de la cuenca con el valor del factor *K* incluido, se transformó a capa "raster" con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012).

2.3.3. Factor topográfico (LS)

La longitud de la pendiente (*L*) y el grado de la pendiente (*S*) expresada en porcentaje, representan

la participación determinante de la topografía en el proceso de pérdida de suelo. A medida que el valor de estos factores aumenta, la pérdida de suelo es mayor. La longitud (*L*) se define como la distancia horizontal entre los puntos donde inicia el escurrimiento hasta aquel donde decrece la pendiente y ocurre la sedimentación. El factor (*S*) representa el efecto de la inclinación en la erosión, ya que la pérdida de suelo se incrementa con pendientes escarpadas (Foster *et al.*, 1977).

El insumo principal para la determinación del factor *LS*, fue el mapa raster de la cuenca obtenido del conjunto de elevaciones mexicano CEM 3.0 (INEGI, 2015). Para el cálculo de los factores *L*, *S* y *LS*, se siguió la metodología de Renard *et al.* (1996), la cual divide a la cuenca en una cuadrícula y asigna atributos ambientales como tipo de suelo, ángulo de la pendiente, precipitación y longitud de la pendiente a cada celda (pixel) de dicha cuadrícula. Con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012) se calcularon los ángulos de la pendiente en el CEM 3.0 (INEGI, 2015), cuyo procedimiento se expone a continuación.

$$L = \left(\frac{o}{22.13}\right)^m \quad (3)$$

Donde:

L = Longitud de la pendiente.

λ = Es la longitud de la pendiente en metros.

m = Es un exponente calculado con modificación hecha por Foster *et al.* (1977).

$$m = \frac{\beta}{\beta+1} \quad (4)$$

Donde:

β = Ángulo medio de la pendiente.

Los valores de β , para condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos se obtuvieron mediante la ecuación desarrollada por McCool *et al.* (1989), donde β se toma como el ángulo medio a nivel de subcuadrícula en la dirección de mayor pendiente en el mapa raster.

$$\beta = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{3 + \sin \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

Donde:

θ = es el ángulo de la pendiente.

El valor de λ se obtuvo a partir de la metodología expuesta por Flores *et al.* (2003), la cual procesa modelos de elevación que representen con más claridad los cambios topográficos y su relación con las condiciones hidrológicas superficiales, considerando el tamaño del pixel del mapa raster.

$$\lambda = \frac{x}{\cos \theta} \quad (6)$$

Donde:

x = Tamaño del pixel.

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$S = 10.8 \text{ Sen } \theta + 0.03, \text{ para } S < 9\% \quad (7)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen } \theta - 0.50, \text{ si } S \geq 9\% \quad (8)$$

2.3.4. Factor de cobertura (C)

El factor C es la capacidad de la vegetación para amortiguar el efecto de desprendimiento de partículas de suelo por las gotas de lluvia e impedir el arrastre de sedimentos con el escurrimiento superficial. Su valor es una función de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos, prácticas de manejo y del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal al momento en que actúa el agente erosivo (Wischmeier y Smith, 1978).

A partir del mapa vectorial de uso de suelo y vegetación Capa Unión Serie V, elaborada para

México por INEGI (2015), se extrajeron los polígonos correspondientes a cada clase de uso de suelo y tipo de vegetación existentes en la cuenca, a los que se les asignó el valor de C , con base a información generada por Figueroa *et al.* (1991) para diferentes regiones del País. Este insumo fue procesado con ARCGIS 10.1 (ESRI, 2012) para obtener el mapa raster del factor C , con la clasificación y superficie de los polígonos mencionados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características Morfométricas de la Cuenca

El área de drenaje es de 5,887.96 km², por esta razón es considerada como una cuenca grande, ya que se encuentra dentro de la clasificación establecida por Campos (1998), con un área entre 2,500 y 5,000 km². Respecto a la densidad de drenaje, Hernández (2006) considera que valores de 3.5 km * km⁻² o mayores, indican una red de drenaje eficiente. En nuestro caso el promedio de este parámetro fue de 1.68, indicando un drenaje bueno (Tabla 3).

Tabla 3. Características morfométricas de las subcuencas que integran la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

| Parámetros morfométricos | Subcuenca | | | | |
|---|-----------|--------|----------|----------|--------|
| | A | B | C | D | E |
| Área (Km ²) | 903.35 | 446.20 | 2,564.78 | 1,576.89 | 396.74 |
| Longitud Corriente Principal (Km) | 119.6 | 79.092 | 142.507 | 148.04 | 78.387 |
| Densidad de drenaje (Km * Km ²) | 1.465 | 1.9454 | 1.6961 | 1.5439 | 1.7585 |
| Número de corrientes | 1713 | 1183 | 5058 | 2526 | 987 |
| Índice de Gravelius (adimensional) | 2.17 | 1.61 | 1.88 | 1.86 | 1.83 |
| Elevación máxima en la subcuenca(m) | 460 | 1320 | 2800 | 2760 | 460 |
| Elevación mínima en la subcuenca(m) | 0 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Elevación máxima en corriente principal (m) | 371 | 1206 | 2540 | 2366 | 369 |
| Elevación mínima en corriente principal (m) | 20 | 19 | 45 | 40 | 15 |
| Pendiente media (%) | 9.03 | 11.14 | 31.67 | 32.33 | 18.39 |

El índice de Gravelius relaciona el perímetro de la cuenca con un círculo de la misma área; a medida que el valor del índice se acerque a la unidad, la cuenca tiende a ser circular y más compacta. En nuestro caso, el promedio de este índice fue de 1.87 por lo que la cuenca tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga, lo que puede intensificar el vigor de las avenidas al menos en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal (Viramontes *et al.*, 2007. Caro, 2014).

Respecto a la pendiente media de la cuenca, con base a la clasificación de Heras (1976), las subcuencas A y B presentan un relieve accidentado medio, mientras que en las demás es accidentado a fuerte accidentado, que evidentemente favorece la escorrentía.

3.2. Erosividad de la lluvia (R).

El rango de R osciló de 3,887.98 a 18,134.04 MJ * mm/ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ por lo que de acuerdo con la clasificación propuesta por Rivera y Gómez (1991), citado por Castelán *et al.* (2014), la subcuenca tiene clases de erosividad de baja a muy severa, cuya distribución va de las áreas de menor a mayor altitud y precipitación (Tabla 4) en 14 de las estaciones climatológicas; los máximos valores se registraron en Huehuetla (2404.5mm), Zontecomatlán (2,205.8 mm), Tantimá (1752.1 mm), Tenango de Doria (1,733.7 mm) y Ciltlatepetl (1,669.3 m); cabe mencionar que se observó tendencia ($r = 0.6$) de los índices de erosividad con la altitud de las dichas estaciones, la cual varía de 10 a 1,666 metros sobre el nivel del mar, es decir de menor a mayor pendiente (Figura

2). Los índices bajos se asociaron a las estaciones Agua Blanca (609.4 mm) y Palo Bendito (632.3 mm);

en este caso no hubo correspondencia con la altitud a la que se encuentran dichas estaciones.

Tabla 4. Clasificación de la erosividad de las lluvias según el valor de *R*.

| Clase | Erosividad <i>R</i> * (MJ * mm ha ⁻¹ h ⁻¹) | Clasificación* | Erosividad Cuenca Río Tuxpan (MJ * mm ha ⁻¹ h ⁻¹) |
|-------|--|-----------------------|---|
| 1 | < 1 000 | Natural | - |
| 2 | 1000 – 2500 | Muy baja | - |
| 3 | 2500 – 5000 | Baja | 3887.98 – 8543.19 8543.2 -11067.1 11067.2 – 12861.87 12861.88 – 15105.35 |
| 4 | 5000 – 7500 | Moderada | |
| 5 | 7500 - 10000 | Alta | |
| 6 | 10000 - 15000 | Muy alta | 15105.36 – 18134.04 |
| 7 | 15000 - 20000 | Severa | |
| 8 | > 20000 | Extremadamente severa | - |

* Rivera y Gómez (2013).

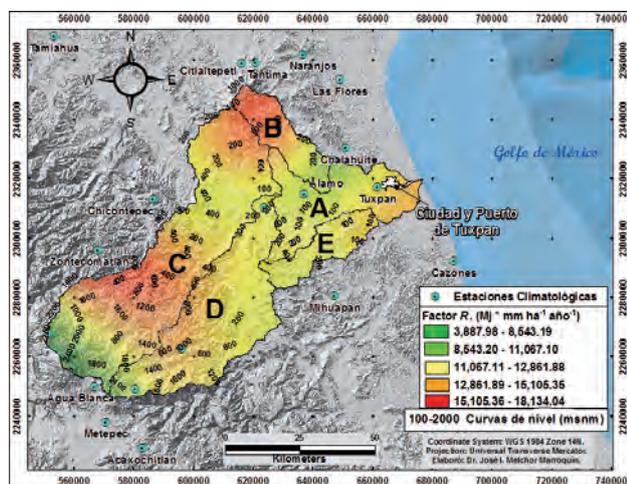


Figura 2.- Distribución espacial del factor *R* en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

La situación observada indica que para un área que presenta eventos de precipitación de similar intensidad, el comportamiento de la agresividad de la lluvia está influenciado por el clima y el relieve del área, en sentido estricto, las barreras topográficas; ya que en las regiones planas y de lomeríos cercanas al mar, la precipitación es mayor, a diferencia de aquellas ubicadas en la partes de mayor altitud; en otros casos, el comportamiento del Índice de Erosividad también sufre variaciones cuando para unas mismas condiciones de uso y cobertura del suelo, de pendiente del terreno y de características de los suelos, se presentan eventos lluviosos de diferente intensidad, como ha sido discutido por Galvis (2008) y Castelán *et al.* (2014). Si bien el factor *R* puede ser utilizado para definir la erosividad de la lluvia, su finalidad no es utilizarlo como un indicador de las pérdidas de suelo, y por tanto es necesario tener en cuenta los otros factores de la EUPS para los estudios de predicción de la erosión hídrica.

3.3. Erodabilidad del suelo (*K*)

Con base en el conjunto vectorial edafológico elaborado por el INEGI (2015), en la cuenca existen 19 tipos de suelo; predominando el Feozem háplico, Vertisol pélico, Regosol calcárico, Regosol dístico y Acrisol órtico. En las zonas altas y de mayor pendiente, se encuentran los suelos Cambisol, Feozem, Luvisol y Regosol, que son susceptibles a la erosión hídrica (Zamudio y Méndez, 2011; SEMARNAT, 2013.) los cuales tuvieron el mayor valor de *K* y cuya tendencia es similar a la reportado por Santacruz (2011) y Colín *et al.*, (2013) (Figura 3).

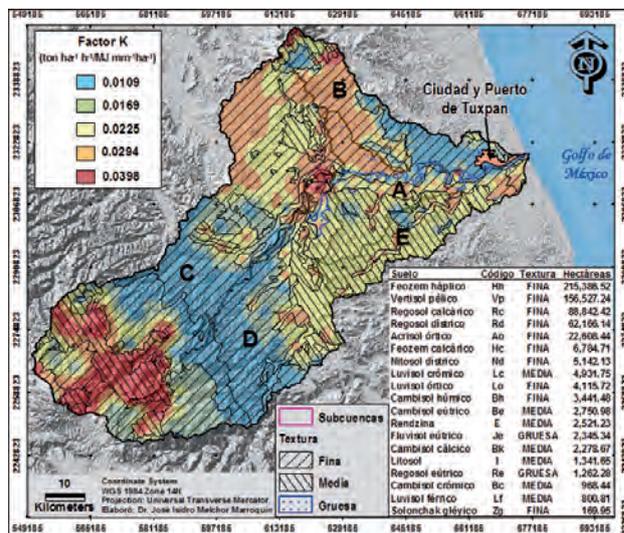


Figura 3.- Tipos de suelo y distribución espacial del factor *K* en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

El valor de *K* para la cuenca fluctuó de 0.0109 a 0.0398 ton * ha⁻¹h⁻¹ / MJ * mm⁻¹ha⁻¹, con un promedio de 0.0239 ton * ha⁻¹h⁻¹ / MJ * mm⁻¹ha⁻¹ (Figura 3). Dicho valor corresponde a suelos de textura fina y de acuerdo con Wischmeier y Smith (1978), quienes

establecieron un rango para *K* de 0 a 0.9, se puede argumentar que la cuenca en general presenta baja susceptibilidad a la erosión hídrica; ya que suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de *K* (0.05-0.15), y por lo tanto son resistentes al desprendimiento; mientras que suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tienen valores bajos de *K* (0.15-0.2), debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles; finalmente, suelos de textura mediana (franco limoso) tienen valores de *K* moderados (0.25-0.4) y son susceptibles al desprendimiento.

3.4. Factor de cobertura (C)

La vegetación es el elemento natural de protección del suelo contra la erosión, ya que controla la energía con la que las gotas de lluvia impactan sobre el suelo, mejora la capacidad de infiltración y disminuye la escorrentía; así mismo, se menciona que las coberturas más efectivas en el control de la erosión hídrica y la sedimentación en una cuenca son las arbóreas y pastizales con un adecuado manejo (Roldán y Gómez 2006; Lianes *et al.* 2009). El análisis en la superficie de la cuenca del Río Tuxpan refleja que el desarrollo de la población se basa en una intensa producción agrícola (49.46%), seguida por la ganadería (23.97%), vegetación secundaria de bosque templado y selva mediana perennifolia y subperennifolia (20.11%), mientras que el bosque natural ocupa sólo 6.46%. Así, el valor de *C* fluctuó de 0 a 0.5, donde los valores bajos se asociaron a las áreas con cobertura de bosque (0.001), vegetación secundaria (0.002 a 0.003) y pastizales (0.004), mientras que el máximo valor fue para la agricultura anual y semipermanente (0.5) (Figura 4). Lo anterior permite intuir que en la cuenca del Río Tuxpan, los suelos dedicados a la agricultura son los que tienen mayor riesgo a la erosión hídrica, seguidos por los cultivados con pastizales y con menor riesgo aquellos con cobertura arbórea.

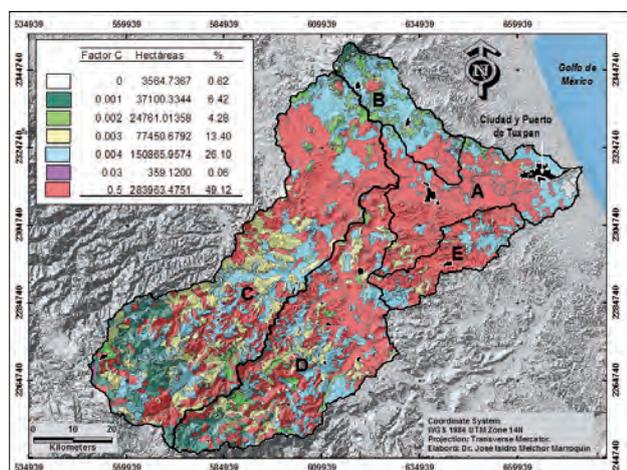


Figura 4.- Distribución espacial del Factor C en la Cuenca del Río Tuxpan, Ver.

3.5. Factor de longitud y grado de la pendiente (LS)

Los resultados obtenidos para el factor *LS* muestran la importancia de la inclinación y la longitud de la pendiente en la susceptibilidad a la erosión hídrica a lo largo de la cuenca. Destaca en general que ésta presenta pendientes altas como corresponde a un medio físico donde predomina una topografía accidentada, lo cual generalmente está asociada a un mayor riesgo a la erosión hídrica. Los valores inferiores de *LS*, oscilan entre 0 y 5 y se presentan en las partes bajas y planas, las cuales tienen poca representación; mientras que los máximos valores de *LS* (65.6-72.6), son los que predominan en la cuenca (Figura 5). De acuerdo con lo anterior y considerando al factor *LS* como uno de los más importantes en el proceso de erosión hídrica (Pérez, 2013), se puede intuir que gran parte de la cuenca está expuesta a ese tipo de erosión, ya que como se aprecia en la figura 5, los máximos valores de *LS*, se asocian a las áreas de mayor pendiente y abruptas de la zona de estudio, lo cual ha sido observado también en diversos estudios como los de Payet *et al.* (2011) y Dumas (2012).

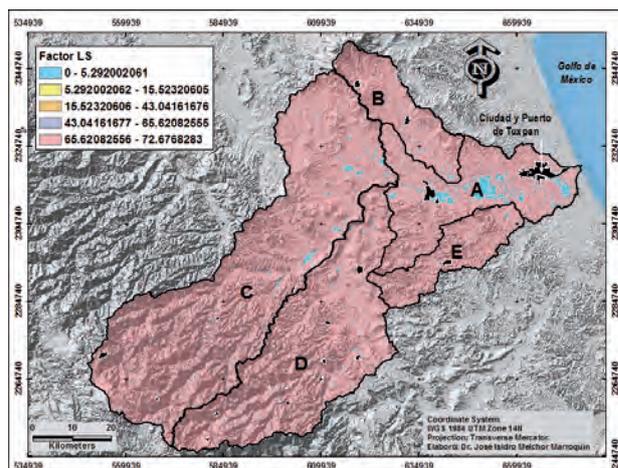


Figura 5.- Distribución espacial del Factor *LS* en la Cuenca del Río Tuxpan, Ver.

3.6. Erosión Hídrica

Considerando las cinco subcuencas, se encontró que los grados de erosión hídrica promedio varían de 19.4 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 5); llama la atención que estos promedios son superiores a la clasificación de los grados de severidad establecidos por la FAO (1980); así mismo, presentan tendencia con los valores medios de erosión hídrica reportados para México, que varían entre 10 y 200 Mg ha⁻¹ · año⁻¹, en el 22% del territorio del país (Montes *et al.*, 2011), ya que en la cuenca del Río Tuxpan, el 80.8% de la superficie se encuentra dentro del rango mencionado. Es importante mencionar que las subcuencas C (2,564.78 km²) y D (1,576.89 km²), las cuales son las de mayor superficie, presentaron mayor riesgo

de erosión hídrica promedio con 788.6 y 629.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 5). Al respecto, el factor *LS* fue determinante ya que el análisis de correlación permitió conocer su peso relativo con un

coeficiente de 0.87, lo cual se atribuye a que estas subcuencas presentan altitudes de 2,540 y 2,236 m, respectivamente, lo cual es acorde a lo reportado por Orué *et al.* (2007) y Ramírez (2010) con coeficientes de 0.82 y 0.98 respectivamente.

Tabla 5. Erosión hídrica en las subcuencas que integran la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz

| Subcuenca | Grado de erosión hídrica (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹) | | | | | Total | Promedio |
|------------------|---|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| A | 23.00 | 44.00 | 38.50 | 34.00 | 140.00 | 279.50 | 55.9 |
| B | 16.00 | 28.50 | 34.00 | 31.00 | 109.50 | 219.00 | 43.80 |
| C | 34.50 | 69.00 | 380.50 | 1,487.50 | 1,971.50 | 3,943.00 | 788.60 |
| D | 21.50 | 43.00 | 517.00 | 991.50 | 1,573.00 | 3,146.00 | 629.20 |
| E | 2.00 | 78.50 | 34.00 | 66.00 | 180.50 | 361.00 | 72.20 |
| Erosión Total | 97.00 | 263.00 | 1,004.00 | 2,610.00 | 3,974.50 | 7,948.50 | |
| Erosión Promedio | 19.4 | 52.6 | 200.8 | 522 | 794.9 | 1,589.7 | |

La erosión hídrica total y promedio estimada para la cuenca fue de 7,948.5 y 1,589.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 5). Estos resultados contrastan con los obtenidos en otros estudios y con la misma técnica utilizada en el presente estudio, ya que superan a lo observado por García *et al.* (2010), quienes reportan una erosión hídrica total de 5,770 Mg ha⁻¹ año⁻¹, para la cuenca alta del Río Lerma, en Toluca, México; pero inferiores a lo encontrado por Retureta y Ascanio (1998) en la cuenca del Río Atopa, Veracruz, México, con 16,925.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, y, Santacruz (2011) con 16,270.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en la cuenca del Río Cohoacan, Chiapas, México. La diferencia observada en los datos reportados con los obtenidos en este estudio, puede atribuirse a la diversidad de las condiciones físicas y bióticas, así como por las prácticas de manejo del suelo existentes en cada región, por lo tanto, la información generada para la cuenca del Río Tuxpan, pueden considerarse como una primera estimación que permite visualizar la magnitud del problema de erosión hídrica en esta región.

Al agrupar los promedios de erosión hídrica actual con base en los grados de severidad establecidos por la FAO (1980), se estimó que la erosión hídrica actual promedio de la cuenca es ligera en el 2.52 %, moderada en el 71.38 %, alta en el 9.42 % y muy alta en el 16.88 % de su área; en cambio el grado nulo no se presentó (Tabla 6). El análisis realizado permite inferir que la cuenca del Río Tuxpan presenta problemas de erosión hídrica de moderada a muy alta, lo cual en la mayoría de los casos es originado por el cambio de uso del suelo y prácticas inadecuadas de conservación de suelos en los sistemas de producción agropecuaria. No obstante que la estimación de pérdida de suelo procesada directamente con la EUPS permite conocer el nivel de degradación del suelo, la aplicación de la ecuación en el ambiente del SIG ubicó espacialmente las áreas sujetas a erosión hídrica. Así, de las 30 municipalidades que se encuentran dentro de la cuenca, el 53 % presentan erosión hídrica promedio de 208.8 a 794.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, cuyas áreas pueden ser ubicadas y jerarquizar acciones de conservación, orientando los programas de control preferentemente a las regiones de mayor riesgo.

Tabla 6. Niveles de erosión hídrica en la cuenca del Río Tuxpan, Veracruz.

| Clasificación de erosión hídrica (FAO, 1980) | | | Erosión hídrica actual promedio | |
|--|----------|---|---------------------------------|-------|
| No. | Grado | Mg ha ⁻¹ · año ⁻¹ | Superficie (ha) | % |
| 1 | Nula | < 2 | 0 | 0.0 |
| 2 | Ligera | 2 a 10 | 14,749.87 | 2.52 |
| 3 | Moderada | 10 a 50 | 417,793.44 | 71.38 |
| 4 | Alta | 50 a 200 | 55,141.91 | 9.42 |
| 5 | Muy alta | > 200 | 97,659.75 | 16.88 |

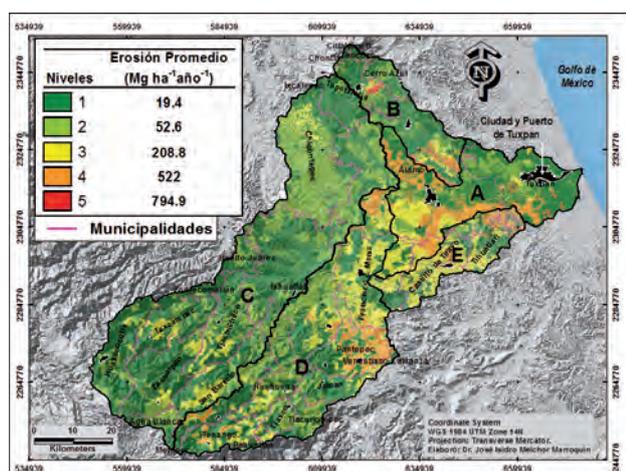


Figura 6.- Distribución espacial de la erosión hídrica en la Cuenca del Río Tuxpan, Veracruz, México.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la cuenca del Río Tuxpan, permiten dar una visión general del riesgo de erosión hídrica al que está expuesta dicha cuenca. Así mismo, como se ha reportado en otros estudios, uno de los factores más importantes en la evaluación de la erosión hídrica mediante la EUPS en un ambiente SIG, es la longitud y grado de pendiente (LS). Mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) se logró estimar las pérdidas del suelo a través del análisis multiplicativo de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (EUPS), donde se visualizaron y localizaron las áreas de mayor susceptibilidad de una manera más práctica a escala de cuenca hidrográfica.

Los resultados obtenidos señalan la urgente necesidad de realizar una adecuada planeación del territorio que conforma la cuenca del río Tuxpan, la cual involucre a todas las dependencias gubernamentales relacionadas con el manejo de cuencas, para realizar acciones que reduzcan la degradación del recurso suelo, entre las que se pueden mencionar las obras de conservación del suelo en áreas agrícolas y la implementación de la agroforestería para disminuir la presión hacia los bosques, retener el suelo y mejorar sus características físicas y químicas.

Finalmente, se considera que la información presentada es una primera estimación del problema de erosión hídrica en la cuenca estudiada, por lo que se considera que puede ser utilizada como una base para iniciar la elaboración de planes, programas y proyectos específicos para la mitigación de pérdida de suelo y control de erosión hídrica en la cuenca, que conduzcan a prolongar la vida útil del canal de navegación del río Tuxpan. Sin embargo, es recomendable realizar estudios más detallados por dependencias gubernamentales y de investigación, con el propósito de validar o actualizar la información generada en el presente estudio.

Referencias Bibliográficas

- Administración Portuaria Integral-Tuxpan (API-Tuxpan). 2011. Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Tuxpan 2011-2016. 372 p.
- Arellano, M.J. 1994. La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas. Evaluación y principios tecnológicos para su control. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Campos, A. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. Tercera Reimpresión. 456 p.
- Cano, A., O.U. Martínez & A. Quiñonez. 2007. Caracterización y diagnóstico del medio físico de la microcuenca Santa Rita del municipio de Arteaga, Coahuila. Publicación Especial No. 13. INIFAP. México. 62 p.
- Caro, B.J.L. 2014. Ordenamiento urbano y territorial visto desde el manejo de cuencas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Cuenca El Ahogado, Jalisco. Ciencia Ergo Sum. 21(1): 55-65.
- Castelán, V.R., V. Tamariz, G. Linares & A. Cruz. 2014. Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. Investigaciones Geográficas. 83:29-41.
- Castro, M.I. 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 34: 3-16.
- Colín, G.G., L.A. Ibañez, J. Reyes & R. Arteaga. 2013. Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del río Pichucalco. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. 5(1): 23-31.
- Cortés, T. (1991). Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México. 168 p.
- Dumas, S.A. 2012. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo. Trabajo de fin de Máster. Universidad Complutense. Madrid, España. 48 p.
- Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI). 2012. ARcGis 10.1 for Desktop. California, USA.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- Figueroa, S.B., A. Amante, H.G. Cortes, J. Pimentel, E.S. Osuna, J.M. Rodríguez & F.J. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de Postgraduados. México. 150 p.

- Flores, L.H. E., M. Martínez, J.L. Oropeza, E. Mejía & R. López. 2003. Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra* 21: 233-244.
- Foster, G. R., L.D. Meyer & C.A. Onstad. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans. ASAE*. 20 (4): 683-687.
- Galvis, M. D. X. 2008. Estimación de la Generación de Sedimentos en la cuenca hidrográfica del Río Sisga con base en la ecuación universal de pérdida de suelo. Universidad de la Salle, facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá.
- García, E. 1978. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 91 p.
- García, J.A., C. Díaz, M. Hernández & E. Quentín. 2010. Erosión y sedimentación en el Curso Alto del río Lerma, Estado de México. *Aqua-LAC*. 2(2): 45-55.
- Heras, R.R. 1976. Hidrología y Recursos Hidráulicos en Capítulo 1 de Estadística Aplicada en Hidrología, tema 5: relación entre elementos hidrológicos y elementos físicos geográficos. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid España. pp. 78-79.
- Hernández, L.G. 2006. Modelación de la interacción río-acuífero y su aplicación a un caso práctico. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León. 100 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Conjunto de datos vectoriales de edafología, uso del suelo, topográficos, hidrología y geología. México. 25/11/2015.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). México. 09/04/2015. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reecat/default.aspx>, e-mail: atencion.usuarios@inegi.org.mx.
- Lianes, E., M. Marchamalo & M. Roldán. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2): 217-235.
- López, G.A.D. 2005. Estimación de la erosión hídrica para diferentes escenarios de manejo en la microcuenca "El Calabozo" municipio de Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 114 p.
- McCool, D. K., G.R. Foster, C.K. Mutchler & L.D. Meyer. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*. 32 (5): 1571-1576.
- Montes, L.M.L., E.M. Uribe & E. García. 2011. Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2: 5-17.
- Orué, M.E., P. Laterra & F. Cabria. 2007. Expansión de la Frontera Agrícola en Argentina y Erosión Hídrica: Mapas de Riesgo Utilizando el Modelo USLE con Apoyo de SIG. *En: TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martin. Argentina. pp. 185-192.
- Pando, M., M. Gutiérrez, A. Maldonado, J.L. Palacio & A.E. Estrada. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 51: 23-36.
- Pastrana, O.O. 2014. Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los sistemas de información geográfica. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 127 p.
- Payet, E., P. Dumas & G. Pennober. 2011. Modélisation de l'érosion hydrique des sols su un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. *Vertigo- La revue électronique en sciences de l'environnement*, 11(3), 1-26.
- Pérez, N.S. 2013. Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 356 p.
- Ramírez, L.L. 2010. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del Río Juramento-Salta. Tesina de Grado. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 104 p.
- Renard, K.G., L.D. Meyer & G.R. Foster. 1996. Chapter 1. Introduction and history. pp. 1-18. *In: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation*. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Retureta, A. A. & G.M. Ascanio. 1998. Obtener y aplicar factores de la ecuación universal por uso del suelo en la subcuenca del río Atopa municipio de Coatepec, Veracruz, México. Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula, Chiapas. México. 350 p.
- Roldán, M. y Gómez, V. 2006. *Aplicación de la RUSLE v.1.06 en la evaluación de la pérdida de suelo en la cuenca alta del río Cega. Comparación de factores RUSLE-USLE*. Revista de Edafología (SECS), Vol.10 (3): 11-19
- Santacruz, D.L.G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la Cuenca del Río Cahoacán. Mexico. *Aqua-Lac*. 3 (1): 45-54.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de

estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental. México D.F. 360 p.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales de Precipitación. 25/11/2015.

[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75,](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)

e-mail: Webmaster.SMN@conagua.gob.mx

Viramontes, O., L.F. Escoboza, C. Pinedo, A. Pinedo, V.M. Reyes, J.A. Román & A. Pérez. 2007. Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *TECNOCENCIA*. 3:21-31.

Wischmeier W. H. & D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agr. Handbook 537*. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C. 67 p.

Wischmeier, W. H. & D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture Handbook, No. 282. 47 p.

Zamudio, V. & E. Méndez. 2011. La vulnerabilidad de erosión de suelos agrícolas en la región centro-sur del estado de Nayarit, México. *Ambiente y Desarrollo*. 15(28):11-40.

ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO SABINAL, CHIAPAS, MEXICO

CLIMATE CHANGE INDICES IN THE RIO SABINAL BASIN, CHIAPAS, MEXICO

José Alonso Figueroa Gallegos¹

Resumen

La Organización Meteorológica Mundial y el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices han propuesto 27 indicadores para la detección y monitoreo de cambios en los extremos del clima. Estos índices fueron calculados a partir de las series de datos observados de temperaturas –máximas y mínimas– y precipitación de un período de más de 50 años, en dos estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del Río Sabinal, Chiapas, México. La evidencia demuestra que de los 27 índices climáticos definidos por el ETCCDI, se constata una tendencia estadísticamente significativa en cinco índices relacionados con la temperatura del aire. Ambas estaciones presentan una tendencia al aumento de las noches tropicales (TR20), la temperatura mínima extrema (TNn) y la frecuencia de noches cálidas (TN90p), mientras que presentan una tendencia negativa (disminución) de la frecuencia de noches frías (TN10p) y el indicador de duración de los períodos fríos (CSDI), por lo que se puede concluir que la temperatura mínima y máxima presentan una tendencia ascendente significativa. No obstante, la base de datos considerada no permite identificar tendencias estadísticamente significativas en los índices relacionados con la precipitación.

Palabras clave: Índices de cambio climático, cuenca hidrológica, Río Sabinal

Abstract

The World Meteorological Organization and The Expert Team on Climate Change Detection and Indices have proposed 27 indices to detect and monitoring the changes in the climate extremes. These indices have been calculated from observed temperature data series –maximum and minimum- and precipitation of a period from more than 50 years in two climatological stations located in the basin of the Río Sabinal, Chiapas, Mexico, where they found from 27 ETCCDI climatic indices that it has obtained same tendency statistically significant in five indices related with the air temperature; As result, both climatological stations show an increasing trend of tropical nights (TR20), the minimum temperature (TNn) and the warm nights (TN90p), while they come up with a negative trend to the cold nights (TN10p) and the cold spell duration indicator (CSDI), so it can be concluded that the minimum and maximum temperature have a significant upward trend. The considered data base does not let identificare stadistically significance trends in the indices related to the precipitation.

Key words: Climatic change Indices, hydrological basin, Río Sabinal.

1. INTRODUCCIÓN

Los términos calentamiento global y cambio climático son conceptos que se encuentran estrechamente relacionados, a tal grado que en ocasiones suelen ser confundidos o utilizados como sinónimos. Según el IPCC (2007) el calentamiento global hace referencia al aumento gradual observado o previsto de la temperatura mundial en la superficie, como una de las consecuencias del forzamiento radiativo provocado por las emisiones antropogénicas. El cambio climático es una variación del estado del clima, que puede deberse a procesos internos naturales, a controles externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera.

La variabilidad del clima es un hecho constatado (IPCC, 2013) que genera múltiples desafíos ambientales, sociales y de gestión del territorio y sus recursos; las consecuencias del cambio climático

tendrán efectos diferentes en cada zona geográfica. De acuerdo con el informe IPCC (2007), las consecuencias del cambio climático más relevantes en Latinoamérica, se vinculan con variaciones en el régimen de precipitación y de escurrimiento superficial; modificaciones en el número de incendios forestales, rendimiento de los cultivos y afectación en la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura y generación de energía hidroeléctrica. Por ello, el cambio climático es motivo de un apasionado debate científico que plantea una considerable incertidumbre temporal, espacial y de magnitud; sin embargo, hay un importante consenso en su veracidad y en las consecuencias que se irán manifestando cada vez más en los ecosistemas así como en los sistemas socio-económicos asociados (IPCC, 2013).

La precipitación y la temperatura del aire son dos de las más importantes variables en el campo de la climatología e hidrología. La precipitación es un

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez Km 1081. Cel 9611713091
jose.figueroa@unach.mx

componente crítico en el proceso lluvia-escurrimiento que tiene influencia directa tanto en las inundaciones como en los períodos de sequía. La temperatura, por otra parte, juega un prominente y bien conocido rol en la evaporación, transpiración y demanda de agua tanto de animales como de humanos. Al mismo tiempo, tiene efectos significativos para el suministro de agua y su disponibilidad. Consecuentemente, las implicaciones de cambios en la precipitación y la temperatura son cruciales para los planificadores en relación con la evaluación exacta de su comportamiento e impacto de las variables hidrológicas.

Una manera de medir estos fenómenos climáticos es a través de indicadores, los cuales ilustran y comunican de forma sencilla un proceso complejo que incluye tendencias y progresión a lo largo del tiempo; estas mediciones, por lo general, son cuantitativas. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI por sus siglas en inglés), han formulado y definido un conjunto de 27 índices para estudiar situaciones climáticas aplicando una metodología que garantiza el análisis global de resultados; dichos índices se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Índices climáticos definidos por el ETCCDI

| Código | Nombre | Definición |
|---------|--|--|
| SU25 | Días de verano | Número de días en 1 año en que TX > 25°C |
| ID0 | Días con hielo | Número de días en 1 año en que TX < 0°C |
| TR20 | Noches Tropicales | Número de días en 1 año en que TN > 20°C |
| FD0 | Días con helada | Número de días en 1 año en que TN < 0°C |
| GSL | Duración de la estación de Crecimiento | Número de días en 1 año entre la primera racha de, como mínimo, 6 días con TG>5°C y la primera racha después de 1 de julio con, como mínimo, 6 días con TG<5°C |
| TXx | Temperatura máxima extrema | Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria |
| TXn | Temperatura máxima más baja | Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria |
| TNx | Temperatura mínima más alta | Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria |
| TNn | Temperatura mínima extrema | Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria |
| Tx10p | Frecuencia de días frescos | Porcentaje de días en que TX<percentil 10 |
| Tx90p | Frecuencia de días calurosos | Porcentaje de días en que TX>percentil 90 |
| Tn10p | Frecuencia de noches frías | Porcentaje de días en que TN<percentil 10 |
| Tn90p | Frecuencia de noches cálidas | Porcentaje de días en que TN>percentil 90 |
| WSDI | Duración de los períodos cálidos | Número de días en un año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con TX>percentil 90 |
| CSDI | Duración de los períodos fríos | Número de días en un año que, como mínimo, hay 6 días consecutivos con TN<percentil 90 |
| DTR | Rango diurno de temperatura | Media anual de la diferencia entre TX y TN |
| Rx1day | Precipitación máxima en un día | Valor máximo anual de la PPT diaria |
| Rx5day | Precipitación máxima en cinco días | Máxima anual de la PPT registrada en 5 días consecutivos |
| SDII | Índice simple de intensidad diaria | PPT total anual dividida entre el número de días con PPT≥1mm |
| R10 | Días con lluvia mayor a 10 mm | Número anual de días en que PPT≥10mm |
| R20 | Días con lluvia mayor a 20 mm | Número anual de días en que PPT≥20mm |
| R25 | Días con lluvia mayor a 25 mm | Número anual de días en que PPT ≥ 25 mm |
| CDD | Días secos consecutivos | Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT < 1 mm |
| CWD | Días húmedos consecutivos | Máximo número en 1 año de días consecutivos con PPT ≥ 1 mm |
| R95p | Días muy húmedos | PPT total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95 |
| R99p | Días extremadamente húmedos | PPT total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99 |
| PRCPTOT | Precipitación total | PPT total anual en días en que PPT ≥ 1 mm |

Nota: donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PPT la precipitación; el cálculo de percentiles, si corresponde, se realiza tomando como período de referencia el trentenio 1961-1990. Fuente: Vázquez (2010)

Recibido: 17/05/2016
Aceptado: 13/07/2016

1.1 Estudios de búsqueda de tendencias climáticas en la temperatura

Se han consultado diversos estudios relacionados con las tendencias climáticas en diversas regiones del planeta, con el objetivo de contar con un panorama global sobre la situación del tema. El estudio desarrollado por Arora, M., Goel, N. K, y Singh, P. (2005) analiza los registros de temperatura – media, máxima y mínima– de 125 estaciones climatológicas de la India, los investigadores identifican que la temperatura en el país ascendió en el periodo de 1941 a 1999, con valores promedio de 0.42, 0.92 y 0.09 °C por cada 100 años, respectivamente. Igualmente, Singh, P., Kumar, V., Thomas, T. y Arora, M. (2008) realizan una investigación que examina los datos concernientes a 100 años de temperatura en la India – media, máxima y mínima–, con base en los registros de 43 estaciones climatológicas y siete cuencas en los que identifican una tendencia ascendente en la temperatura media con valores que varían de 0.40 a 0.60 °C por cada 100 años.

Por su parte, Martínez, C. J., Maleski, J. J. y Miller, M.F. (2012) llevan a cabo un estudio para encontrar tendencias en las temperaturas medias, máximas y mínimas del Estado de Florida, Estados Unidos. Los resultados de la investigación constatan tendencias ascendentes en la temperatura máxima en algunas de las estaciones estudiadas y descendentes en otras del mismo Estado. Un estudio similar de Campos-Aranda (2015) sobre 16 estaciones climatológicas del Estado de Zacatecas, México, con más de 50 años de registro de temperatura máxima del mes de mayo, constata que cuatro de las ocho estaciones climatológicas de la Región Hidrológica 12 Parcial (Río Santiago) presentan tendencia ascendente significativa.

De igual manera, Chattopadhyay, S., y Edwards, D. (2016) estudiaron 42 estaciones con datos de temperatura del Estado de Kentucky, Estados Unidos de América, e identifican que únicamente tres estaciones presentaron tendencia ascendente de la temperatura media anual. Finalmente, el estudio realizado por Gil-Guirao, S. y López-Bermúdez, F. (2015) encuentra evidencias de una ligera tendencia al aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones en la cuenca del río Quípar, España.

1.2 Proyecciones climáticas para el estado de Chiapas

Chiapas es uno de los Estados de la república mexicana que cuenta con una gran diversidad de especies y ecosistemas, la región forma parte de la zona hidrológica número 30 Grijalva Usumacinta, la cual es una cuenca transfronteriza que nace en la República de Guatemala y cruza los Estados de Chiapas y Tabasco, una parte menor del Estado de Campeche y una pequeña porción de los Estados

de Oaxaca y Veracruz. La cuenca del Río Grijalva comprende cuatro porciones geográficas bien definidas que se conocen con los nombres de Alto Grijalva, Medio Grijalva, Bajo Grijalva –Sierra– y Bajo Grijalva –Planicie–. La cuenca del río Sabinal, se encuentra dentro de la porción Medio Grijalva.

Según Ramos (2010) las tendencias climatológicas previstas en el Estado de Chiapas se relacionan con el incremento en la temperatura media proyectada, simuladas con el Modelo Japonés TL959 bajo el escenario SRES A1B. Para el año 2020 se prevé un aumento de 1.1 °C, para el año 2030 incrementará entre 1.5 y 1.7° C, y para 2080 aumentará 2.2° C. Respecto a las variantes en la precipitación, la prospectiva es un decremento de 4% para el año 2020, entre el 6% y 8% para el año 2030, y entre el 10% y 14% para el año 2080.

Esta investigación tiene por objetivo contribuir al conocimiento de la variabilidad climática, en el marco del cambio global, al analizar la evolución de las precipitaciones y temperaturas que permiten explicar los posibles patrones de cambio a través de los índices climáticos del ETCCDI, en una pequeña cuenca hidrológica del Sureste Mexicano, la del Río Sabinal, Chiapas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La cuenca del río Sabinal (Figura 1), cuenta con un área aproximada de 407 km², está ubicada dentro de la Región Hidrológica no. 30 denominada Grijalva-Usumacinta, en la cuenca administrativa Grijalva-Tuxtla Gutiérrez. La temperatura media anual es de 25.4 °C, la temperatura promedio máxima es de 32.3 °C y la temperatura promedio mínima es de 18.3 °C. De acuerdo con los límites de temperatura media anual establecidos por García (1988), la cuenca presenta una condición del clima que tiende a ser semicálido en la región poniente (San Fernando y Berriozábal), ya que su temperatura media anual se acerca a los 22 °C, y una condición de clima que tiende a ser muy cálido hacia el oriente (Tuxtla Gutiérrez) con temperaturas medias próximas a los 26 °C.

La precipitación media anual es de 956 mm y los meses más lluviosos comprenden de mayo a octubre. La cuenca del río Sabinal cuenta con centros poblados importantes: San Fernando, Berriozábal y Tuxtla Gutiérrez. Dentro de la cuenca existen cuatro estaciones climatológicas, indicadas en la tabla 2, en donde únicamente las estaciones Tuxtla y Puente Colgante cuentan con más de cincuenta años de registros. En función de ello, exclusivamente se consideran los registros de estas dos estaciones en los análisis del presente trabajo.

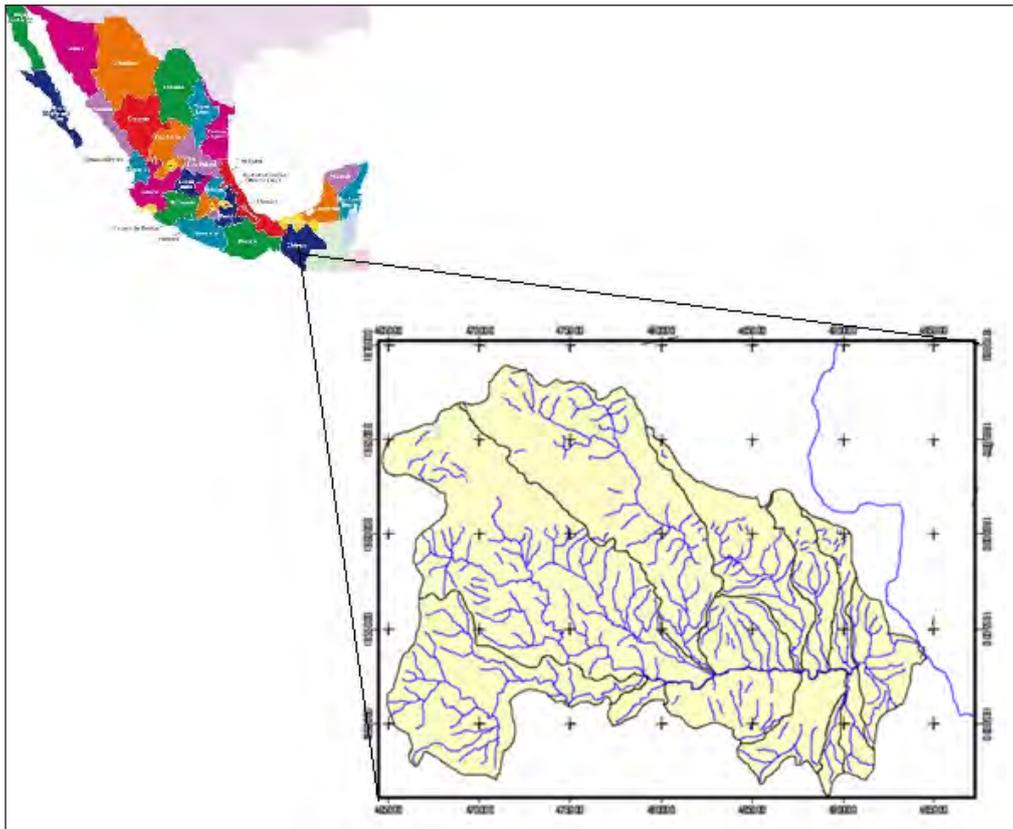


Figura 1.- Cuenca del Río Sabinal, Chiapas, México²

Tabla 2. Ubicación de las estaciones climatológicas

| Estación | Latitud | Longitud | Elevación |
|----------------------|---------|----------|-----------|
| 7202 Tuxtla | 16.7528 | -93.1167 | 543msnm |
| 7134 Puente Colgante | 16.7406 | -93.0311 | 418msnm |
| 7372 Berriozabal | 16.7969 | -93.2656 | 890msnm |
| 7319 San Fernando | 16.8731 | -93.2269 | 950msnm |

Fuente: SMN (2016)

2.2 Metodología

Tal como lo establece Vázquez (2010) el cálculo de índices climáticos del ETCCDI es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios. El Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI) ha formulado y definido un conjunto de índices para analizar situaciones climáticas extremas aplicando los pasos mostrados en la figura 2, los cuales garantizan que los resultados puedan ser analizados de forma global.

El cálculo de los índices del ETCCDI es relativamente directo si se realiza con alguna de las herramientas de software como RClimdex y RHTest, diseñadas para el propósito (Wang, X. y Feng, Y., 2004). El procedimiento es el siguiente: primeramente se requiere seleccionar los datos diarios -de lluvia, temperatura máxima y temperatura mínima- a partir

de los cuales serán calculados los índices, de manera que sólo las series de observaciones más completas, continuas y libres de errores sean analizadas. Una vez que se ha seleccionado un conjunto de datos adecuado para el análisis, se requiere que éste sea sometido a un procedimiento de control de calidad, supeditando valores poco comunes a procedimientos estadísticos de verificación (típicamente 4 desviaciones standard) y de escrutinio experto con base en conocimientos de la climatología física de cada región.

Finalmente, cuando los datos han pasado el proceso de control de calidad, estos deben ser sujetos a prueba y análisis de homogeneidad aplicando la prueba t de máxima penalización o la prueba F de máxima penalización, ambas con sus intervalos de confianza del 95%, dejando para el análisis sólo las series de datos razonablemente homogéneas. Idealmente, la serie no debería de contener ningún tipo de cambio significativo para poder ser utilizada en el cálculo de índices de cambio climático, a menos de que dicho cambio estuviera bien documentado y fuera debido únicamente al clima y no a ningún factor artificial del proceso de medición. Las series homogéneas son entonces utilizadas para calcular los índices de cambio climático de cada estación individual, para posteriormente integrar la zona regional del área en estudio y analizar tendencias.

² CENAPRED (2004)

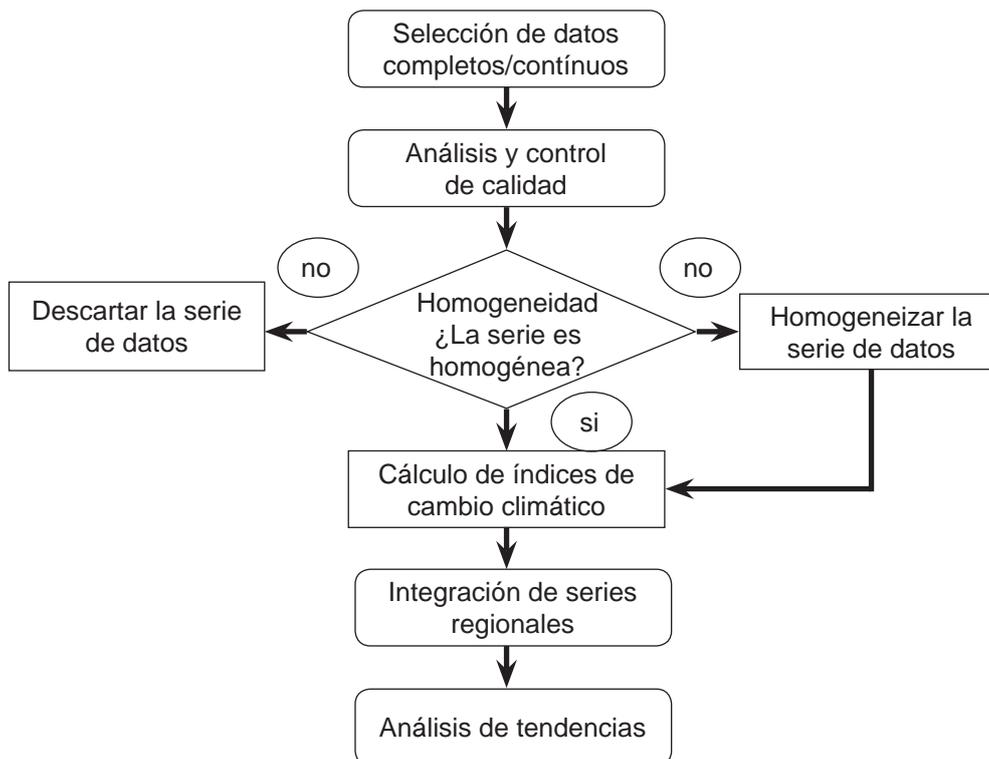


Figura 2.- Pasos para el cálculo y análisis de los índices de cambio climático

Fuente: Vázquez (2010).

3. RESULTADOS

De los 27 índices climáticos definidos por el ETCCDI y calculados con los datos de 1951 a 2014 de las estaciones climatológicas Tuxtla y Puente Colgante, se constata tendencia estadísticamente significativa

en cinco índices relacionados con la temperatura del aire (Tabla 3). La temperatura presenta una tendencia definida. La base de datos considerada no permite identificar cambios en el régimen de precipitaciones.

Tabla 3. Tipo de tendencia (si esta es estadísticamente significativa) para las estaciones de Tuxtla y Puente Colgante

| Índice | | ¿Tendencia estadísticamente significativa? (nivel de confianza del 95%) | | | |
|--------|----------------------------------|---|----------------|----------------------|----------------|
| Código | Nombre | Est. Tuxtla | Tipo Tendencia | Est. Puente Colgante | Tipo Tendencia |
| TR20 | Noches tropicales | Si | Aumento | Si | Aumento |
| TXx | Temperatura máxima extrema | No | --- | Si | Aumento |
| TXn | Temperatura máxima extrema | No | --- | Si | Aumento |
| TNx | Temperatura mínima más alta | No | --- | Si | Aumento |
| TNn | Temperatura mínima extrema | Si | Aumento | Si | Aumento |
| Tx10p | Frecuencia de días frescos | No | --- | Si | Disminución |
| Tx90p | Frecuencia de días calurosos | No | --- | Si | Aumento |
| Tn10p | Frecuencia de noches frías | Si | Disminución | Si | Disminución |
| Tn90p | Frecuencia de noches cálidas | Si | Aumento | Si | Aumento |
| WSDI | Duración de los períodos cálidos | No | --- | Si | Aumento |
| CSDI | Duración de los períodos fríos | Si | Disminución | Si | Disminución |
| DTR | Rango diurno de temperatura | Si | Disminución | Si | Aumento |

Fuente: elaboración propia (2016)

De los cinco índices climáticos relacionados con la temperatura, ambas estaciones presentan una tendencia al aumento las noches tropicales (TR20), la temperatura mínima extrema (TNn) y la frecuencia de noches cálidas (TN90p). Al mismo tiempo se observa una tendencia negativa (disminución) de la frecuencia de noches frías (TN10p) y el indicador de duración de los períodos fríos (CSDI).

Respecto a la estación de Puente Colgante, además de las anteriores, se identifica una tendencia al aumento en la Temperatura máxima extrema (TXx), la temperatura máxima más baja (TXn), la temperatura mínima más alta (TNx), la frecuencia de noches cálidas (TX90p), la duración de los períodos cálidos (WSDI), el rango diurno de temperatura (DTR) y la disminución en la Frecuencia de días frescos (Tx10p).

4. DISCUSIÓN

La temperatura mínima y la máxima presentan una tendencia ascendente significativa que muestra coincidencia con lo reportado por Campos-Aranda (2015) para el estado de Zacatecas y con las tendencias previstas para el estado de Chiapas reportadas por Ramos (2010). Cabe destacar que los resultados expuestos se limitan a las áreas geográficas de donde proceden los registros y es difícil extrapolarlos a otras zonas.

El estado de Chiapas, México, está caracterizado por poseer una de las más grandes redes hidrográficas del país, entre las principales se encuentran la cuenca Grijalva- Usumacinta, con aproximadamente el 30% del volumen total del escurrimiento anual de toda la república, que alimentan al Sistema Hidroeléctrico del Grijalva con cuatro de las presas hidroeléctricas más importantes: Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas.

Aunque en la región se cuentan con pocas estaciones con registros de más de 50 años, es necesario realizar este tipo de análisis en otras cuencas, para poder establecer si las tendencias aquí detectadas son generalizadas y se puedan establecer medidas orientadas a redimensionar los sistemas de abastecimiento de todo tipo, especialmente las presas hidroeléctricas, pues la evaporación sin duda estará aumentando, disminuyendo la disponibilidad de agua e incrementando las necesidades.

BIBLIOGRAFIA

- Arora, M., Goel, N, K., and Singh, P. (2005). Evaluation of Temperature Trends over India. *Hydrological Sciences Journal*, 50(1), 81-93.
- Campos-Aranda, D. (2015). Búsqueda del cambio climático en la temperatura máxima de mayo en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(3), 143-160.
- Chattopadhyay, S., and Edwards D. R. (2016). Long-Term Trend Analysis of Precipitation and Air Temperature for Kentucky, United States. *Climate*, 4(1), 10.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F.: UNAM.
- Gil, S., y López, F. (2011). Tendencia de las precipitaciones y temperaturas en una pequeña cuenca fluvial del sureste peninsular semiárido. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(56), 349-371.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007-The Physical Science Basis*. Cambridge United Kingdom: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases Físicas*. Suiza: IPCC.
- Martínez, C. J., Maleski, J. J., and Miller, M. F. (2012). Trends in Precipitation and Temperature in Florida, USA. *Journal of Hydrology*, 252-253, 259-281.
- Ramos, S. (2010). *Escenarios Climáticos para el Estado de Chiapas. Informe Final Fase II*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: UNICACH.
- Singh, P., Kumar, V., Thomas, T., and Arora, M. (2008). Basin Wide Assessment of Temperature Trends in Northwest and Central India. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 421-433.
- SMN. (11 de Enero de 2016). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 11 de Enero de 2016, de Servicio Meteorológico Nacional: <http://smn.conagua.gob.mx>
- SNPC. (2004). *Configuración del sistema de alerta hidrometeorológica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. México, D.F.: CENAPRED.
- Vázquez, J. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. México, D. F.: SEMARNAT.
- Wang, X., y Feng, Y. (2013). *RHeststsV4 User Manual*. Toronto, Canadá: CRD-ASTDCTB.

MODELO PARTICIPATIVO DE ORGANIZACIÓN PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO TAPENAGÁ

ORGANIZATION PARTICIPATORY MODEL FOR THE INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT AT TAPENAGÁ RIVER BASIN

Cano, Elvio O.¹; Schreider, Mario I.²; Ruberto, Alejandro R.³

Resumen

En la provincia del Chaco, República Argentina, se conformaron organizaciones de productores y pobladores rurales, que tenían como propósito el manejo del agua y el suelo en sus jurisdicciones, denominadas: Comisiones de Manejo de Agua y Suelo (COMAS). En la subcuenca alta del Río Tapenagá, un área de intensa actividad agrícola, se conformó una de ellas identificada como: COMAS 21-Colonia Bajo Hondo. Esta Comisión funcionó entre 1982 y 1986, luego de lo cual se disolvió envuelta en conflictos entre sus mismos integrantes por irreconciliables discrepancias sobre las obras y acciones que ejecutaban, así como cuestionamientos a los manejos administrativos y contables. Desde entonces a la fecha, por inquietud e iniciativa de los propios actores, hubo varios intentos de reflotarla, pero ante los recelos y dudas que se generaron en caer nuevamente en los problemas de discrecionalidad y visiones sectoriales, que había generado aquella crisis, estos intentos fracasaron invariablemente. Asimismo, ante la reiteración de las inundaciones y los graves daños e inconvenientes que provocaban, y en respuesta a los persistentes reclamos de la población, el gobierno provincial construyó una extensa red de desagües en la cuenca. Finalizadas estas obras sobrevino un período de varios años caracterizados por una importante sequía en la región, lo que dio lugar a nuevas controversias debido a que las obras fueron concebidas solo con el objeto de evacuar agua y sin contemplar la posibilidad de incorporar obras de contención para retener el recurso en épocas de déficit. En este contexto, los distintos sectores de la producción con actividad en la cuenca, reclaman una gestión del agua que contemple las características y particularidades ambientales de la cuenca, e integre los intereses de todos los actores. Este trabajo presenta un modelo de organización de los actores, a partir de las denominadas COMAS, contempladas en la legislación vigente, pero introduciendo las modificaciones necesarias a efectos de incorporar a todos los actores y superar las falencias que provocaron su crisis, con el propósito de contribuir a la gestión integrada de los recursos hídricos. El modelo incorpora un segundo grado de organización, en el cual las COMAS se agrupan en subcomités en correspondencia con las subcuencas hidrológicas que conforman la cuenca. Estos subcomités a su vez, conforman un tercer grado de organización, el Comité de Cuenca, en un esquema integrador, sostenido en un proceso “de abajo hacia arriba” en el que, al tiempo que se promueve la participación y el enriquecimiento del proceso de gestión, se respetan los roles institucionales de los actores involucrados.

Palabras claves: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos; identificación de actores; COMAS; Comité de cuenca del río Tapenagá.

Abstract

In the Chaco province, Argentina, commissions composed by farmers and rural people, were created in order to improve the management of water and soil resources of the basin. These commission were called “water and soil management Commissions” (COMAS). One of them, called “COMAS 21 Colonia Bajo Hondo” was created in the upper sub basin of Tapenagá river, an area with an important agriculture activity. This COMAS operated from 1982 to 1986. Then, it was dissolved for being involved in conflicts among its members for irreconcilable disagreements about the works and actions that were executed, as well as questioning related to administrative and countable management. Since then to the date for an initiative and inquietude of the actors, there were many attempts of refloating the commission, but due to the doubts and mistrusts of going back to the same problems of discretion and sectorial views, these attempts finally failed. Likewise, because of the repeated flood and the severe damage caused by it, and as an answer to the persistent population claims, the province government built and extensive drainage net at the basin. After this, a period of many years of a serious drought befell on the region, which brought up new controversies because the work were thought only for evacuating water and the possibility to incorporate sites for containing the water resource for drought periods were not taking into account. In this context different production sectors with activities at the basin claim a water management which contemplates the characteristics and environmental particularities at the basin and integrates the interests of all the actors. The present paper presents an organization model of the actors, starting from the called COMAS, which are gazed at the current legislations, but introducing the necessary modifications in order to incorporate all the actors and overcome the failures which produced the crisis, with the purpose of contributing to an integrated management of water resources. The model also incorporates a second organization degree which COMAS are grouped in sub-commissions in correspondance to the hydrologic sub-basins which are part of the basin. These sub-commissions shape a third degree organization, the basin Commission, in an integrated scheme supported in an “up and down” process, in which, at the time that participation and enrichment of the management process is promoted, the involved institutional actors roles are respected as well.

Key words: Integrated Water Resources Management, actors identification, COMAS, Commission of Tapenagá River Basin

¹ Consultor. Resistencia. Provincia del Chaco - elvio_cano@yahoo.com.ar

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral-Santa Fe. mschreider@gmail.com

³ Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia. Chaco – aleruberto44@yahoo.com.ar

1. INTRODUCCIÓN

Entre los años 1982 a 1986 en la provincia del Chaco, República Argentina se conformaron organizaciones de productores y pobladores rurales, que tenían como propósito el manejo del agua y el suelo en sus jurisdicciones, denominadas: Comisiones de Manejo de Agua y Suelo (COMAS). En la subcuenca alta del Río Tapenagá (Fig.1 y 2), un área de intensa actividad agrícola, se conformó una de ellas identificada como: COMAS 21-Colonia Bajo Hondo. Estas organizaciones funcionaron en forma efectiva durante tres años, con un fuerte y exclusivo sesgo hacia la construcción de canales de desagües y de defensas del área agrícola, en un contexto general caracterizado ambientalmente por continuas y abundantes precipitaciones que generaban recurrentes inundaciones. Desde el punto de vista institucional el contexto en que se desarrollaron las COMAS, se caracterizó por múltiples superposiciones de roles de los diversos organismos estatales que actuaban en la cuenca. A los factores señalados se debe añadir la ausencia de planificaciones y programas para el ordenamiento y manejo en el sector hídrico, y un accionar guiado por visiones e intereses sectoriales, centrado exclusivamente en la construcción de canales de desagüe, todo lo cual desembocó finalmente, en un generalizado estado de "anarquía hídrica". Tal estado de situación en la gestión de la cuenca y del recurso hídrico en particular, no hizo más que profundizar los problemas de anegamientos en el área agrícola que se pretendían resolver, pero a la vez, trasladando y agravando el fenómeno hacia aguas abajo, a lo largo de la cuenca, por cuanto no existía una red de drenaje en la cuenca, y tampoco cauces naturales ya que el río Tapenagá recién toma forma como tal, en la parte final aguas abajo de la subcuenca media, e inicio de la subcuenca baja.

Esto creó un clima de conflictividad, hacia la COMAS 21, organismo ejecutor de los canales, y, entre los mismos productores vecinos de la subcuenca alta, que se extendió también con los pobladores y productores de aguas abajo, de la subcuenca media, en la que se produjeron además de las pérdidas en el sector productivo y en infraestructura, imposibilidad de abastecimientos, suspensión de clases, evacuaciones de la población rural y enfermedades de origen hídrico. En la COMAS 21 los conflictos se plantearon también dentro de la organización, mediante cuestionamientos entre sus mismos integrantes, centrados en el desvío del cumplimiento de sus objetivos, en la arbitrariedad de sus acciones operativas ante los fenómenos de inundaciones que afectaban la zona, y el mal manejo de sus fondos. Como consecuencia de este estado de situación, el cual se replicaba con características similares en otras COMAS de la provincia, el organismo estatal que las controlaba decidió suspender todo tipo de controles, aportes, asistencias, y eventuales autorizaciones, por lo que las COMAS, inhabilitadas

de hecho para actuar, dejaron de existir. Con el transcurrir de los años ante la reiteración anual de las inundaciones y sus graves consecuencias, productivas, económicas, sociales y ambientales, y en respuesta a los generalizados reclamos, el gobierno provincial avanzó en la elaboración de los proyectos de desagües de la cuenca del río Tapenagá, concretado entre los años 2004 a 2006. Así fue que la Administración Provincial del Agua de la Provincia del Chaco (APA) construyó 135 kilómetros de canales de desagües (PROSAP, 2012), que tomaron las improvisadas y erráticas canalizaciones existentes en el área agrícola, ubicadas en la parte superior o alta de la cuenca, conduciéndolas hacia aguas abajo hasta efectuar su descarga en el cauce del río Tapenagá.

Coincidentemente cuando se estaba en la etapa de finalización de estas obras, sobrevino un período caracterizado por una fuerte y larga sequía en la región, por lo cual en la cuenca se secaron esteros y cañadas, se produjo un importante abatimiento de napas, se secaron pozos y fuentes de agua, generando severas restricciones productivas. En el sector agrícola, provocó la disminución en cuanto a la superficie de siembra, y la caída de rendimientos. En tanto en el sector ganadero se produjeron importantes pérdidas en kilos por animal, y con directa mortandad de hacienda. Todo ello, en un contexto donde simultáneamente, se agravaron otro tipo de problemas tales como la degradación de los suelos, por efectos de la erosión hídrica producida durante los anteriores años de inundaciones; y, ante la gravedad de la crisis, se originaron serias controversias comunitarias hacia la concepción y la existencia de dicha red atento que la misma fue concebida con una exclusiva visión de evacuación de excesos hídricos, no contemplando posibilidades de retención y manejo del agua en períodos de déficits. En esta dicotomía existente, entre el estándar deseable y las realidades verificables en campo, confluyen varias cuestiones que merecen mencionarse: normativas y reglamentaciones sin efectiva aplicación, una inadecuada organización, la inexistencia de canales participativos y de información de los actores, y un dominante enfoque sectorial en la gestión de los recursos hídricos. Todo ello da como resultado una situación caracterizada por conflictos y reclamos coyunturales sectoriales no resueltos, que no encuentran canales que promuevan la cooperación e integración, en lugar de competencia.

A los fines de contribuir a la superación de esta brecha de desarrollo, en el presente trabajo se desarrolla un modelo de organización de los actores en la cuenca, planteando un esquema de gestión para el desarrollo eficiente, equitativo y sostenible de los recursos hídricos de la cuenca del río Tapenagá, sustentado en los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), tal que contemple adecuadamente la dinámica de la interrelación entre

los actores (sistema social) y su entorno (sistema natural) (Falkenmark, 2003).

1.1. Ubicación de la cuenca y descripción general

La cuenca hídrica del río Tapanagá se encuentra en el centro-sur de la provincia del Chaco (Figura 1); su cabecera superior tiene las siguientes coordenadas geográficas: 26°33' latitud sur y 60°38' longitud oeste; y en el otro extremo, aguas abajo, las coordenadas geográficas son: 28°04' latitud sur y 59°09' longitud oeste, quedando comprendida en la Faja 5 del sistema de coordenadas GAUSS-KRÜGER, para el territorio de la República Argentina.

La cuenca se orienta en sentido noroeste-sureste (Bareiro et al, 2004) con un desarrollo longitudinal de 230km entre sus extremos; su superficie total es de 4.886,56km²; presenta una forma alargada del tipo de embudo suave, decreciente en el sentido del escurrimiento hídrico superficial. En su tramo final aguas abajo, ingresa en territorio de la Provincia de Santa Fe, con un recorrido de 8 km. lineales, e inmediatamente después desemboca en el valle de inundación del Río Paraná. En la cuenca, la provincia del Chaco tiene una superficie de 4.754,54km², que representa el 97,3% del total, y la provincia de Santa Fe tiene una superficie de 132,02km², que representa el 2,7% del total.



Figura 1.- Ubicación de la cuenca hídrica del río Tapanagá, con delimitación de la Faja 5 del sistema de coordenadas Gauss-Krüger

En función de la hidrodinámica superficial, la APA diferencia tres subcuencas (Valiente, 2004), cuyas delimitaciones se materializan en el terreno por el trazado de las rutas existentes (Figura 2). Estas son: 1) *Subcuenca Alta* (SA): es la cabecera hidrológica de la cuenca; zona de intensa producción agrícola; se extiende entre, la Ruta Nacional N° 89 en el extremo noroeste, hacia aguas abajo hasta la Ruta Provincial N° 4; tiene una superficie de 197.121,83 hectáreas, lo que representa 40,3% sobre el total; 2) la *Subcuenca Media* (SM): se extiende desde la Ruta Provincial N° 4 hacia aguas abajo en dirección sudeste hasta la Ruta Provincial N° 13; caracterizada por la presencia de grandes esteros y cañadas; de dominante producción ganadera; tiene una superficie de 207.995,74 hectáreas, lo que representa 42,6% sobre el total; y, 3) la *Subcuenca Baja* (SB): se extiende desde la Ruta Provincial N° 13 hacia aguas abajo en dirección sudeste, hasta la Ruta Nacional N° 11; caracterizada por la presencia del cauce del río Tapanagá en toda su extensión; de dominante actividad ganadera con presencia de sectores con actividad agrícola en sus tramos inferiores; tiene una superficie de 83.538,43 hectáreas, lo que representa 17,1% sobre el total.

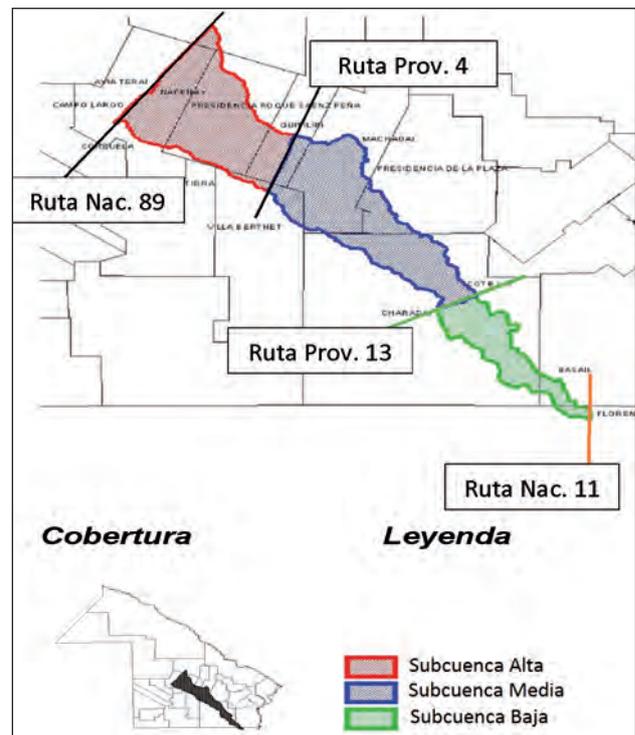


Figura 2.- Subcuencas hídricas que componen la Cuenca del río Tapanagá (Fuente: Valiente, 2004)

2. ACTORES EN LA CUENCA

2.1. Metodología empleada para su identificación

En las cuencas hidrográficas habitan, trabajan, o tienen responsabilidades, productores, familias, organizaciones o instituciones (privadas y estatales), con diferentes roles, funciones y grados de participación. Sin embargo, no todos tienen en claro qué es una cuenca hidrográfica y la responsabilidad que les cabe en el manejo de la misma (Faustino et al, 2006). En las cuencas, los terrenos y parcelas, pueden

ser de propiedad privada, o de propiedad colectiva, tanto pública en la órbita estatal, como privada en la órbita de una asociación comunitaria. Estos grupos de interés generalmente no se encuentran organizados, y menos, articulados unos con otros (Prins y Kammerbauer, 2009), pero se constituyen en actores fundamentales por su incidencia en la cuenca, y el manejo que eventualmente realizan ante situaciones de inundación y sequía. Por lo señalado su correcta identificación resulta un factor clave para el éxito de un proceso de gestión.

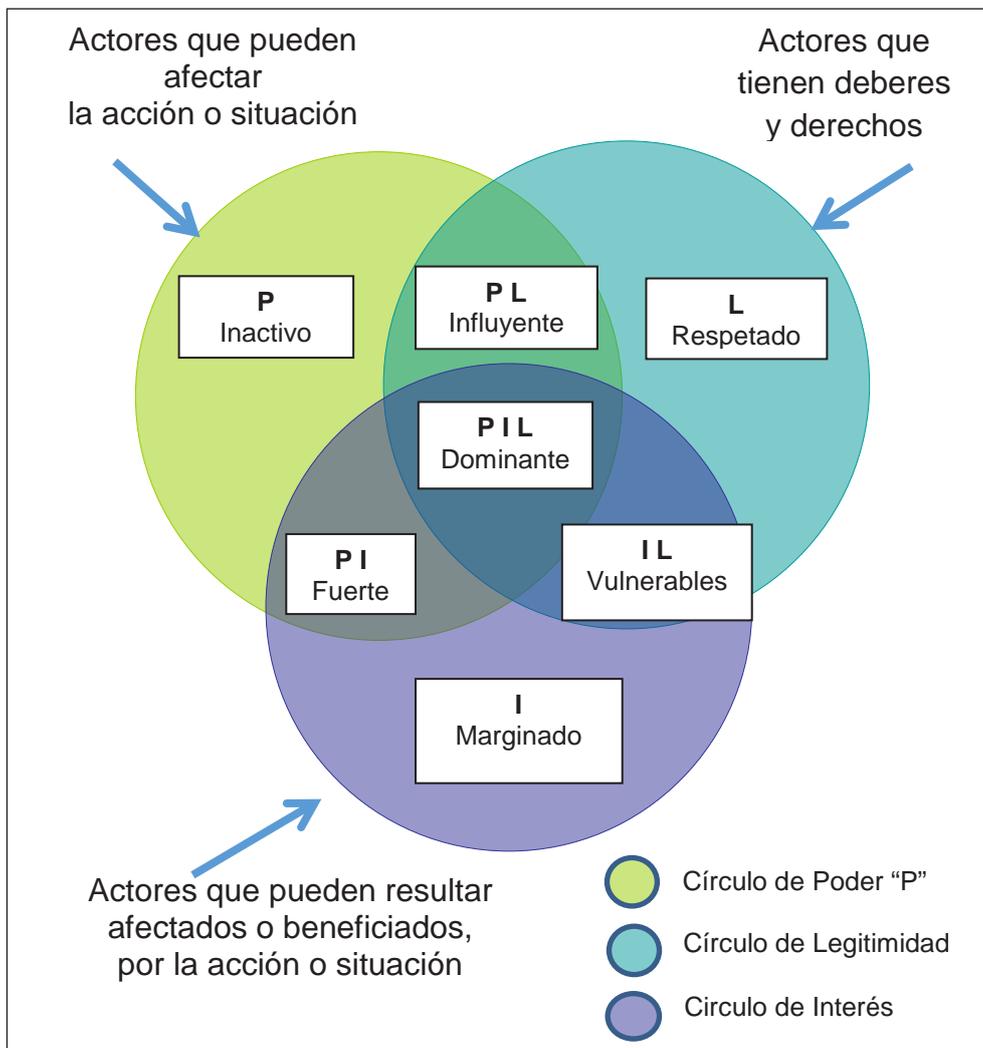


Figura 3.- Relaciones de influencia y categorías de actores (adaptado de Chevalier y Buckles, 2006).

La identificación de actores clave es entonces, un paso central para evaluar posibles modelos organizativos a implementar en la cuenca y su análisis tiene el objetivo de entender y valorar el interés, importancia e influencia que estos tienen sobre el territorio y sobre los programas y proyectos que en él se pretendan realizar. De acuerdo a Rietbergen-McCracken y Nayaran (1998), esto nos permite saber a quién involucrar y de qué modo.

La identificación de actores en este trabajo, se hizo desde dos dimensiones metodológicas, que resultaron congruentes y complementarias. La

primera de ellas, corresponde a la determinación de la "esfera de acción" o proceso relevante del que participan los interesados en el marco de la estructura de organización de la sociedad que componen (Urrutia, 2004). La segunda corresponde al "enfoque de influencia" que los distintos actores tienen en la cuenca, denominado: Análisis Social (Chevalier y Buckles, 2006). Este análisis permite conocer la red de relaciones de cooperación y conflictos entre los actores identificados y el "poder" que posee cada uno en el entramado social. Esta metodología conocida por su acrónimo CLIP (formada por las iniciales de

los factores que considera), permite caracterizar los perfiles de los actores involucrados en un problema o acción, basado en los siguientes cuatro factores: las relaciones existentes de Colaboración/ Conflicto (C) entre los interesados, su Legitimidad (L), Intereses (I) y Poder (P), relaciones a partir de las cuales establece las siguientes categorías de actores: dominante, fuerte, influyente, inactivo, respetado, vulnerable y marginado. En la Figura 3 se presenta mediante un diagrama de Venn, las relaciones entre los tres conjuntos de actores que considera el método, identificándose en el mismo, las categorías resultantes. Se identifica a qué corresponde cada círculo de influencia, y como resultado de su interrelación, la categoría de actor según se encuentre en un solo círculo, participe de dos, o de los tres. Este Análisis Social (CLIP) permitió comprender los roles que cada uno de estos actores tiene y cómo deben ser considerados a la hora de proponer una estructura de organización para la cuenca.

La identificación de actores se realizó a partir de la revisión de fuentes secundarias tales como, informes del proyecto denominado "Saneamiento hídrico y desarrollo productivo de la cuenca de la línea Tapenagá" (Bareiro et al, 2004); el Plan de Desarrollo Indígena de la cuenca (PDI) realizado en el marco de este proyecto de saneamiento hídrico de línea Tapenagá; informes productivos sectoriales anuales, de los organismos provinciales, e informes del CONES, Consejo Económico y Social de la Provincia (CONES, 2012).

A continuación, se diagramó y efectuó un trabajo de campo ajustando y completando la información obtenida de las fuentes secundarias, realizando entrevistas a los actores, productores, pobladores, así como funcionarios e integrantes de los organismos estatales públicos con actividad en la cuenca. Todo ello con el objetivo de captar y considerar eventuales aspectos que genera la dinámica de las relaciones entre grupos y sectores sociales, y a la vez, a partir de la base conceptual del presente trabajo, integrar los criterios y las opiniones de los actores desde la etapa de identificación. La información detallada de los trabajos de campo realizados se presenta en Cano (2014).

Las entrevistas se realizaron utilizándose la metodología de diálogo no-estructurado, también llamadas entrevistas informales, realizadas en el mismo entorno en donde la gente desarrolla su vida cotidiana y donde acontecen las situaciones que interesa investigar, lo cual permite captar situaciones y experiencias vividas, y a la vez, facilitar un cierto grado de confrontación entre lo que se expresa y las realidades que se verifican en campo, aportando mayor fiabilidad a la información obtenida. Señala Ander-Egg (2003), que la denominación de entrevistas informales, no significa que en ellas se hable de cualquier cosa, ya que a la misma se lleva un guion, un bosquejo o un esquema, orientador de las conversaciones a fin de que éstas sirvan para la obtención de información útil en esta fase exploratoria.

Se realizaron 42 entrevistas, abarcando diferentes grupos que, identificados en forma preliminar a partir de las fuentes secundarias, se pudo constatar en campo su presencia y conocimiento de la cuenca. Ellos son: productores agropecuarios; profesionales intervinientes en la ejecución del proyecto de saneamiento hídrico; responsable del Programa de Desarrollo Indígena; profesionales de la APA que actuaron coordinando la ejecución del proyecto de saneamiento, y los que actuaron en calidad de inspectores de obras; cooperativas algodoneras; consorcios camineros; iglesias; funcionarios políticos de conducción, y funcionarios responsables de direcciones orgánicas, del Ministerio de la Producción, APA y la Dirección de Vialidad Provincial (DVP); Intendentes y concejales; presidente del Instituto del Aborigen del Chaco (IDACH) y consorcios de servicios rurales.

2.2. Resultados alcanzados

La identificación de actores clave por su esfera de acción (Urrutia 2004) permitió conocer los actores en los siguientes ámbitos de actuación: a) económico, b) político-institucional, c) socio-cultural, y d) socio-ambiental.

En la Tabla 1 se presentan los actores identificados mediante esta metodología.

Tabla 1. Actores clave según su esfera de acción.

| Esfera de acción de los actores | | | |
|--|--|---------------------------|---------------------------------|
| Económico | Político-Institucional | Socio-Cultural | Socio-Ambiental |
| Productores Agrícolas | Administración Provincial del Agua (APA) | Asociación Aborigen Chaco | Instituto del aborigen (IDACH) |
| Productores Ganaderos | Ministerio de la producción | Las iglesias (culto) | Consorcios camineros |
| Productores Forestales | Dirección de Vialidad Provincial | Escuelas rurales | Consorcios de Servicios Rurales |
| Cooperativas Algodoneras | Agencias gobierno provincial | | |
| Productores de subsistencia | Intendentes de las localidades | | |
| | Concejales de las localidades | | |

En el ámbito Socio-cultural, se identificó en la SM, a la Asociación Aborigen Chaco, representante comunitaria de los pobladores de las etnias Qom y Mocoví que habitan en la cuenca, siendo un actor de consideración por cuanto reviste el carácter de propietaria de 20.026 hectáreas (superficie anteriormente denominada "Reserva aborigen"). Mientras que en el ámbito Socio-ambiental se identificó al Instituto del Aborigen, órgano estatal de

apoyo al desarrollo de las comunidades aborígenes, pero con injerencia en todo el territorio de la provincia.

Identificados los actores, se procedió a su caracterización mediante la metodología de "Análisis Social" (CLIP), para conocer la red de relaciones de cooperación y conflictos, y la categoría de poder que cada uno posee en el entramado social, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Clasificación de los actores según metodología CLIP

| Categoría de los actores | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Dominantes | Influyentes | Inactivos | Respetados | Vulnerables | Marginados |
| Administración Provincial del Agua | Dirección de Vialidad Provincial | Las Iglesias Intendentes | Escuelas rurales | Asociación Aborigen Chaco | Productores de subsistencia |
| Ministerio de la Producción | Productores Agrícolas | | Productores Forestales | Instituto del Aborigen (IDACH) | |
| Agencias del gobierno | Productores Ganaderos | | Concejales | Consortios de Servicios Rurales | |
| | Cooperativas Algodoneras | | | | |
| | Consortios Camineros | | | | |

Como Dominantes se encuentran básicamente organismos del estado con intensa presencia en la cuenca; como Influyentes, los productores agrícolas y ganaderos, las Cooperativas algodonereras por la fuerte presencia de este cultivo en la SA, la DVP y los Consortios camineros, dado el impacto que su accionar resulta en la cuenca. Entre los integrantes de estas dos categorías hay una intensa relación de colaboración sin mayores conflictos, que se sostiene desde varios años. Esto los posiciona como actores importantes a considerar en el proceso de organización.

Los de las categorías de Inactivos y Respetados, si bien mantienen relaciones de colaboración con las dos categorías anteriores, estas son escasas y limitadas. Mientras que, los de las categorías de Vulnerables y Marginados, la única relación que mantienen a lo largo del tiempo es con los categorizados como Inactivos y Respetados, por lo que estos últimos resultan una adecuada instancia de enlace con los actores de menor relacionamiento social.

Se dispone así, de dos elementos claves para definir un esquema de organización: las instituciones, organismos y actores sociales involucrados, y las particularidades de las vinculaciones existentes entre ellos que nos brindan las categorías de los actores.

3. MODELO DE ORGANIZACIÓN DE LA CUENCA CON PARTICIPACIÓN DE LOS ACTORES

Pochat (2005) señala que existen en la República Argentina una importante diversidad de formas organizativas de cuenca. Ello obedece a las diferentes condiciones particulares presentes en cada caso, y a las razones que les dieron origen. Estas organizaciones así definidas, han respondido en mayor o menor medida a las expectativas iniciales. Por ello es difícil llegar a conclusiones generalizables sobre qué tipo de forma organizativa es la más adecuada para cada caso en particular.

En este sentido, la consideración de un aspecto tan trascendente como la participación de los propios interesados en la gestión de los recursos hídricos (GWP, 2003; Pochat, 2008; GWP, 2009), está contemplada en todos los documentos que han surgido de las reuniones internacionales, nacionales y en los Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina, a los cuales adhieren todas las jurisdicciones (COHIFE, 2003).

Dourojeanni (2009) plantea como un desafío para la GIRH, lograr que exista efectiva participación de la sociedad, de los usuarios de la cuenca y el agua, y del estado, sobre todo para alcanzar la equidad en el impacto de las decisiones, diseñando una visión compartida y sustentable, de lo que se desea lograr.

Precisamente al respecto, señalaba Pochat (2005) que en la Argentina está pendiente una discusión más profunda sobre cómo llevar a la práctica la participación de los actores en cada uno de los casos de entidades de gestión del agua a nivel de cuenca.

Señala Pascuchi (2003) que el buen funcionamiento de la organización de cuenca que se acuerde, se comienza a plasmar cuando se logra un adecuado nivel de cooperación entre los actores, y para ello es fundamental que se genere confianza, por tanto la labor de las organizaciones de cuenca se debe basar en la construcción de confianza, y en este camino, el intercambio de información y el establecimiento de procedimientos de consulta, brindan transparencia, y de ese modo facilitan la creación de confianza.

Teniendo en cuenta estos aspectos orientadores, y las características de la cuenca en estudio, se ha planteado un modelo de organización de cuenca contemplando las siguientes premisas: a) que genere la integración de todos los actores y sus intereses, reconociendo sus roles actuales; b) que contemple adecuadamente la dinámica de la interrelación entre los actores (sistema social) y su entorno (sistema natural); c) que promueva espacios que brinden participación y protagonismo a todas las categorías de actores; d) que diferencie las instancias, deliberativa-propositiva, decisoria y ejecutiva; e) que aproveche todos los recursos, humanos, institucionales y organizativos, disponibles en la cuenca; f) que disponga de sucesivas instancias de control y seguimiento en todo el proceso de gestión; g) que minimice en la medida de lo posible, los eventuales cambios y correcciones a la legislación vigente, de manera tal de simplificar los eventuales trámites parlamentarios.

El presente trabajo se propone al tiempo que rescatar estructuras de organización con arraigo en la cuenca, integrar las mismas en el marco de la GIRH promoviendo la visión holística a que se hacía referencia. Para ello se propone una estructura piramidal y anidada que va desde la base de los actores en el territorio, reconociendo su localía y particularidades, a un vértice en un esquema de toma de decisiones coordinadas a nivel de la cuenca, pasando por una instancia intermedia de homogeneidad territorial dada por las subcuencas del río Tapenagá.

El modelo de organización así propuesto, parte de una estructura de base que promueva una alta participación de los actores asentados en el territorio. La experiencia y el perfil de los integrantes que conformaban las Comisiones de Manejo Agua y Suelos (COMAS) constituyen un antecedente valioso a recuperar a la hora de plantear un primer grado de organización que se vincule estrechamente a los actores en el territorio, y a sus problemáticas sociales y productivas. Considerar esta estructura como organización de base del sistema propuesto plantea la ventaja de contar con una legislación vigente que las reconoce. En efecto tanto la Constitución

provincial, el Código de Aguas, así como el Decreto reglamentario de las COMAS (CD, 2012), brindan un ambiente propicio para que las COMAS se puedan integrar al modelo de organización propuesto con solo algunas adecuaciones reglamentarias lo cual simplifica sustancialmente su tratamiento legislativo, por cuanto no supone un cambio en las normas.

La legislación vigente establece que las COMAS estarán integradas por propietarios, productores o residentes, y un representante de los municipios que queden comprendidos dentro de su jurisdicción, la que será determinada por la APA siguiendo criterios hidrológicos de cuencas y subcuencas.

De la conjunción del análisis de actores de la cuenca en función a su esfera de acción, y las entrevistas realizadas, se observa la dominante presencia de los propietarios, residentes, y arrendatarios, en los procesos económico, socio-cultural, socio-ambiental, y también con participación en el proceso político-institucional, ocupando cargos en las estructuras de los organismos provinciales, o accediendo como Concejales en las localidades de la zona, e incluso como Intendentes.

En las entrevistas realizadas a los actores, se ha podido comprobar el alto grado de participación social de los propietarios o residentes, integrando numerosas entidades u organizaciones, tanto desde el punto de vista estrictamente de sus intereses personales, como de acción y beneficios comunitarios diversos. Es así entonces, que resulta común observar que un propietario o residente, en su calidad de productor, integre también, cooperativas a los fines de la comercialización de sus producciones, integre asociaciones gremiales en el rubro de su actividad, integre organizaciones de fines comunitarios tales como los consorcios camineros, cooperadoras de las escuelas de su zona, y sea también integrante de alguna iglesia. Esto define muy claramente su activo perfil social, productor y comunitario, transformándose en un elemento central para la organización, por lo cual resulta conveniente mantener esta estructura de integración de las COMAS.

De los contactos y consultas efectuadas a los actores, tanto del nivel político, del nivel gubernamental provincial y local, como del nivel económico y social, surgen de manera recurrente y coincidente, los siguientes aspectos: 1) la voluntad y disposición de los actores, a conformarse en algún tipo de organización para el manejo y la gestión de los recursos hídricos, atento la gran variabilidad hidrológica que se vive en la cuenca, pasando de grandes inundaciones a grandes sequías; 2) la familiaridad que tienen, en general, con el tipo de organización que presentan las COMAS, muy amigable con su idiosincrasia, por cuanto es muy similar a la de los consorcios camineros, estructura que ellos mismos integran desde hace muchos años con continuidad, y con buenos resultados según sus propias expresiones; 3) el rescate de los aspectos positivos que dejó

la experiencia vivida con las COMAS, atento las actuales necesidades de gestionar el recurso hídrico en la cuenca.

En base a estos aspectos que proporcionan una sólida plataforma de legitimidad y aceptación comunitaria, y a la existencia de un marco normativo adecuado y favorable, se propone entonces, mantener las COMAS como la organización de primer grado que reúne a los actores. Dentro del esquema propuesto, las COMAS han de constituir una instancia deliberativa, y de plena participación de los actores en la base de la pirámide. Una vez alcanzados los acuerdos de base, serán las propias COMAS quienes eleven las propuestas a los niveles superiores de la estructura de gestión. Por último, una vez tomadas las decisiones en el vértice de la pirámide, las COMAS tendrán un rol ejecutivo en tanto que habrán de llevar a la práctica las decisiones adoptadas. Aun cuando se rescata gran parte de los fundamentos que dieron origen y definen la estructura de las COMAS, resulta necesario plantear algunos cambios en su estructura con el objeto de, por un lado, integrar los principios de GIRH en la misma, y simultáneamente, incorporar diversas instancias de supervisión y contralor en la gestión, que logren corregir los aspectos críticos o falencias que se advirtieron de su anterior etapa de funcionamiento.

La estructura piramidal propuesta como modelo de organización, supone que todas las COMAS que se conformen dentro de cada subcuenca hidrográfica (sistema natural), conformen un Subcomité de cuenca (sistema social), esto es, un segundo grado de organización, cuya jurisdicción se habrá de corresponder con las respectivas subcuencas hidrográficas, alta, media, y baja. Los subcomités de cuenca se proponen como una instancia de articulación interinstitucional entre los distintos actores y entre las distintas COMAS de cada Subcuenca.

Estos tres Subcomités de cuenca conformarán a su vez, el Comité de Cuenca del Río Tapenagá (organización de tercer grado), completando así el esquema anidado piramidal.

En la Figura 4 se grafica el esquema de la estructura de organización propuesta.

La estructura propuesta se fundamenta en la necesidad de reunir las experiencias de las COMAS como espacio de participación y de proximidad, con los habitantes de la cuenca, pero promoviendo una estructura de organización creciente, desde lo abarcativo como espacio de la cuenca, y desde lo jerárquico, en su relación con el poder político. Así las COMAS, como base de la pirámide, responden a los criterios de participación y de fundamentación para la toma de decisiones al nivel "más bajo posible". Serán estos ámbitos de participación, deliberación y consenso, el comienzo de un proceso "abajo-arriba" que caracteriza la GIRH. En efecto, las inquietudes, necesidades y propuestas que surjan en el ámbito de las distintas COMAS, deberán articularse en el marco

de los subcomités, evaluando allí conjuntamente con los otros actores institucionales, analogías o diferencias, situaciones comunes, o particularidades, en un ámbito geográfico homogéneo (la subcuenca) que le da una mayor unicidad al análisis. Por último, las formulaciones y proyectos que se acuerden a nivel de subcuencas serán analizadas a nivel del Comité de Cuenca, máximo órgano de gestión, en el cual los representantes de los Subcomités interactúan con el poder político institucional, trabajando un esquema de ideas que ha sufrido un proceso evolutivo que lo sustenta y fundamenta, y que responde sin duda a los criterios de la GIRH, promoviendo una mejor gobernabilidad del agua a nivel de cuenca.

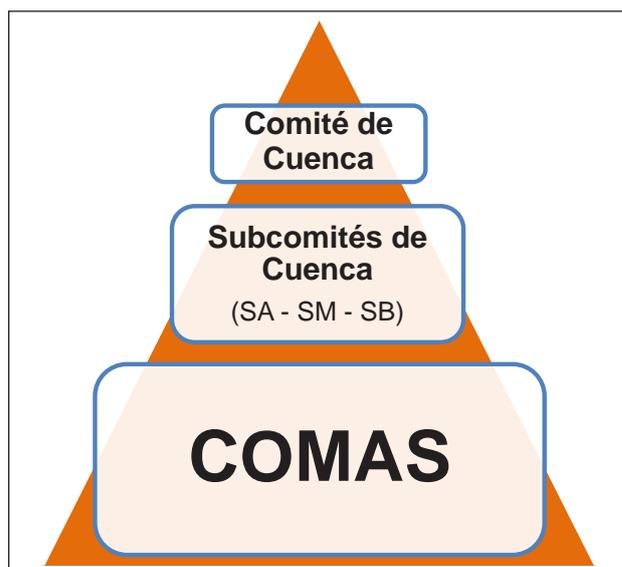


Figura 4.- Estructura de organización propuesta

3.1. Primer grado de organización: Las Comisiones de Manejo de Aguas y Suelos (COMAS)

Se propone una integración para las COMAS con los siguientes órganos de gestión: 1) Asamblea General; 2) Junta Directiva; 3) Junta Revisora de Cuentas; 4) Junta de fiscalización y seguimiento; y, 5) Junta Asesora. En la Figura 5 se presenta la estructura de la organización de las COMAS

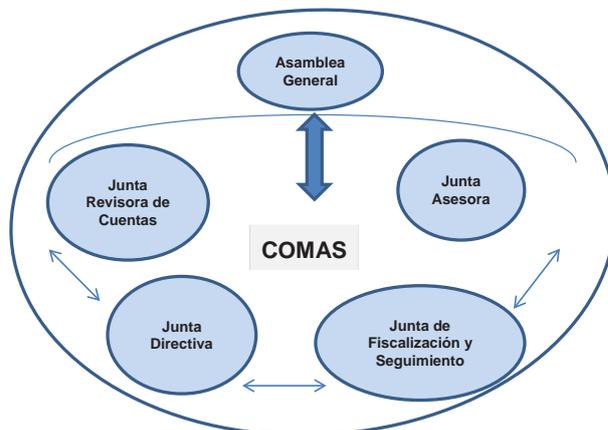


Figura 5.- Estructura de organización de las COMAS

La Asamblea General, compuesta por todos los miembros constituyentes de la COMAS, que adquieren el carácter de miembros plenos; es el órgano superior de la misma y el único con competencia para: a) elegir y remover a los miembros de, la Junta Directiva, la Junta Revisora de Cuentas, la Junta Asesora, la Junta de Fiscalización y seguimiento, y cualquier otro organismo que se establezca en los estatutos; b) aprobar y modificar los estatutos; c) avalar los planes de trabajo y presupuestos anuales, a ser presentados ante el Comité de Cuenca para su aprobación; d) aprobar rendiciones de cuentas; e) disolver la COMAS.

La Junta Directiva es el órgano ejecutor, es la que implementa los planes de trabajo per se, o a partir de convenios con otras instituciones públicas o privadas que, de acuerdo a sus roles y capacidades, estén en condiciones de desarrollar dichas tareas. Estará integrada como mínimo por cuatro miembros cubriendo los siguientes cargos: Presidente, Secretario, Tesorero, y la Secretaria de la mujer, incorporando la visión de género (Solórzano B. et al 2009; Paris, 2008).

La Junta Revisora de Cuentas, elegidos por la Asamblea entre sus miembros plenos, ninguno de los cuales puede pertenecer a la Junta Directiva, y a ninguna otra instancia de organización o contralor. Es un órgano de contralor financiero, para lo cual, tendrá libre acceso a cuentas, libros y documentación, que, de conformidad a la legislación, debe llevar la Junta Directiva. Debe auditar sobre la memoria y el balance anual, elaborar los correspondientes informes, y hacerlos públicos en las Asambleas, como condición previa a la consideración de los presupuestos anuales, y de rendiciones de cuentas.

La Junta de Fiscalización y Seguimiento, es la encargada del contralor de la gestión, que todas las acciones estén realizadas en función al cumplimiento del plan de trabajo, encuadrado en los lineamientos aprobados. Básicamente su función es de ejercer el control social, que se cumplan los lineamientos aprobados, y se promueva el desarrollo y la aplicación de las estrategias y prácticas específicas de su objetivo. Supervisa y verifica que la Junta Revisora de Cuentas ejerza los controles correspondientes que le compete sobre la Junta Directiva. Los integrantes de esta Junta no pueden integrar ninguna de las otras juntas, ni poseer relaciones de parentesco.

La Junta de Fiscalización y Seguimiento estará integrada por representantes de: las Escuelas rurales dentro de su jurisdicción; del Consorcio de Servicios Rurales; de la Colonia Aborigen en el caso de la parte alta de la SM; de una Mujer, elegida entre sus miembros, para resguardo del enfoque de género, que no podrá tener ningún tipo de parentesco familiar con alguno de los integrantes de las otras Juntas; de las cooperativas agrícolas; de las cámaras o asociaciones ganaderas; de asociaciones o cámaras forestales; de los municipios en la jurisdicción, que no integre alguna de las otras juntas y en el caso que

sea un solo Municipio y que se encuentre integrando otra junta, este lugar deberá ser integrado por un Concejal del bloque político de la primera minoría. Podrá solicitar asesoramiento a la Junta Asesora, y proponer temarios a ser tratados en la Asambleas generales. Está facultada para pedir los informes a cualquiera de las Juntas y solicitar la convocatoria a Asamblea extraordinaria. Sus informes en las Asambleas constituyen condición previa a la consideración de los presupuestos anuales, y de rendiciones de cuentas.

La Junta Asesora: de consulta y apoyo, para la concepción y armado de proyectos, brindando el sustento técnico necesario. Su función es: orientar y colaborar en la elaboración de los planes de trabajo y los presupuestos anuales, en campañas de difusión y extensión, y en general, en todo lo que hace al cumplimiento de sus atribuciones en la cuenca. Centralmente, asesora a la Junta Directiva. Los planes anuales de trabajo que elabore la Junta Directiva deberán contar con el aval de la Junta Asesora, como condición previa a la consideración de la viabilidad por parte de la Asamblea General. Este condicionamiento tiene como objeto mantener un estrecho intercambio de la Junta directiva con la Junta Asesora, logrando por un lado, un adecuado sustento a todo el accionar ejecutivo, y por otro, poner en conocimiento general, consulta y discusión, todas las acciones a realizar.

La Junta Asesora estará integrada por el delegado de la APA en la zona, el Jefe de la Delegación Zonal de Vialidad, el Delegado Extensionista de Agricultura, de Ganadería, y de la Dirección de Bosques; del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y un representante designado por cada una de las Universidades con presencia regional.

3.2. Segundo grado de organización: Los Subcomités de Cuenca

Esta segunda instancia de organización, inexistente en la actual legislación, se basa en la creación de subcomités de cuenca que reúnan de manera orgánica y organizada a los actores (sistema social), asentados en cada una de las subcuencas hidrográficas en que ha sido dividida la cuenca (sistema físico), ya que cada una de éstas agrupa aspectos e intereses comunes, tanto, naturales, ambientales, productivos, de distribución de la población, y de idiosincrasia de sus pobladores.

La misión central de los subcomités, es de articulación Interinstitucional, con las otras organizaciones de actores que actúan en la misma subcuenca pero con otros fines, como por ejemplo los consorcios camineros, escuelas, salud, la Asociación de la Colonia Aborigen, etc., coordinando sus planes y programas; asimismo tiene la finalidad de buscar los consensos y articular entre los subcomités de cuenca, para la compaginación y ensamble de los respectivos planes de trabajo.

Con estos subcomités, en la cuenca se produce por un lado, un proceso de descentralización hacia cada una de las áreas que presentan mayor homogeneidad en términos físicos, sociales, productivos y ambientales, y por otro lado, atento las grandes distancias entre los extremos de la cuenca, al subdividirla en las subcuencas se produce un efecto de “acortamiento” de las distancias. Este aspecto resulta un elemento central en la consideración general, por cuanto “la distancia” ha sido una cuestión señalada por los actores como una limitante para su participación, que en diversas oportunidades les ha impedido concurrir a reuniones ordinarias de la COMAS, e incluso a las asambleas.

Como se señalara, la definición de las subcuencas obedece a características físicas y socio-productivas, rasgos distintivos que no deben ser considerados como elementos de homogeneidad estricta, sino como parámetros descriptivos generales. Precisamente las particularidades que dentro mismo de la subcuenca se pueden presentar, se consideran mediante la conformación de distintas COMAS en cada subcuenca, permitiendo de este modo que se vayan integrando en un esquema progresivo y gradual, de lo particular a lo general.

El Subcomité de Cuenca se encuentra integrado por: un representante de la Junta Directiva de cada una de las COMAS conformadas geográficamente dentro de la subcuenca; el representante zonal de la APA; los Consorcios camineros que se encuentran dentro de la jurisdicción; el jefe de la Delegación Zonal de la DVP; los representantes de: el Ministerio de la Producción; del Ministerio de Planificación y Ambiente; del Ministerio de Salud; del Ministerio de Educación; y, del Ministerio de Gobierno; en el caso del Subcomité de Cuenca Media, se incorpora un representante de la Asociación de la Colonia Aborigen, y del IDACH; los Intendentes de los municipios que integran la subcuenca; un Director de las escuelas rurales; la designada Secretaría de la Mujer de las COMAS, lugar que será rotativo entre todas las que se hayan conformado; de los Consorcios de Servicios Rurales en actividad; de asociaciones de productores agrícolas; de asociaciones de productores ganaderos; de asociaciones de productores forestales.

El subcomité será presidido por los representantes de las COMAS que lo integran, en forma rotativa, continua y de duración anual, ejerciendo la vicepresidencia, el representante de la APA, buscándose promover espacios de articulación interinstitucional con otras organizaciones de actores que potencialmente pueden realizar alguna acción en la respectiva subcuenca.

3.3 Tercer grado de organización: El Comité de Cuenca del Río Tapenagá

El Código de Aguas (CD, 2012) crea la figura organizativa de los Comités de Cuenca Hídrica, la

que nunca llegó a implementarse y que por lo tanto resulta oportuno aprovechar, en el marco de los principios de la GIRH.

La creación del Comité de Cuenca del Río Tapenagá, en un tercer grado de organización, tiene como propósito disponer de una estructura de gestión que agrupe, articule y coordine las instancias organizacionales de menor grado que se han propuesto, con una cobertura geográfica integral de la cuenca, pero con una adecuada referenciación de las particularidades de cada sector tanto desde la perspectiva del sistema natural, como de los sistemas socio-productivos allí emplazados.

La misión del Comité de Cuenca, es de planificación integral, de consenso y acuerdos a nivel de cuenca para el manejo del recurso hídrico, y centralmente de aprobación de los respectivos planes de trabajos y presupuestos.

El Comité de Cuenca se integra, además de los Presidentes de los Subcomités de Cuenca: Alta, Media y Baja, con una **Junta de Organismos**, compuesta por representantes oficiales de mayor rango jerárquico, de las distintas áreas del Estado provincial, con injerencia en la cuenca, esto es: el representante de la APA; el representante del Ministerio de la Producción; el representante del Ministerio de Planificación y Ambiente; y el representante de la Dirección de Vialidad Provincial.

En la búsqueda de respuesta a los desafíos planteados, esta propuesta reúne en una estructura de organización, los tomadores de decisiones (sector político), con los representantes genuinos de los interesados en la cuenca (stakeholders) que encuentran en las COMAS y en la representación de estas en el Subcomité de cuenca, una vía de participación donde exponer sus problemáticas. Esas demandas, deberán ser objeto de atención del sector político, cuya gestión transectorial e integrada, permitirá hacer funcionar al Comité de cuenca como un verdadero ejemplo de gestión del agua bajo los principios de la GIRH.

En la Figura 6 se observa la estructura de organización del Comité de cuenca propuesto.

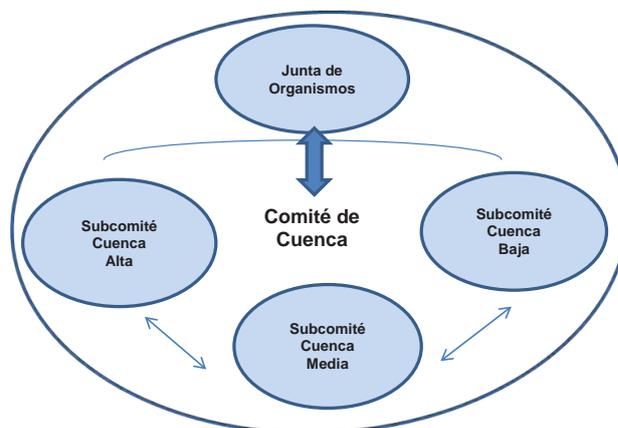


Figura 6. Estructura de organización del Comité de Cuenca.

El análisis de las funciones de los distintos niveles que integran la estructura de gestión propuesta permite observar con claridad la diferenciación entre instancias de decisión, instancias de articulación e integración, e instancias de ejecución. En efecto, el proceso “abajo-arriba” y “arriba-abajo”, queda perfectamente establecido en la estructura anidada propuesta. De este modo, las COMAS inician el proceso a través de las instancias deliberativas y de formulación de propuestas, las que se articulan

e integran en el nivel de subcuenca, para alcanzar las etapas decisorias en el Comité de cuenca. Esta decisión, luego “baja” a las esferas de las COMAS para su ejecución.

En la Tabla 3 a modo de resumen, se presenta la estructura definida de organización, el grado de organización, el detalle de los que integran cada estructura y las funciones de cada nivel de organización.

Tabla 3. Resumen de la estructura de organización propuesta

| ESTRUCTURA | Nivel de Organización | INTEGRANTES | FUNCIONES |
|--|------------------------------|--|--|
| Comité de Cuenca del Río Tapenagá | Tercer Grado | Subcomité de Cuenca Alta Subcomité de Cuenca Media Subcomité de Cuenca Baja Junta de Organismos Provinciales | Planificación Integral Aprobación Programas Aprobación Presupuestos Coordinación entre Subcomités |
| Subcomité de Cuenca | Segundo Grado | COMAS Administración Provincial del Agua Representante Mujer Consortios Camineros Delegación Zonal de Vialidad Intendentes Directores de Escuelas Ministerio de la Producción Ministerio Planificación y Ambiente Ministerio de Salud Ministerio de Educación Ministerio de Gobierno Asociación Colonia Aborigen Instituto del Aborigen (IDACH) Consortios de Servicios Rurales Asociación productores agrícolas Asociación productores ganaderos Asociación productores forestales | Articulación Interinstitucional entre los distintos actores de las Subcuencas |
| COMAS | Primer grado | Propietarios Productores Residentes Municipios comprendidos | Deliberativa, propositiva, ejecutiva |

4. CONCLUSIONES

Se plantea una organización para la gestión de la cuenca, que responde a las costumbres culturales de los actores, rescatando su alto grado de participación, su demostrada capacidad de gestión y su permanente compromiso comunitario, y, definiéndose claramente los roles institucionales en todas las instancias de la organización.

Se ha logrado armonizar los intereses y la dinámica de las poblaciones, con las condiciones y la dinámica del entorno donde habitan, conformando las organizaciones políticas de los actores en correspondencia con cada una de las subcuencas

hidrográficas que componen la cuenca del río Tapenagá.

Las metodologías usadas para la identificación de actores clave, proporcionaron elementos sustantivos para concebir el modelo de organización que responde a las premisas que promueve la GIRH, tal que, atendiendo a los roles de cada actor tiene en el entramado social, permite su participación con el perfil más apropiado en la organización propuesta.

Se ha recuperado las Comisiones de Manejo de Agua y Suelos (COMAS) como una organización de

base con tradición en la cuenca. Las COMAS son una instancia ejecutiva, administrada y gestionada por los propios actores, en la que se ha incorporado a su estructura originaria, una Junta de Fiscalización y Seguimiento, con el objeto del control social de objetivos, y, una Junta Asesora, con el objeto de capacitar, orientar y brindar el encuadre técnico correspondiente, en la preparación y ejecución de proyectos.

La aplicación de los conceptos de la GIRH, particularmente en lo que hace a los esquemas de toma de decisiones, mecanismos de participación y canales de comunicación, permitió diseñar una estructura de organización piramidal, con un esquema de retroalimentación entre la base de la pirámide constituida por las COMAS, el nivel intermedio, los Subcomités de cuenca, y el vértice superior, el Comité de cuenca.

Si bien el 97,3% de la superficie se encuentra en territorio de la provincia del Chaco, la cuenca hidrográfica del río Tapenagá, estrictamente, es interjurisdiccional, compartida con la provincia de Santa Fe, por lo cual previamente debe lograrse el acuerdo entre ambas provincias para el manejo y gestión de la misma.

Conformado el mismo, la integración de esta superficie perteneciente a otra jurisdicción política, es inmediata por cuanto como se señalara, el modelo de organización armoniza los intereses y la dinámica de las poblaciones, con las condiciones y la dinámica del entorno donde habitan conformando las organizaciones políticas, en este caso, del norte de la provincia de Santa Fe, en la subcuenca baja.

BIBLIOGRAFÍA

Ander-Egg, E. 2003. Repensando la Investigación-Acción-Participativa. 4ta. Edición. Editorial Lumen Hvmanitas. Colección Política, Servicios y Trabajo Social. Buenos Aires, 129 p.

Bareiro, I. R., Currie, H. M., Rodríguez, A. F. y Ruberto, A. R. 2004. Evaluación del impacto ambiental. Saneamiento hídrico y desarrollo productivo de la línea Tapenagá. Informe final. Secretaría de agricultura, ganadería, pesca y alimentos. Programa de Servicios Agropecuarios Provinciales. PROSAP. Argentina.

Cano, E. O. 2014. Desarrollo de un modelo de organización para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Tapenagá, de la provincia del Chaco. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

CD. Cámara de diputados de la provincia del Chaco. 2012. Consulta de legislación. <http://www2.legislaturachaco.gov.ar>

Chevalier, J. y Buckles, D. 2006. Sistemas de Análisis Social – Guía para la investigación colaborativa

y la movilización social – Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). 1ª Edición. Ottawa, Canadá.

COHIFE. Consejo Hídrico Federal. 2003. Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina. Acuerdo Federal del Agua. Buenos Aires.

CONES. Consejo Económico y Social de la Provincia del Chaco. 2012. Cooperativas Algodoneras Chaqueñas: Análisis económico, social y organizacional de sus factores internos y externos. UCAL. Unidad Ejecutora. 79 pp.

Dourojeanni, A. C. 2009. Los desafíos de la gestión integrada de cuencas y recursos hídricos en América Latina y el Caribe. DELOS. Revista Desarrollo Local Sostenible. Vol 3. N° 8. Santiago de Chile. 13 p.

Falkenmark, M. 2003. Water management and Ecosystems: Living with Changes. Global Water Partnership. TEC N° 9 Stockholm.

Faustino M., J, Jimenez O., F y Campos, J. J. 2006. Bases conceptuales de la cogestión adaptativa de cuencas hidrográficas. ASDI. CATIE. Programa Focucenas. Costa Rica. 20p.

GWP. Global Water Partnership. 2003. Gobernabilidad Efectiva del Agua. Acción a través de Asociaciones en Sudamérica. CEPAL. SAMTAC. Santiago de Chile. 42 p.

GWP. Global Water Partnership. 2009. Manual para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Cuencas. Estocolmo. Suecia. 110p.

Paris, M. 2008. GIRH, Conceptos y principios. En: Introducción a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Curso formación básica. Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. FICH. Santa Fe.

Pascuchi, J. 2003. La gestión de los recursos hídricos. Los comités de cuenca hídrica. Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales. CARI. <http://www.cari.org.ar/pdf/pascuchi.pdf>

Pochat, V. 2005. Entidades de gestión de agua a nivel de cuencas. Experiencia Argentina. División de Recursos Naturales e Infraestructura. CEPAL. Serie 96. Santiago de Chile.

Pochat, V. 2008. Principios de gestión integrada de recursos hídricos. Bases para el desarrollo de planes nacionales. Global Water Partnership. Central America and South America, 12 p.

Prins, C. y Kammebauer, H. 2009. Análisis y abordaje de conflictos en cogestión de cuencas y recursos hídricos. CATIE. Serie técnica. Boletín técnico N° 39. Turrialba. Costa Rica.

PROSAP. Programa de los Servicios Agropecuarios Provinciales. 2012. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. <http://www.prosap.gov.ar>

Rietbergen-McCracken, J. y Narayan, D. 1998. *Participation and Social Assessment: Tools and Techniques*. The International Bank of Reconstruction and Development/the World Bank. Washington, DC. U.S.A.

Solorzano B., C., Mejia M., I y Obregon C., S. 2009. *El enfoque de género en la gestión y manejo de cuencas hidrográficas. El caso de la subcuenca Aguas Calientes, Nicaragua*. ASDI. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Serie técnica. Informe técnico N° 379. Turrialba. Costa Rica. 40p.

Urrutia, A. 2004. *Identificación de los actores claves para el manejo integrado de las subcuencas de los ríos Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado. Primera aproximación*. Academy for Educational Development. United States Agency International Development.

Valiente, M. (2004). *Evaluación de áreas de riesgo*. Informe final. Proyecto de Saneamiento Hídrico y Desarrollo Productivo de la Línea Tapenagá. Programa de Servicios Agropecuarios Provinciales. PROSAP. Resistencia.

CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL EMBALSE MAURÍN, PARA SU USO SOSTENIBLE. MUNICIPIO BAUTA, PROVINCIA ARTEMISA, CUBA

CHARACTERIZATION OF WATER QUALITY FROM MAURÍN RESERVOIR FOR ITS SUSTAINABLE USE, BAUTA CITY COUNCIL, ARTEMISA PROVINCE, CUBA

Orlando R. Laiz Averhoff¹

Resumen

La prolongación del periodo de sequía en el archipiélago Cubano, localizado en el mar Caribe, ha requerido que las autoridades hidráulicas cubanas comenzaron a partir del último trimestre del año 2015 a evaluar las obras hidráulicas que se utilizan solo para la agricultura, pero que pueden además utilizarse para el consumo humano.

La calidad de las aguas del embalse Maurín se analizó a partir de las sales disueltas relacionando las mismas con la geología presente en el área de captación, los nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2) y fosfato (PO_4) estuvieron en concentraciones aceptables; la determinación de hidrocarburos aromáticos fueron esenciales ya que fueron detectados 2 estaciones con resultado superiores a la norma utilizada en $0,6 \text{ mgL}^{-1}$, los metales pesados analizados plata (*Ag*), bario (*Ba*), cadmio (*Cd*), cobalto (*Co*), cobre (*Cu*), cromo (*Cr*), manganeso (*Mn*), molibdeno (*Mo*), nickel (*Ni*), plomo (*Pb*), vanadio (*V*) y zinc (*Zn*) no presentaron concentraciones superiores a las normas cubanas. Se analizó la estratificación térmica obteniendo que el embalse es polimíctico cálido y posee oxígeno en todas las capas hasta el fondo, la diferencia de temperatura entre superficie y fondo oscila entre 0,1 y 1,0 ($^{\circ}\text{C}$) por estaciones y de modo general alcanzó $0,6 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$

Palabras claves: Calidad del agua, embalse, metales pesados, nutrientes, hidrocarburos aromáticos.

Abstract

The extension of drought period in the Cuban archipelago, located in the Caribbean Sea, has required that hydraulic authorities began in final part of year 2015 to evaluate different hydraulic sources that are used to agriculture, for using to domestic water.

The water quality of Maurin reservoir was analyzed, using dissolved salts to related these with geology in the caption area; nitrate (NO_3), nitrite (NO_2) and phosphate (PO_4) showed as acceptable concentrations; were determined the aromatic hydrocarbons as essential elements, because two stations had superior resulted of normed values of $0,6 \text{ mgL}^{-1}$; were analyzed too the heavy metals, silver (*Ag*), barium (*Ba*), cadmium (*Cd*), cobalt (*Co*), copper (*Cu*), chromium (*Cr*), manganese (*Mn*), molybdenum (*Mo*), nickel (*Ni*), lead (*Pb*), vanadium (*V*) y zinc (*Zn*) non all of these have high concentrations more than Cuban standard to domestic water. The thermic stratification was analyzed determining that Maurin reservoir is warm polymictic and dissolved oxygen was measurements in different layers up to the bottom; the difference of temperature between surface and bottom was in the middle of 0,1 and 1,0 ($^{\circ}\text{C}$) by stations and $0,6 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ in general.

Key words: Water quality, reservoir, heavy metal, nutrients, aromatic hydrocarbons

1. INTRODUCCIÓN

Los aumentos de la temperatura mínima y máxima del aire, en las épocas lluviosa y seca, verano e invierno para muchos, provocado por las afectaciones climáticas ocasionadas por el quehacer del hombre durante los procesos productivos, en los cuales se han extraído numerosos recursos naturales, talando bosques a ritmos acelerados, impidiendo la reposición natural, afectando las aguas con numerosos contaminantes, elaborando muchos tipos de gases que han afectado las capas superiores de la atmosfera, elevando finalmente los niveles de dióxido de carbono (CO_2) lo que ocasiona el efecto invernadero, permitiendo de

esta forma que las temperaturas se mantengan elevadas, provocando intensas lluvias en periodos no esperados y sequias prolongadas en diferentes zonas tropicales, subtropicales y templadas, afectando definitivamente los casquetes polares, el Ártico y la Antártida, así como ocasionando la pérdida paulatina pero constante de los glaciares a nivel mundial.

Cuba no ha estado exenta de estas afectaciones como país tropical. La franja del Caribe Insular se ha visto afectada en años recientes con incremento en la cantidad de huracanes y también con sequias prolongadas, como la que nos ha afectado esta

¹ Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana. Teléfonos: (53)-78642208; (53)-78660922. olaiza@hidraulicos.cu; orla.laiz.46@gmail.com

área geográfica desde hace aproximadamente tres años, provocando la escasez del líquido vital tanto superficial como subterráneo.

La idea de conocer el comportamiento de las aguas embalsadas en el embalse Maurín, ha sido motivada por la necesidad de utilizar sus aguas con fines domésticos, ya que el uso previsto para estas aguas es con fines agrícolas y acuícolas desde su construcción.

El presente informe, tratará de mostrar el comportamiento de estas aguas y la posibilidad de utilizarlas para el uso deseado y necesario en la actualidad, ya que los niveles de las fuentes subterráneas existentes en sus alrededores, Cuenca Sur, Ariguanabo y otros en la zona del municipio Playa, se han visto seriamente afectadas por la disminución de los niveles freáticos, pues en los periodos de recuperación, esto no se ha producido con la premura necesaria para garantizar una extracción constante que asegure el abasto el consumo humano.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción

Este embalse fue construido en el curso del río Santa Ana, se encuentra en el municipio Bauta, provincia Artemisa, en una zona de topografía semi-ondulada. Existen poblaciones en sus alrededores como son los poblados de Bauta y Punta Brava, este último tributa parte de sus residuales hacia el río Santa Ana, afluente del embalse. Las condiciones geológicas del área de inundación están caracterizadas por material aluvial, gravas cimentadas con arcilla y capas alternas de arcilla arenosa y areniscas, con pequeños estratos de calizas margosas. La presa es mixta, de arcilla arenosa con espaldón de marga arcillosa. La obra de toma es de galería, con torre de compuertas y el aliviadero es de abanico, con rápida, trampolín y canal de descarga.

En la Tabla 1 se muestran los datos técnicos del embalse Maurín después de su construcción en 1973, por lo que en la actualidad han transcurrido 42 años. Esta información ayudará a conocer en parte este ecosistema acuático.

Tabla 1. Características Morfométricas del embalse Maurín, Municipio Bauta, provincia Artemisa.

| Embalse | | U | Maurín |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|---------------|
| Provincia | * | | Artemisa |
| Municipio | * | | Bauta |
| USO | * | Agricultura-Ganaderia-Pesca | |
| COORDENADAS | * | | |
| NORTE | * | | 355200 |
| ESTE | * | | 342600 |
| VOLUMEN | * | | |
| Nivel de Aguas Máximas (NAM) | | (hm ³) | 20,60 |
| Nivel de Aguas Normales (NAN) | | (hm ³) | 17,60 |
| Nivel de Aguas Muertas (NM) | | (hm ³) | 0,43 |
| NIVEL de Aguas ÚTIL | | (hm ³) | 17,17 |
| AREA | * | | |
| Nivel de Aguas Máximas (NAM) | | (km ²) | 3,91 |
| Nivel de Aguas Normales (NAN) | | (km ²) | 3,33 |
| Nivel de Aguas Muertas (NM) | | (km ²) | 0,20 |
| NIVEL | * | | |
| Nivel de Aguas Máximas (NAM) | | (m) | 47,20 |
| Nivel de Aguas Normales (NAN) | | (m) | 46,00 |
| Nivel de Aguas Muertas (NM) | | (m) | 33,75 |
| CORONA | * | (m) | 49,25 |
| CAUCE | * | (m) | 25,75 |
| ALT. CORT | * | (m) | 23,50 |
| AÑO creac. | * | | 1973 |
| Años Uso | (+) | Años | 42 |
| Profundidad Máxima | (+) | (m) | 20,25 |
| Profundidad Media | (+) | (m) | 5,29 |
| Profundidad Relativa | (+) | (%) | 0,98 |
| ÁREA C-Hidrografica * | | (km ²) | 39,40 |
| VOL. AVENIDA | * | (hm ³) | 6,50 |
| Área NAN /Área Cuenca (+) | | | 0,08 |
| Vol/AreaCH | (+) | hm ³ /km ² | 0,45 |
| Escurrimiento Medio Annual * | | (hm ³) | 12,7 |
| * = Datos del GEARH | | (+)= Cálculos del autor | |

2.2 Monitoreo

Para esta caracterización se realizó el monitoreo en el embalse, durante el mes de septiembre de 2015, utilizando una embarcación de la Pesca. Fueron muestreadas 5 estaciones, de forma puntual e integral, realizando perfiles verticales en cada una de ellas y se transportaron las muestras hacia el Laboratorio de la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos (ENAST) de la provincia La Habana, donde se ejecutaron los análisis de las mismas, a saber: Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, Conductividad Eléctrica, Ciclo del Nitrógeno (nitrato (NO_3), nitrito (NO_2) y nitrógeno total (Nt)), Ciclo del Fósforo (fosfato (PO_4)), Sílice (SiO_2), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5^{20}), Coliformes Totales (CT) y Coliformes Termotolerantes (CTT), Turbiedad (Tb) y Metales pesados, (Plata (Ag), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn)).

El monitoreo se realizó utilizando un muestreador vertical tubular (diseñado por especialistas suecos del Instituto de Limnología de Uppsala (1986)) de 2 m de longitud y una capacidad de 2 L, tomándose seis muestras a cada nivel de 2 m hasta el fondo, mezclándose en un balde o cubeta, o sea, se combinan capas de agua, de diferentes estratos y se obtienen sub-muestras para los análisis, físicos, químicos y biológicos. Estas muestras compuestas e integradas son las más efectivas y brindan mayor información (APHA, 1998).

Producto del conocimiento de la utilización de las aguas por unidades militares, durante al menos dos

épocas en el año, para el entrenamiento con equipos anfibios se decidió contratar el Laboratorio del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), Laboratorio de Química Ambiental, con el objetivo de realizar análisis de hidrocarburos aromáticos totales (HTP).

Durante monitoreo se hicieron análisis *in situ* de la calidad del agua, utilizando el medidor multi-paramétrico TOA-DKK, Modelo WQC-24 de Japón, con el objetivo de realizar las mediciones verticales de temperatura y oxígeno disuelto, así como contar de primera mano con los valores de pH.

Este estudio fue una situación de emergencia producto de la sequía, la cual afecta directamente a los acuíferos existentes en el área para el consumo humano. El monitoreo se produce en el mes de septiembre, mes en el cual las condiciones de estratificación se encuentran muy estables, por lo que las características de la calidad del agua poseen un comportamiento similar para la mayor parte del año y en el Archipiélago Cubano este proceso se extiende por un término de aproximadamente nueve (9) meses, lo cual implica que todos los resultados deben continuar monitoreándose en lo adelante con una periodicidad trimestral, para asegurar las conclusiones que se emiten.

En la Figura 1 se muestra el mapa cartográfico donde se localiza el embalse Maurín, algunos de los poblados cercanos y las estaciones monitoreadas para la caracterización de sus aguas con sus coordenadas correspondientes. En la Figura 1A se muestra un esquema de la provincia Artemisa y su municipio Bauta destacando el embalse Maurín.

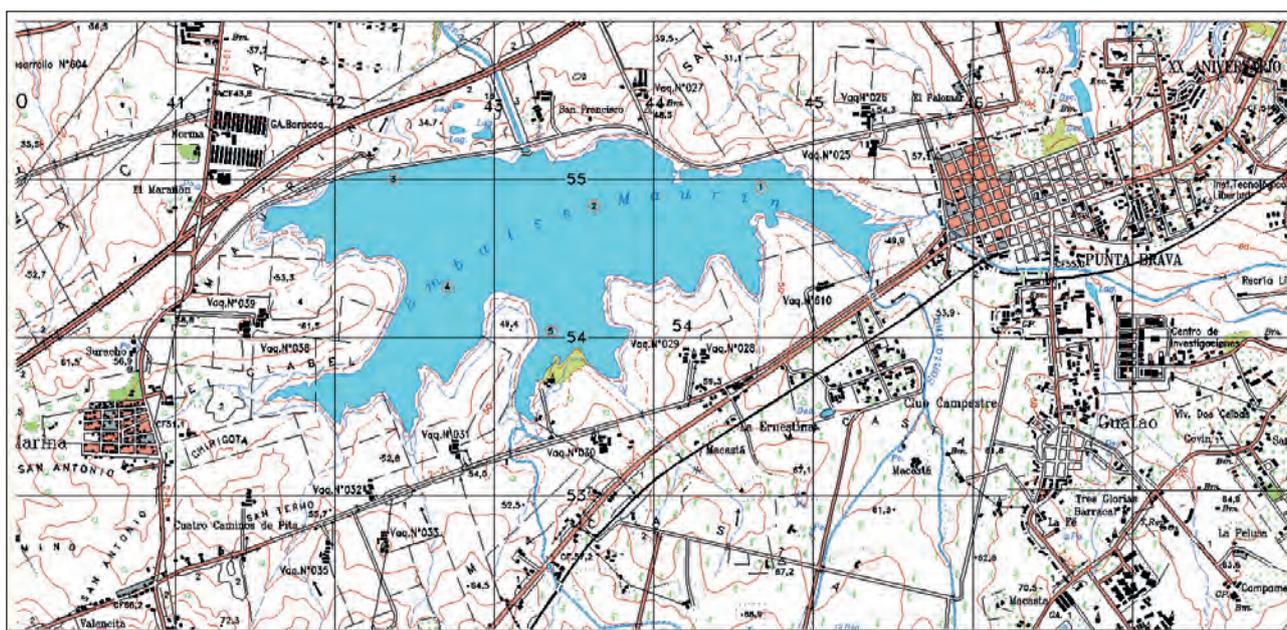


Figura 1.- Embalse Maurín con las cinco (5) estaciones de muestreo

| Estación | Latitud-N | Longitud-O |
|---|----------------|----------------|
| 1. Entrada al embalse del río Santa Ana | 23° 01' 4,09" | 82° 30' 54,00" |
| 2. Cercano al aliviadero del embalse | 23° 01' 3,09" | 82° 31' 31,50" |
| 3. Frente a la Obra de Toma | 23° 01' 4,39" | 82° 32' 17,30" |
| 4. Entrada al embalse del arroyo s/n | 23° 00' 39,59" | 82° 32' 6,90" |
| 5. Frente a la zona de la Pesca | 23° 00' 31,69" | 82° 31' 40,80" |



Figura 1A.- Municipio Bauta con localización del embalse Maurín, provincia Artemisa

3. GEOLOGÍA DEL ÁREA

El vaso del embalse se encuentra sobre las formaciones geológicas Punta Brava y Guanajay, mientras que su cuenca hidrográfica posee además, formaciones como Colón, Consuelo, Cojímar, Jaruco y Vía Blanca, aunque también se encuentran los Depósitos Palustres pQ4 en el área que ocupó la

laguna de Ariguanabo. La distribución litológica de las formaciones destaca que las más representadas, Punta Brava, Guanajay, Consuelo, Colón y Jaruco pertenecen al sistema geológico del Paleógeno, muy importante para la estratigrafía cubana (IGP, 2013). En la Figura 2 se muestra el esquema geológico de la zona de estudio.

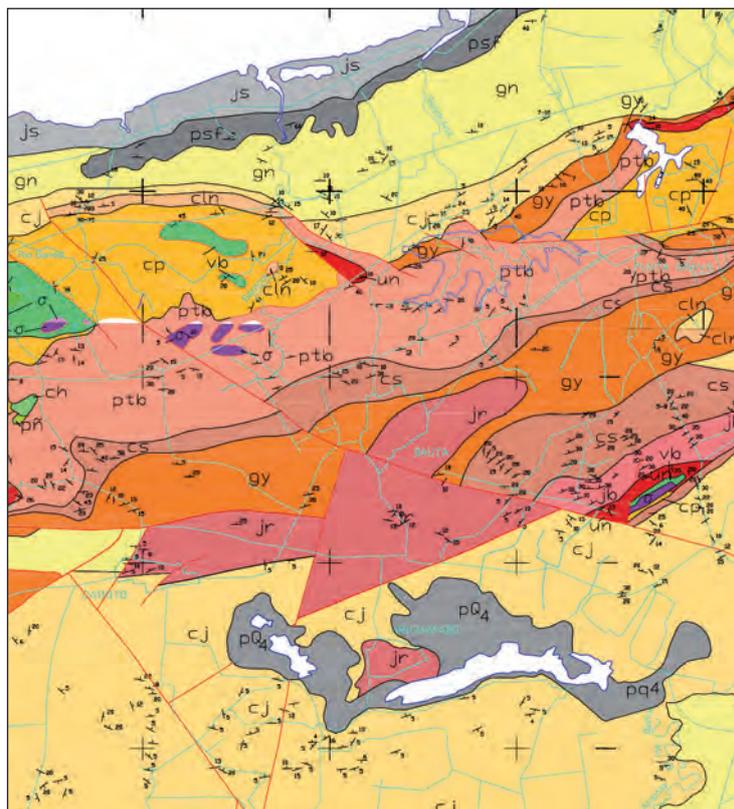


Figura 2.- Esquema geológico, destacando el embalse Maurín y las principales formaciones geológicas tanto en su vaso como en su cuenca hidrográfica

Punta Brava, Formación (ptb) (P₂²⁻³ ptb)

Litología: Calizas microcristalinas, cretosas, arcillosas, medianamente estratificadas, de color blanco y blanco amarillento, que transicionan a brechas de calizas, areniscas, calcarenitas, más o menos arcillosas, e intercalaciones de arcillas, de color crema y beige amarillento. Escasas capas, muy finas, de lutitas.

Edad: Eoceno Medio parte alta - Eoceno Superior, parte baja.

Ambiente de Sedimentación: Se depositó en un ambiente batial.

Espesor: No excede los 200 m.

Guanajay, Formación (ga) (gy) (P₃³ gy)

Litología: Está constituida, en general, por una intercalación de margas arenosas biogénicas, calizas arcillosas y, en menor grado, areniscas, conglomerados polimícticos y limonitas de color claro. En ocasiones, esta unidad presenta un aspecto olistostrófico, ya que aparece una matriz de margas blancas, masivas y de grano fino, que engloba fragmentos de silicitos, calizas brechosas, rocas vulcanógenas, y bloques de areniscas arcillosas de hasta un metro de diámetro. Se ha observado que en los pozos existe un amplio predominio de las margas hacia las partes superiores.

Edad: Oligoceno Superior.

Ambiente de Sedimentación: Se depositó en una cuenca marina de aguas no muy profundas.

Espesor: Aproximadamente 200 m.

Colón, Formación (cln) (P₃-N₁¹ cln)

Litología: Se pueden distinguir cuatro facies: I. Biocalcarenitas y biocalciruditas finas de matriz margosa con lepidocyclinas y heterosteginas, calciruditas finas de matriz micrítica y brechas bioclásticas, formadas principalmente por fragmentos de corales. II. Calizas biomicríticas con lepidocyclinas. III. Areniscas polimícticas de matriz calcáreo-arcillosa o arcillosocalcárea. IV. Margas y calcilitas cretosas que se interstratifican con calcarenitas y calciruditas.

Edad: Oligoceno Superior parte alta - Mioceno Inferior.

Ambiente de Sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral profundo con algún desarrollo arrecifal. Es posible que algunos paquetes se hayan depositado en la zona infralitoral.

Espesor: No parece exceder de 65 m en el área tipo según datos de pozos.

Consuelo, Formación (cs) (P₂³ cs)

Litología: Calizas biogénicas de color blanco y crema, calizas micríticas de igual coloración y margas masivas deleznales de color blanco crema.

Edad: Eoceno Superior, parte alta.

Ambiente de Sedimentación: Marino pelágico. Son sedimentos depositados en profundidades entre 200m y 300 m, con subsidencia rápida del fondo marino.

Espesor: No sobrepasa los 40 metros.

Cojímar, Formación (cj) (N₁¹⁻² cj)

Litología: Margas calcáreas, arcillosas, que transicionan hasta margas arenáceas y a veces nodulares, de colores gris a crema oscuro, o amarillo blancuzco. Calizas biodetríticas arcillosas de grano fino a medio, calcarenitas de matriz margosa y arcillas. En las margas, principalmente, se encuentran restos de moluscos, peces, equinodermos y varios tipos de microfósiles.

Edad: Mioceno Inferior, parte alta - Mioceno Medio, parte baja.

Ambiente de Sedimentación: Se depositó en la zona sublitoral profunda y la parte alta del talud del shelf, entre los 100 m y 300 m.

Espesor: Oscila entre 60 m y 390 m.

Jaruco, Formación (jar) (jr) (N₁¹ jr)

Litología: Calizas biodetríticas arcillosas frecuentemente con grandes lepidocyclinas, interstratificadas con margas. Subordinadamente se observan calizas arrecifales, calciruditas y calcarenitas. Predominan los colores blanco, crema y gris. Puede ser observado un conglomerado basal al oeste de Punta Negro, en la bahía de Orozco, provincia de Pinar del Río, cuyos clastos redondeados y subangulosos se componen de tobas, lavas, calizas y areniscas procedentes de formaciones cretácicas.

Edad: Oligoceno Superior, parte alta - Mioceno Inferior.

Ambiente de Sedimentación: Se originó en un ambiente sublitoral.

Espesor: Oscila entre los 60 m y 240 m.

Vía Blanca, Formación (vb) (K₂^{cp-m} vb)

Litología: En general, se trata de una secuencia flyschoides constituida por argilitas, limolitas y areniscas, de composición grauváquica, de color rojizo-verdoso y pardusco, con intercalaciones finas de margas blancas. Aparecen capas de conglomerados polimícticos en diferentes niveles, con matriz arenosa y arcillo-arenosa, calizas detríticas, arcillas y tufitas. Contiene paquetes olistostrófico, difíciles de cartografiar.

Edad: Cretácico Superior (Campaniano Inferior-Maastrichtiano Superior).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente de aguas profundas con carácter turbidítico. La sedimentación fue rítmica, originada

por corrientes de gran turbidez, en una época de fuerte inestabilidad tectónica, depositada en la base del talud con aporte de rocas de la plataforma insular contigua y del arco volcánico.

Espesor: Oscila entre 500 m y 800 m.

4. RESULTADOS

Comportamiento químico (Macro-constituyentes)

Los minerales disueltos en las aguas de embalses tropicales alcanzan un amplio rango, influyendo en esto la cantidad y distribución de las precipitaciones como factor decisivo en el resultado del contenido de sales de estos ecosistemas acuáticos. Las características

geológicas de la cuenca hidrográfica (rocas volcánicas y sedimentarias, su edad y el periodo de tiempo durante el cual han estado sujetos a procesos de intemperismo en diferentes periodos climáticos) no solo afecta la tasa de solubilidad y la cantidad de sustancias que alcanzan las aguas de los embalses, sino también explican en parte la composición de los elementos que se encuentran disueltos (Fagundo, 1996).

En las Tabla 2 y 2A se muestran los resultados de las sales disueltas en las aguas producto de la geología presente, tanto por estaciones como de forma integrada para el embalse, posibilitando esto la clasificación de Bicarbonatadas-Cálcicas, obtenida según el gráfico de Stiff que se muestra en la Figura 3.

Tabla 2. Análisis realizados por la ENAST de La Habana con el monitoreo efectuado por la EIPHH en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Sólidos Totales Disueltos)

| Estación | Profundidad | pH | Ce (25°C) | NO ₃ ¹⁻ | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ¹⁻ | Cl ¹⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ¹⁺ | K ¹⁺ | SST |
|----------|---------------|------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | (m) | (U) | (µS/cm) | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ |
| 1 | 1-Maurin 0-2 | 7,84 | 370 | 0,9 | 0 | 153 | 32 | 34 | 41 | 4 | 35 | 4,9 | 303 |
| 2 | 1-Maurin 0-2 | 8,02 | 370 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 35 | 41 | 4 | 27 | 4,9 | 265 |
| | 3-Maurin 4-6 | 8,02 | 369 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 32 | 40 | 4 | 27 | 4,9 | 262 |
| | 2-Maurin 2-4 | 8,07 | 360 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 33 | 41 | 4 | 27 | 4,9 | 263 |
| 3 | 1-Maurin 0-2 | 8,08 | 359 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 33 | 40 | 3 | 27 | 4,9 | 261 |
| | 2-Maurin 2-4 | 8,14 | 366 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 33 | 40 | 4 | 27 | 4,9 | 263 |
| | 3-Maurin 4-6 | 7,97 | 381 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 37 | 43 | 3 | 27 | 4,9 | 269 |
| | 4-Maurin 6-8 | 8,12 | 365 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 33 | 40 | 3 | 27 | 4,9 | 262 |
| | 5-Maurin 8-10 | 8,13 | 374 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 36 | 42 | 3 | 27 | 4,9 | 267 |
| 4 | 1-Maurin 0-2 | 7,95 | 375 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 32 | 39 | 4 | 27 | 4,9 | 261 |
| | 2-Maurin 2-4 | 8,00 | 368 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 36 | 40 | 5 | 27 | 4,9 | 266 |
| | 3-Maurin 4-6 | 8,07 | 367 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 31 | 40 | 4 | 27 | 4,9 | 261 |
| 5 | 1-Maurin 0-2 | 7,87 | 367 | 0,9 | 0 | 122 | 32 | 32 | 40 | 3 | 27 | 4,9 | 260 |

Tabla 2A. Análisis Integrados de los resultados del monitoreo en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Sólidos Totales Disueltos)

| Integración y Profundidades | pH | Ce (25°C) | NO ₃ ¹⁻ | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ¹⁻ | Cl ¹⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ¹⁺ | K ¹⁺ | SST |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | (U) | (mS/m) | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ |
| Maurin 0-2 | 7,95 | 36,8 | 0,90 | 0 | 128 | 32 | 33 | 40 | 4 | 29 | 5 | 270 |
| Maurin 2-4 | 8,07 | 36,5 | 0,90 | 0 | 122 | 32 | 34 | 40 | 4 | 27 | 5 | 264 |
| Maurin 4-6 | 8,02 | 37,2 | 0,90 | 0 | 122 | 32 | 33 | 41 | 4 | 27 | 5 | 264 |
| Maurin 6-8 | 8,12 | 36,5 | 0,90 | 0 | 122 | 32 | 33 | 40 | 3 | 27 | 5 | 262 |
| Maurin 8-10 | 8,13 | 37,4 | 0,90 | 0 | 122 | 32 | 36 | 42 | 3 | 27 | 5 | 267 |
| Valores Promedio Embalse | 8,06 | 36,9 | 0,90 | 0 | 123 | 32 | 34 | 41 | 4 | 27 | 5 | 265 |

| Integración y Profundidades | pH | Ce (25°C) | NO ₃ ¹⁻ | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ¹⁻ | Cl ¹⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
|---------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | (U) | (mS/m) | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ | meq L ⁻¹ |
| Maurin 0-2 | 7,95 | 37 | 0,01 | 0 | 2,10 | 0,90 | 0,69 | 2,01 | 0,30 | 1,24 | 0,13 |
| Maurin 2-4 | 8,07 | 36 | 0,01 | 0 | 2,00 | 0,90 | 0,71 | 2,01 | 0,36 | 1,17 | 0,13 |
| Maurin 4-6 | 8,02 | 37 | 0,01 | 0 | 2,00 | 0,90 | 0,69 | 2,05 | 0,30 | 1,17 | 0,13 |
| Maurin 6-8 | 8,12 | 37 | 0,01 | 0 | 2,00 | 0,90 | 0,69 | 2,00 | 0,25 | 1,17 | 0,13 |
| Maurin 8-10 | 8,13 | 37 | 0,01 | 0 | 2,00 | 0,90 | 0,75 | 2,10 | 0,25 | 1,17 | 0,13 |
| Valores Promedio Embalse | 8,06 | 37 | 0,01 | 0 | 2,02 | 0,90 | 0,71 | 2,03 | 0,29 | 1,19 | 0,13 |

Relaciones geoquímicas

Las relaciones geoquímicas que fueron objeto de análisis, se fundamentan en la litología presente en la

cuenca hidrográfica y su influencia en la composición salina de las aguas embalsadas. Se presentan los valores promedio de estas relaciones:

| HCO ₃ /Cl | HCO ₃ /(Ca+Mg) | (Ca+Mg)/Na | Cl/Na | Ca/Na | Ca/Mg | K/Na | (Na+K)/Cl |
|----------------------|---------------------------|------------|-------|-------|-------|------|-----------|
| 2,24 | 0,87 | 1,95 | 0,76 | 1,71 | 7,02 | 0,11 | 1,46 |

El cociente HCO₃:Cl siempre es >2 en todos los niveles del embalse, lo que pone de manifiesto que en la clasificación aquí descrita, con aporte litológico fundamentalmente de calizas, no se presentarán concentraciones importantes de cloruro.

La relación HCO₃:(Ca²⁺+Mg²⁺) es cercana a 1, en correspondencia con todo lo expuesto, ya que el bicarbonato (HCO₃) debe estar equilibrado con calcio y magnesio (Ca²⁺+Mg²⁺) como se muestra en la razón analizada.

La relación (Ca²⁺+Mg²⁺):Na⁺ muestra que la misma se comporta como debe esperarse, o sea, Ca²⁺+Mg²⁺ es siempre superior a Na⁺.

El cociente Cl:Na⁺, en la mayoría de las muestras analizadas es cercano a 1, dado el equilibrio de aportes entre sodio y cloruro, existiendo no obstante el equilibrio entre estos iones.

El calcio prevalece sobre el sodio, lo que se realza en el cociente Ca²⁺:Na⁺ el cual es superior a 1 y por ello el predominio en la clasificación.

El cociente Ca²⁺:Mg²⁺ que en la mayoría de las muestras es >1, y por ello el predominio de la clasificación.

La pequeñez relativa del cociente K⁺:Na⁺ evidencia la baja presencia del potasio (K⁺) en estas aguas. Esto hace que el cociente (Na⁺+K⁺):Cl también sea mayor a 1 debido a lo pequeño del potasio y el cloro (Cl) en relación con el sodio (Na⁺).

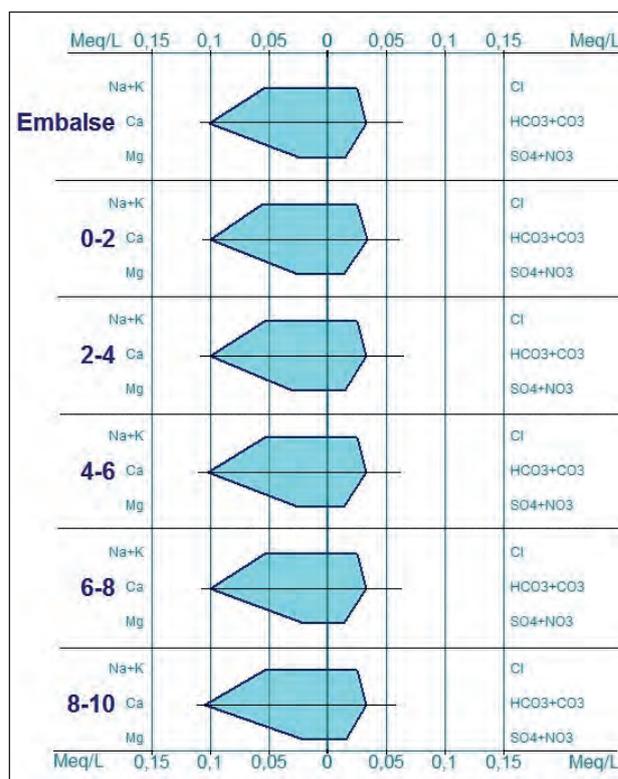


Figura 3.- Gráficas de Stiff desarrolladas para cada nivel monitoreado y para la integración de los valores del embalse

Dureza Total y Alcalinidad Total

La dureza total al CaCO_3 , analizada por la ENAST Habana se comportó entre 112 y 120 mgL^{-1} (Tabla 3), y en la integración efectuada (Tabla 3A) presenta

como promedio un valor de 116 mgL^{-1} . La Alcalinidad Total al CaCO_3 , (Tabla 3) osciló entre 100 y 125 mgL^{-1} , en la integración efectuada para el análisis del embalse (Tabla 3A) presenta como promedio un valor de 100 mgL^{-1} .

Tabla 3. Análisis realizados por la ENAST de La Habana con el monitoreo efectuado por la EIPHH en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Nutrientes, Dureza total, Alcalinidad, Materia Orgánica (DQO y DBO), Coliformes Totales y Termotolerantes y Turbiedad)

| Estación | Profundidad | NO_3^{1-} | NO_2^{1-} | PO_4^{3-} | DT (*) CaCO_3 | Alc (+) CaCO_3 | DBO_5^{20} | DQO | DBO/ DQO | CT (-) | CTT | Turbiedad |
|----------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| | (m) | mg L^{-1} | mg L^{-1} | mg L^{-1} | mg L^{-1} | mg L^{-1} | mgO_2 L^{-1} | mgO_2 L^{-1} | | NMP 100m L^{-1} | NMP 100m L^{-1} | UNT |
| 1 | Maurin 0-2 | 0,9 | 0,02 | 0,01 | 120 | 125 | 5 | 30 | 0,17 | 8 | 4 | 1,3 |
| 2 | Maurin 0-2 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 118 | 100 | 3 | 18 | 0,17 | 4 | 2 | 4,4 |
| | Maurin 2-4 | 0,9 | 0,04 | 0,01 | 116 | 100 | 3 | 20 | 0,10 | 12 | 9 | 0,5 |
| | Maurin 4-6 | 0,9 | 0,04 | 0,01 | 120 | 100 | 5 | 52 | 0,15 | 2 | 2 | 1,1 |
| 3 | Maurin 0-2 | 0,9 | 0,07 | 0,01 | 112 | 100 | 8 | 53 | 0,15 | 13 | 8 | 3,5 |
| | Maurin 2-4 | 0,9 | 0,06 | 0,01 | 118 | 100 | 7 | 42 | 0,18 | 1 | 1 | 2,3 |
| | Maurin 4-6 | 0,9 | 0,06 | 0,01 | 120 | 100 | 7 | 52 | 0,13 | 8 | 4 | 2,5 |
| | Maurin 6-8 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 112 | 100 | 3 | 17 | 0,18 | 23 | 13 | 3,1 |
| | Maurin 8-10 | 0,9 | 0,08 | 0,01 | 118 | 100 | 2 | 12 | 0,17 | 23 | 8 | 3,4 |
| 4 | Maurin 0-2 | 0,9 | 0,06 | 0,01 | 116 | 100 | 8 | 67 | 0,12 | 23 | 13 | 2,6 |
| | Maurin 2-4 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 120 | 100 | 1 | 9 | 0,11 | 4 | 2 | 2,8 |
| | Maurin 4-6 | 0,9 | 0,06 | 0,01 | 116 | 100 | 3 | 35 | 0,09 | 1 | 1 | 2,5 |
| 5 | Maurin 0-2 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 112 | 100 | 7 | 63 | 0,11 | 4 | 2 | 3,2 |

El contenido de sales disueltas en el agua, es uno de los problemas medio ambientales más importantes de la humanidad, debido a su incidencia en la salud. Los principales iones que contribuyen a este problema son el cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y en menor medida nitrato (NO_3^-) y potasio (K^+). La fuente original y de cierto modo la más directa de la cual provienen las sales son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en las rocas expuestas de la corteza terrestre, las cuales sufren intemperismo.

Las relaciones geoquímicas entre aniones y cationes (Fagundo, 1996; Fagundo y González, 1999; Fagundo, 2005) contribuyen al conocimiento sobre la composición química de las aguas embalsadas.

El desarrollo de la vida acuática requiere de respuestas que no son posible encontrar sólo con los análisis químicos (Tinnberg, 1978), sino con la interrelación entre los aspectos biológicos, físicos y químicos en su conjunto.

Es importante hablar sobre la calidad del agua cuando se refiere a las correlaciones que se desarrollan en un lago o embalse y sobre esta situación, Krienitz y Kotut (2001) plantearon que la calidad del agua está caracterizada por los diferentes criterios físico-

químicos y biológicos, ya que la estructura de la comunidad del fitoplancton y la biodiversidad provee el uso de un índice de calidad de agua, así como el uso potencial de la misma.

Al analizar toda la información obtenida en el estudio sobre el contenido de las sales disueltas (Macroconstituyentes) en el agua es importante destacar que todos estos valores se encuentran por debajo de la norma de NC-1021 (2014).

Ciclos del Nitrógeno y el Fósforo

Los resultados sobre ambos ciclos no se pudieron realizar completos debido a la falta de reactivos para el caso del Nitrógeno Total (Nt) y el Fósforo Total, aunque de los análisis efectuados los límites de detección se encuentran superiores a las necesidades para este tipo de aguas, el nitrato (NO_3^-) <1 , el nitrito (NO_2^-) $<0,02$, el fosfato (PO_4^{3-}) $<0,02$, el amonio (NH_4^+), no fue posible analizarlo. Para que los análisis de las aguas embalsadas se utilicen o no para abasto a población, es necesario que los nutrientes se realicen con límites de detección = 0,001, ya que la interpretación, tanto para considerar el uso por los organismos vegetales microscópicos (*Fitoplancton*) como para la existencia de la vegetación acuática flotante

o no, requiere de concentraciones mínimas para iniciar su invasión, por lo que se considera que la fuente externa más importante, es el contenido de nutrientes del agua con concentraciones de N-NO₃ y P-PO₄ entre 0.001-0.010 mgL⁻¹ y 0.001-0.005 mgL⁻¹ respectivamente, por lo que se pueden obtener productividades elevadas de las plantas acuáticas (Shiralipour *et al.*, 1981), en estas aguas los valores se encuentran entre 0,9 y 0.01 mgL⁻¹, estos resultados favorecen que se inicie la infestación del

ecosistema a partir de la presencia de nitrato ya que el nivel de fósforo también influirá pero en menor intensidad. Esto permitirá establecer relaciones entre la biomasa planctónica con la biomasa de la vegetación acuática superior y la biomasa medida como clorofila, ya que de estas consideraciones se podrán establecer los niveles tróficos de las aguas y proponer cuales debían ser los niveles óptimos de explotación en el uso de las aguas sobre todo para el abasto de agua a las poblaciones.

Tabla 3A. Análisis Integrados de los resultados del monitoreo en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Nutrientes, Dureza total, Alcalinidad, Materia Orgánica (DQO y DBO), Coliformes Totales y Termotolerantes y Turbiedad)

| Integración y Profundidades | NO ₃ ¹⁻ | NO ₂ ¹⁻ | PO ₄ ³⁻ | DT (*) CaCO ₃ | Alc (+) CaCO ₃ | DBO ₅ ²⁰ | DQO | CT (-) | CTT | Turbiedad |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|
| | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | mgO ₂ L ⁻¹ | mgO ₂ L ⁻¹ | NMP 100m L ⁻¹ | NMP 100m L ⁻¹ | UNT |
| Maurin 0-2 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 114,5 | 100 | 6,2 | 46,2 | 10,4 | 5,8 | 3,0 |
| Maurin 2-4 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 119,3 | 100 | 4,3 | 34,3 | 2,3 | 1,7 | 2,1 |
| | Maurin 4-6 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 117,3 | 100 | 4,3 | 35,7 | 7,0 | 4,7 |
| | Maurin 6-8 | 0,9 | 0,05 | 0,01 | 112,0 | 100 | 3,0 | 17,0 | 23,0 | 13,0 |
| Maurin 8-10 | 0,9 | 0,08 | 0,01 | 118,0 | 100 | 2,0 | 12,0 | 23,0 | 8,0 | 3,4 |
| Valores Promedio Embalse | 0,9 | 0,056 | 0,01 | 116,0 | 100 | 4,0 | 29,0 | 13,0 | 7,0 | 3,0 |

No obstante los valores de nitrato se encuentran según la NC-1021 (2014) por encima de la norma, la cual está sujeta a modificación con la propuesta de la WHO (2011), en la cual se considera que el valor máximo aceptable estará en los 0,3 mgL⁻¹, por lo que estos valores entre 0.02 y 0.08 mgL⁻¹ (Tabla 3A) no representan afectaciones alguna para la salud ni para el desarrollo de la *metahemoglobinemia* sobre todo en los infantes, que son de las poblaciones existentes, los más afectados, por lo que los nutrientes no se encuentran en concentraciones superiores a lo normado para el consumo humano según la normativa Cubana.

Materia Orgánica

Las demandas química (DQO) y bioquímica (DBO₅²⁰) fueron relativamente bajas, aunque normales para el comportamiento de las aguas embalsadas, encontrando que sus valores oscilaron en las estaciones entre 9 y 67 mgO₂L⁻¹ para la DQO (Tabla 3) y de forma integral como promedio 29 mgO₂L⁻¹, con oscilaciones para los niveles de agua analizadas entre 46,2 y 12 mgO₂L⁻¹, coincidiendo con el nivel superior (0-2 m) el valor más elevado y el menor con el valor mínimo (8-10 m). La DBO₅²⁰ presenta valores entre las estaciones de 1 y 8 mgO₂L⁻¹ (Tabla 3) y un valor integrado promedio de 4 mgO₂L⁻¹, cuyas oscilaciones entre los niveles acuáticos analizados que oscilan entre 2 y 6,2 mgO₂L⁻¹, correspondiendo

el valor mínimo con el nivel de (8-10 m) y el mayor con la capa superficial de 0-2 m.

Las Relaciones de la DBO₅/DQO muestran que las aguas de este embalse, por estación e integrando el ecosistema, oscilan entre 0,09 y 0,18 por lo que según Aziz (1980) y Ardila (2014) se encuentran estabilizadas, ya que no presentan signos de contaminación elevados, al respecto Kenbi Lab (2015) analiza la situación considerando que, como la relación (DBO₅/DQO) es <0,2 entonces se asume que los vertimientos son poco biodegradables y son convenientes los tratamientos físico-químicos, que es en definitiva lo que se realizará en un tratamiento convencional de las aguas para su potabilización.

En la NC-1021 (2014) no se consideran valores de DBO y DQO, pero se decidió analizarlos por la imposibilidad de la ejecución de otros análisis compensando de esta forma la interpretación requerida para determinar que la calidad de las aguas de esta fuente podría utilizarse para el consumo humano, ya que se encuentra integralmente en valores pequeños con posibilidades de su degradación durante el proceso de potabilización.

Microbiología

Los análisis microbiológicos efectuados fueron bajos en general y pueden eliminarse con la cloración normal que se utiliza para las plantas de tratamientos completas y aún para aquellas consideradas con

cloración en línea, como resulta del caso de los acuíferos, cuyo uso fundamental es el abasto a poblaciones. En las Tablas 3 y 3A se observan los valores medidos para los *Coliformes Termotolerantes*, entre 1 y 13 NMP 100mL⁻¹ por estaciones coincidiendo el valor mayor en las estaciones: 3 (*Frente a la obra de toma*) en el nivel de los 6-8 m de profundidad y 4 (*Entrada de arroyo s/n*) en la capa superficial (0-2 m). En la integración efectuada se encuentra en la Tabla 3A, el valor promedio fue de 7 NMP100mL⁻¹. Se cumplen de esta forma con los valores señalados en la NC-1021 (2014) para los aspectos microbiológicos analizados.

Turbiedad

Se efectuó la misma en el Laboratorio de Bejucal de la ENAST debido a la falta de patrones existente en el Laboratorio de La Habana. Sus valores estuvieron bajos (Tabla 3) en todas las estaciones, oscilando entre 0,5 y 4,4 UNT, estando estos extremos representados en la estación 2 la más cercana al aliviadero. En la integración (Tabla 3A) el promedio

obtenido es 3 UNT. Estos resultados se encuentran por debajo del valor normado que para el caso Cubano considera una turbiedad equivalente a 5 UNT.

4.1 Análisis In Situ

Para esta parte de las mediciones se utilizó un medidor multi-paramétrico TOA-DKK, Modelo WQC-24 de Japón, el cual permite medir los niveles en el terreno de las temperaturas, el oxígeno disuelto y el pH. Estos parámetros permiten analizar el comportamiento térmico del embalse y cómo se encuentra el pH del agua en el ecosistema permitiendo conocer una parte del futuro tratamiento a realizar, si fuera a considerarse completo (*Adición de Reactivos, Floculación, Sedimentación, Filtración y Cloración*).

En la Tabla 4 se pueden observar todas las mediciones efectuadas con el equipo señalado, aunque de ellas solo fueron utilizadas para el análisis la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH.

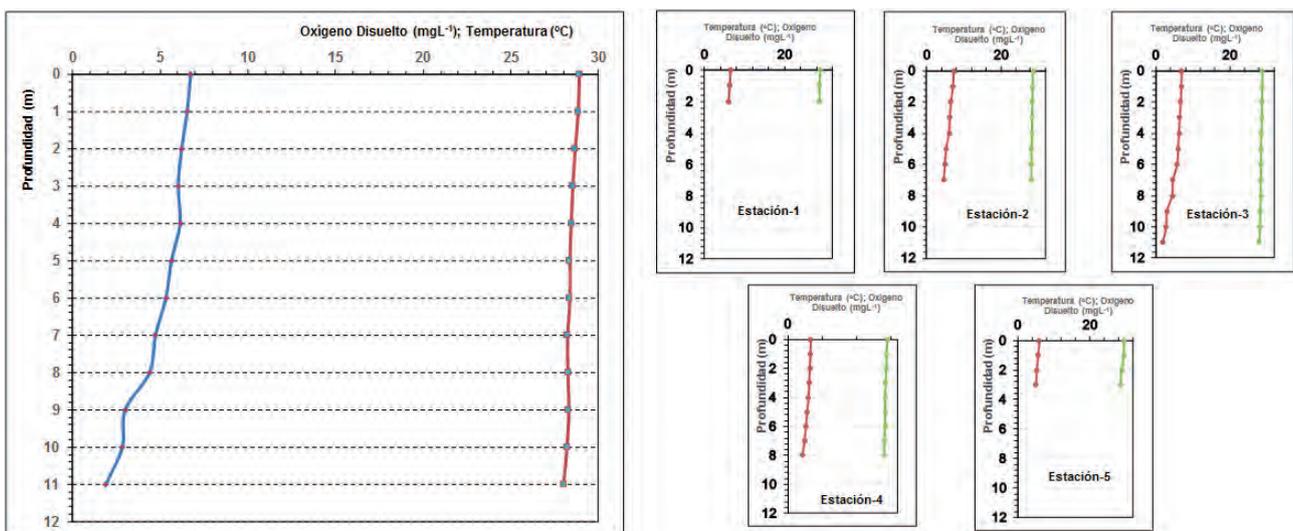


Figura 4.- Valores promedio de las aguas del embalse Maurín de la Temperatura (°C), y el Oxígeno Disuelto (mgL⁻¹) en 5 estaciones del embalse Maurín, Bauta, Artemisa. Mediciones in Situ.

En la Figura 4 se observa como en la integración del ecosistema, la temperatura para la época del año se mantiene prácticamente constante aunque hay variaciones mínimas con diferencias entre la superficie y el fondo de 0,9 °C y entre 0,1 y 1,0 °C por estaciones.

No se observan signos de estratificación y puede ser debido a que la profundidad mayor alcanzada fue de 12 m frente a la obra de toma, aunque la profundidad máxima según proyecto en el momento del cierre hace 42 años, fue de 20,25 m, en lo cual puede estar incidiendo la sedimentación ocurrida hasta el año actual.

Los embalses por lo general se comportan con esta uniformidad tanto en sus temperaturas como en la disolución del oxígeno atmosférico, incidiendo también el fitoplancton presente en los diferentes niveles. Esto ha sido demostrado por muchos autores (Lewis, 1983,1984) los que describen que aquellos embalses cuya profundidad es cercana a los 10 m tienen un carácter polimíctico, lo que significa que se mezclan periódicamente durante el año en diferentes épocas.

Los niveles de oxígeno disuelto son aceptables para toda la columna de agua incluyendo el fondo en la zona cercana a la obra de toma, por lo que en el resto del embalse también esto beneficia el uso de las aguas, sobre todo para la potabilización.

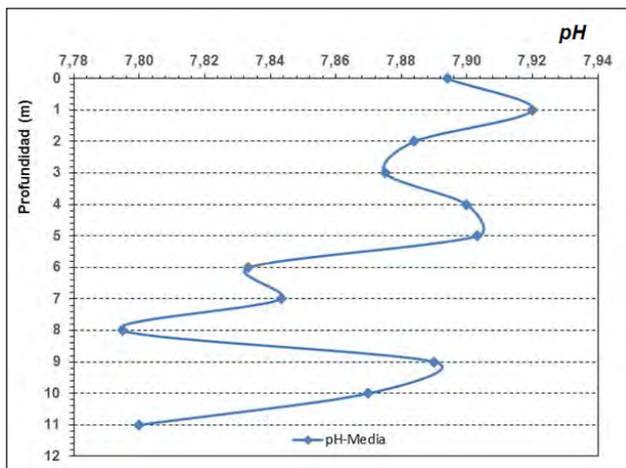


Figura 5.- Mediciones in situ de pH en 5 estaciones del Embalse Maurín, Bauta, Artemisa.

En la Figura 5 se puede observar como varía el pH en la columna de agua favoreciendo de esta forma que el proceso de potabilización pueda desarrollarse eficientemente, ya que este es uno de los primeros elementos a considerar en la calidad del agua como fuente para la aplicación de los reactivos requeridos (sulfato de aluminio). Las variaciones del pH oscilan entre 7,80 y 7,92 U, lo que indica que es apto para el proceso señalado.

Tabla 4. Valores de los Elementos Muestreados en cinco (5) estaciones en el embalse Maurín, utilizando la sonda multiparamétrica TOA-DKK, Modelo WQC-24 de Japón, para el monitoreo IN SITU

| Descripción | Unidad | ESTACION - 1 | | | | ESTACION - 2 | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|---------------|-------|-------|--|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| | | S | 1 | 2 | 3 | S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Profundidad | m | 3 | - | - | - | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Volumen Trabajo | 10 L | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Coordenadas | N | 23o 01' 4,1" | - | - | - | 23o 01' 3,1" | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | W | 82o 30' 54,0" | - | - | - | 82o 31' 31,5" | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Disco Secchi | m | 1,25 | - | - | - | 1,05 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| pH | U | 7,75 | 7,82 | 7,75 | Exceso de Turbiedad por el nivel de sedimentos | 7,87 | 7,93 | 7,92 | 7,92 | 7,90 | 7,83 | 7,85 | 7,84 | |
| OD | mgL ⁻¹ | 6,56 | 6,30 | 6,04 | | 7,34 | 7,08 | 6,56 | 6,24 | 6,02 | 5,24 | 4,90 | 4,66 | |
| Ce | mS/m | 44,80 | 45,30 | 44,80 | | 44,80 | 45,00 | 44,70 | 44,90 | 44,80 | 45,10 | 41,00 | 45,00 | |
| Temperatura | °C | 28,8 | 28,7 | 28,7 | | 28,7 | 28,6 | 28,5 | 28,4 | 28,4 | 28,3 | 28,3 | 28,2 | |
| Salinidad | % | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | |

| Descripción | Unidad | ESTACION - 3 | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Profundidad | m | 12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Volumen Trabajo | 10 L | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Coordenadas | N | 23o 01' 4,4" | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | W | 82o 32' 17,3" | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Disco Secchi | m | 1,10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| pH | U | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,01 | 7,96 | 7,99 | 7,90 | 7,93 | 7,89 | 7,89 | 7,87 | 7,80 | Exceso de Turbiedad por el nivel de sedimentos |
| OD | mgL ⁻¹ | 7,04 | 6,92 | 6,76 | 6,50 | 6,28 | 6,04 | 5,78 | 4,66 | 4,42 | 3,00 | 2,84 | 1,90 | |
| Ce | mS/m | 43,50 | 44,10 | 44,90 | 44,30 | 46,90 | 44,90 | 48,40 | 40,80 | 44,90 | 44,90 | 44,20 | 45,00 | |
| Temperatura | °C | 28,8 | 28,8 | 28,7 | 28,7 | 28,6 | 28,5 | 28,5 | 28,4 | 28,4 | 28,3 | 28,2 | 28,0 | |
| Salinidad | % | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | |

| Descripción | Unidad | ESTACION - 4 | | | | | | | | ESTACION - 5 | | | | |
|-----------------|-------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------------|-------|-------|-------|
| | | S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | S | 1 | 2 | 3 |
| Profundidad | m | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 | - | - | - |
| Volumen Trabajo | 10 L | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Coordenadas | N | 23o 00' 39,6" | - | - | - | - | - | - | - | - | 23o 00' 31,7" | - | - | - |
| | W | 82o 32' 6,9" | - | - | - | - | - | - | - | - | 82o 31' 40,8" | - | - | - |
| Disco Secchi | m | 1,05 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,10 | - | - | - |
| pH | U | 7,97 | 7,91 | 7,95 | 7,87 | 7,84 | 7,89 | 7,75 | 7,76 | 7,70 | 7,88 | 7,94 | 7,80 | 7,70 |
| OD | mgL ⁻¹ | 6,70 | 6,66 | 6,42 | 6,24 | 6,08 | 5,62 | 5,28 | 4,86 | 4,36 | 6,02 | 5,70 | 5,30 | 5,10 |
| Ce | mS/m | 43,30 | 45,20 | 45,60 | 45,10 | 45,00 | 45,00 | 44,80 | 44,70 | 44,80 | 53,50 | 44,80 | 44,90 | 44,90 |
| Temperatura | °C | 29,0 | 28,7 | 28,6 | 28,5 | 28,3 | 28,3 | 28,3 | 28,1 | 28,1 | 29,5 | 29,4 | 28,8 | 28,5 |
| Salinidad | % | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

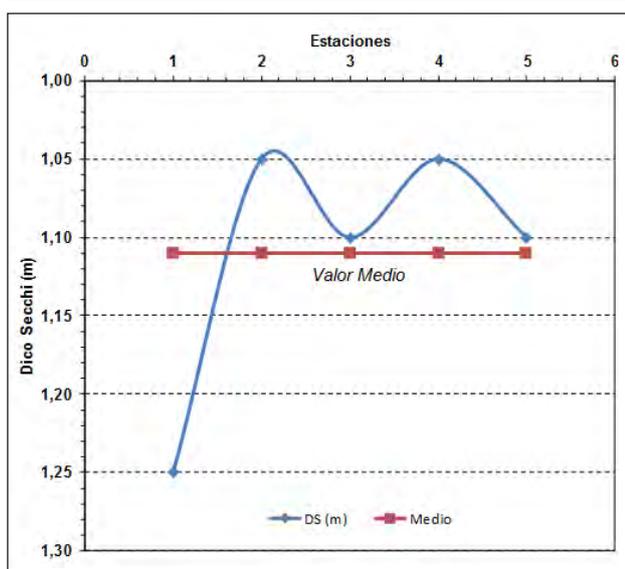


Figura 6.- Resultados de la medición de la Transparencia en cada estación, utilizando el Disco Secchi (m)

Mediciones de Transparencias.

En la Tabla 4 y Figura 6 la transparencia medida a través del Disco Secchi se puede observar que las variaciones fueron entre 1,05 y 1,25 m, lo que indica que el embalse tiene un comportamiento mesotrófico, pero no es posible destacar si hay alguna tendencia hacia la eutrofia debido a que los nutrientes no pudieron analizarse con el rigor necesario para el caso y tampoco se pudo hacer el análisis de clorofila que completa la información para la determinación trófica de un ecosistema acuático.

Metales Pesados

Entre los análisis efectuados se solicitaron los metales pesados, entre los cuales se encuentran algunos de aquellos considerados tóxicos e importantes para la salud como el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el plomo (Pb), el Níquel (Ni), el cobre (Cu), el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), este último no pudo realizarse por falta de patrones para las mediciones con el equipo de Plasma Inductivo conocido como ICP (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis realizados por la ENAST de La Habana con el monitoreo efectuado por la EIPHH en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Plata (Ag), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Niquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn))

| Estación | Profundidad (m) | Ag | Ba | Cd | Co | Cr | Cu | Mn | Mo | Ni | Pb | V | Zn |
|--|-----------------|---|---|--|--|--|---|---|---|---|---|--|---|
| | | (mgL ⁻¹) 0,02 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,02 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,008 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,007 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,008 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,02 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,03 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,008 ⁽⁰⁾ | (mgL ⁻¹) 0,02 ⁽⁰⁾ |
| 1 | Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,03 | 0,02 | <0,02 |
| 2 | Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 2-4 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,03 | 0,01 | <0,02 |
| | Maurin 4-6 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,01 | <0,02 |
| 3 | Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 2-4 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,03 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 4-6 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 6-8 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,01 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 8-10 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,02 | 0,02 | <0,02 |
| 4 | Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 2-4 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,01 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,02 | <0,02 |
| | Maurin 4-6 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| 5 | Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,012 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,02 | <0,02 |
| Limite Máximo Admisible (mgL ⁻¹) | | NC-1021/2014 | | 0,005 | | 0,05 | 2 | 0,1 | | 0,02 | 0,05 | | 5 |

Los metales señalados en el párrafo anterior son parte integrante de la NC 1021 (2014) cuyos valores máximos aceptables se encuentran en los siguientes órdenes: cadmio (Cd) =0,005, cromo (Cr) =0,05,

plomo (Pb) =0,05, níquel (Ni) =0,02, zinc (Zn) = 5, cobre (Cu) =2, manganeso (Mn) =0,1 y el hierro (Fe) =0,3 todos en mgL⁻¹.

Tabla 5A. Análisis Integrados de los resultados del monitoreo en el embalse Maurín, en cinco (5) Estaciones (Plata (Ag), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Niquel (Ni), Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn))

| Integración y Profundidades | Ag (mgL ⁻¹) | Ba (mgL ⁻¹) | Cd (mgL ⁻¹) | Co (mgL ⁻¹) | Cr (mgL ⁻¹) | Cu (mgL ⁻¹) | Mn (mgL ⁻¹) | Mo (mgL ⁻¹) | Ni (mgL ⁻¹) | Pb (mgL ⁻¹) | V (mgL ⁻¹) | Zn (mgL ⁻¹) |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | 0,02 (0) | 0,02 (0) | 0,008 (0) | 0,007 (0) | 0,008 (0) | 0,02 (0) | 0,02 (0) | 0,02 (0) | 0,02 (0) | 0,03 (0) | 0,008 (0) | 0,02 (0) |
| Maurin 0-2 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,012 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,0375 | 0,02 | <0,02 |
| Maurin 2-4 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,01 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,02 | <0,02 |
| Maurin 4-6 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| Maurin 6-8 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,01 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| Maurin 8-10 | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | <0,008 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,02 | 0,02 | <0,02 |
| Valores Promedio Embalse | <0,02 | 0,03 | <0,008 | <0,007 | 0,01 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,03 | 0,02 | <0,02 |
| Limite Máximo Admisible (mgL ⁻¹) | NC-1021/2014 | | 0,005 | | 0,05 | 2 | 0,1 | | 0,02 | 0,05 | | 5 |

(0) = Límite de Detección en la Técnica de Análisis

En la Tabla 5A se muestran los valores integrados de los metales en el embalse, mostrando por niveles de agua sus concentraciones y como promedio para el embalse, destacando entre estos, que el Bario (Ba) no se encuentra considerado entre los metales que inciden sobre la salud pero mostró valores de 0,03 mgL⁻¹ en todos los perfiles. El Cadmio (Cd) aunque sus valores estuvieron por debajo del límite de detección este no alcanza el valor máximo admisible en la NC-1021 (2014). El Cromo (Cr) se encuentra por debajo del máximo admisible por la referida norma con valores promedio de 0,01 mgL⁻¹. No se reporta presencia de Cobre (Cu), ni tampoco de Manganeseo (Mn), ni de Niquel (Ni). Hay presencia de Plomo (Pb) aunque sus valores quedaron por debajo de lo normado y oscilan entre 0,02 y 0,04 mgL⁻¹, es recomendable mantener la alerta al menos para este elemento. El Vanadio (V) no se encuentra entre los elementos de la NC-1021 (2014) y sus valores fueron de 0,02 mgL⁻¹. El Zinc (Zn) no se detectó en las muestras analizadas. En estos aspectos también se cumple con la normativa Cubana para los elementos considerados como metales pesados de modo general.

Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Totales

Los especialistas del Laboratorio de Química Ambiental del CEINPET participaron en el monitoreo de las aguas para asegurar la efectividad de las muestras, los puntos seleccionados por especialistas de la Dirección de Investigaciones Aplicadas de la EIPHH fueron cuatro en total, uno frente al aliviadero (superficie y 0,30 m), uno frente a la Obra de Toma (superficie y 0,80 m), uno frente a la Estación de Bombeo de San Pedro (superficie y 1,0 m) y uno en la cola del río Santa Ana (superficie y 1,0 m).

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos destacando que en cuatro de ellos se alcanzó el valor máximo admisible para la Norma de Referencia del Estado de Massachusetts, E.U.A. para el agua de consumo humano (ORSG, 2000).

El laboratorio del CEINPET realizó el análisis de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) aromáticos, utilizando un equipo SiteLAB UVF-3100, el cual adopta el método de fluorescencia ultravioleta (UVF) para cuantificar los niveles de este contaminante (SiteLAB, 2008). También se hizo el análisis cualitativo para determinar el tipo de hidrocarburos presentes a partir de la extracción con n-hexano (grado C.G.), concentrando y purificando el extracto orgánico en columna de florisil, según norma UNE-EN ISO 9377-2 y por último las muestras fueron analizadas por la técnica de cromatografía de gases con detector másico (CG-MS) EPA 2870. El límite de cuantificación del equipo utilizado fue de <0,5 mgL⁻¹.

Los puntos 1, 2 y 4 mostraron valores superiores a la norma de referencia señalada anteriormente, procedente de E.U.A. Estado de Massachusetts, del año 2000. La norma cubana NC-1021 (2014) no contempla valores de hidrocarburos entre los posibles contaminantes de las aguas de consumo humano, ya que al parecer han sido considerados regulando el valor de 0,3 mgL⁻¹ como el límite máximo de concentración para grasas y aceites, pero no siempre debe considerarse de esta forma porque los contaminantes más peligrosos pueden ser los compuestos derivados de los hidrocarburos aromáticos del petróleo.

Este Laboratorio de Química Ambiental del CEINPET concluye como bien se observa en la tabla que el más preocupante es el punto de la Obra de Toma con un valor de 0,26 mgL⁻¹, ya que este es el lugar de entrega de agua del embalse para los diferentes usos.

Tabla 6. Resultados de las muestras para la determinación de hidrocarburos aromáticos (HTP).

| Puntos | Descripción de las Muestras en el embalse Maurín | Código Lab | HTP (Aromáticos) | |
|--------------------------------|--|------------|------------------|---------|
| | | | Detección | Lectura |
| 1 | Frente al aliviadero (superficie) | 594 | < 0,5 | 0,23 |
| | Frente al aliviadero (0,30 m) | 593 | < 0,5 | 0,19 |
| 2 | Frente a la Obra de Toma (superficie) | 595 | < 0,5 | 0,18 |
| | Frente a la Obra de Toma (0,80 m) | 596 | < 0,5 | 0,26 |
| 3 | Frente a la Obra de Toma (superficie) | 597 | < 0,5 | 0,19 |
| | Frente a la Obra de Toma (0,80 m) | 598 | < 0,5 | 0,18 |
| 4 | Cola del rio Santa Ana (superficie). | 599 | < 0,5 | 0,26 |
| | Cola del rio Santa Ana (1,0 m). | 600 | < 0,5 | 0,21 |
| Norma de Referencia ORSG, 2000 | | | 0,20 | |

Profundidad de Mezcla

En el análisis de la profundidad de la mezcla, es fundamental el criterio debido a que gracias a este valor calculado es posible estimar y determinar cuándo y en qué periodo el embalse se encuentra o no, mezclado y/o estratificado.

Para esto fue calculado el Fetch definido por: *la distancia sobre la cual el viento puede actuar sobre un cuerpo de agua, o sea, es la distancia normal desde la ribera de barlovento hacia la estructura diseñada* (BR, 1988), en el embalse Maurín con un resultado equivalente a 1,987 km y aplicando la ecuación de Lewis (2011) se obtuvo que se desarrolla una mezcla de las aguas equivalente a **6,062854 m**.

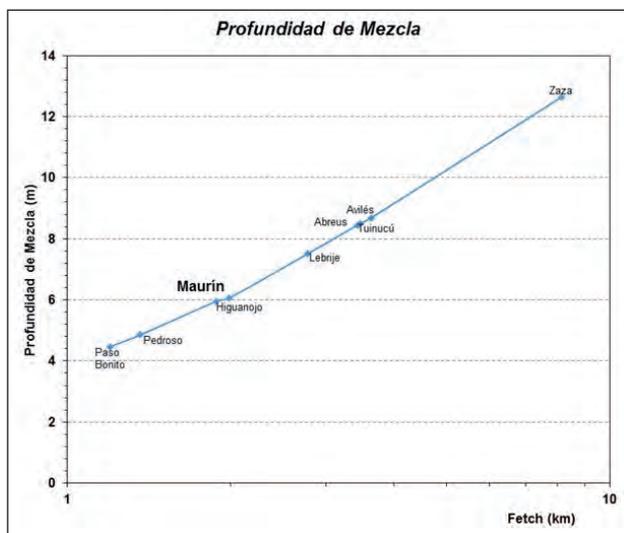


Figura 7.- Relación existente entre el Fetch (km) y la profundidad de mezcla (m) de varios embalses cubanos entre ellos Maurín.

En la Figura 7 se muestran un grupo de embalses de las regiones central y occidental con diferentes profundidades máximas que han sido valorados junto con el embalse Maurín, objeto de estudio en esta caracterización con diferentes Fetch (km) y por

tanto diferentes profundidades de mezcla de sus aguas.

El espesor de la capa de mezcla es directamente proporcional al fetch, el cual es conocido como: la distancia en la cual el viento está soplando sobre una superficie de agua abierta, facilitando la mezcla de sus aguas con el oxígeno atmosférico.

Cuando el espesor de la capa de mezcla esperada es menos de la mitad de la profundidad máxima de un lago, debe producirse la estratificación estable, si el lago no es un embalse. Para un embalse, sin embargo, hay una consideración adicional. Debido al retiro de agua del fondo que es típico para la mayoría de los embalses, el agua más fresca (de menor temperatura) se perderá. Si una cantidad grande de agua fresca se pierde, el lago puede volverse polimíctico aunque parezca bastante profundo para estratificarse (Lewis, 2011).

Esto reafirma la característica polimíctica del ecosistema además, de lo señalado con anterioridad con respecto al régimen térmico de sus aguas en la columna de agua y los niveles de oxígeno disuelto presente en sus aguas.

5. CONCLUSIONES

1. Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) o Sales Solubles Totales (SST) se encuentran dentro de los valores normados por la NC-1021 (2014). Se hallan por debajo de los valores normados como máximos admisibles.
2. Las aguas del embalse se clasifican como bicarbonatadas-cálcicas con buenas posibilidades para su utilización en el abasto a población.
3. El nivel de nutrientes, considerando los nitratos fundamentalmente se encuentran por debajo de lo normado 45 mgL^{-1} , ya que los valores obtenidos son menores que 1 mgL^{-1} .
4. La materia orgánica representada por los niveles de DQO y DBO hace factible el uso de las aguas para la potabilización.

5. Los Coliformes Termotolerantes presentan valores muy bajos y pueden eliminarse con cloración sin afectaciones para la salud.
6. Los niveles de turbiedad determinados en las aguas del embalse permiten evaluar que estas aguas con valores ≤ 4 , cumplen con la NC-1021 (2014) cuyo valor límite para esta medición es de 5 UNT.
7. Los análisis realizados *in situ* mediante el equipo multi-paramétrico TOA-DKK, Modelo WQC-24, posibilitaron evaluar el carácter polimíctico de las aguas embalsadas, por la inestabilidad de la estratificación debido a las profundidades máximas alcanzadas, que no superan los 12 m y la mezcla periódica por lo que su polimixia es evidente.
8. La característica trófica del embalse es indudablemente mesotrófica, debido a la presencia de vegetación acuática superior, en este caso flotante como la *Eichornia crassipes*, lo cual evidencia una concentración de nitrógeno superior al determinado por los límites actuales de detección del laboratorio, así como las mediciones de transparencia realizadas por el Disco Secchi, las que superan el metro y se balancean entre 1,05 y 1,25 m, lo que indica que debe existir una biomasa de fitoplancton relativamente alta.
9. Los metales pesados se encuentran entre los valores normados por la NC-1021 (2014) excepto para el plomo (Pb) cuyas concentraciones se aproximan al máximo valor admisible de la referida norma, el resto de los metales aparentemente no presentan dificultades excepto para el cadmio (Cd) el cual posee un límite de detección superior al normado $< 0,008$ y sin embargo el valor máximo admisible para esta norma es 0,005.
10. La medición de hidrocarburos realizado por el CEINPET en su Laboratorio de Química Ambiental, resaltó que tenemos presencia de hidrocarburos totales del petróleo (HTP-aromáticos), al menos en tres de los puntos monitoreados al efecto, y es principalmente preocupante el valor de $0,26 \text{ mgL}^{-1}$ en la Obra de Toma, ya que este será el sitio de entrega del embalse para cualquier uso previsto o no.
11. Con la presencia de HTP (aromáticos) en las aguas es importante realizar al menos un tratamiento primario, consistente en una caída libre del agua antes de iniciar el proceso de potabilización, garantizando de esta forma la oxigenación del agua y la oxidación posterior de elementos como estos hidrocarburos, para evitar que la presencia de estos compuestos afecten la calidad del agua una vez tratada.
12. La profundidad de mezcla es aproximadamente los 6,0 m lo que ratifica la polimixia del ecosistema acuático, por lo que la mezcla es prácticamente constante o la estratificación es inestable.
13. Después de analizar e integrar los diferentes aspectos involucrados en el estudio realizado, se obtuvo como conclusión general, que estas aguas pueden utilizarse para el consumo humano, ya que cumplen con la mayoría de los aspectos de la Norma Cubana 1021 (2014) teniendo en consideración las recomendaciones descritas a continuación, las que coadyuvarían a garantizar la calidad de las aguas.

6. RECOMENDACIONES

- a. Analizadas las conclusiones y considerando el objetivo de este estudio, podemos sugerir que las aguas de este embalse se utilicen en lo adelante para el consumo humano, no sin antes establecer los diferentes controles sugeridos a continuación.
- b. La aireación es una de las medidas a ejecutar, con el objetivo de beneficiar la calidad del agua del embalse Maurín, sobre todo en el proceso inicial de captación del agua, como parte del tratamiento para su potabilización, lo cual facilitará la precipitación de compuestos producto de la oxidación.
- c. Es necesario mantener vigilancia en la presencia de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en las aguas del embalse Maurín, debido a su inestabilidad con los resultados obtenidos.
- d. Es muy importante que se continúe trabajando en las actividades pesqueras de las especies que hoy habitan las aguas embalsadas, pero que se norme o prohíba la utilización de motores fuera de borda o fijos de diesel, como el utilizado en bote del monitoreo, con el fin de evitar derramamientos futuros de combustibles en el agua, ni en la orillas de la zona que hoy ocupan las edificaciones de la Acuicultura, para de esta forma garantizar la calidad del agua.
- e. La actividad acuícola de cultivo extensivo y su captura posterior con artes de pesca, deberá realizarse evitando derramar materias orgánicas en las orillas de las instalaciones de la Pesca ni combustibles y/o grasas.
- f. La actividad acuícola de cultivo intensivo, estará prohibida en absoluto, debido a que la profundidad media y máxima del embalse, no facilitan la asimilación de los desechos de alimentos que se emplean para el crecimiento de las especies y tampoco de los residuos evacuados por los peces en su conjunto, todo lo cual afectará considerablemente la calidad del agua y por ende aumentará el costo de su potabilización y entrega para el consumo.
- g. Es conveniente comenzar con el control de las vaquerías que se encuentran en los alrededores del embalse, debido a sus aportes de materia

orgánica hacia el vaso del embalse tanto en periodo lluviosos por arrastres y/o escurrimientos o por vertimientos indiscriminados como en época de sequía.

- h. Unido a todo el estudio realizado es recomendable, que se continúen los monitoreos de estas aguas por un periodo de un año de forma trimestral, para completar el resultado que en este trabajo se ha obtenido y que permite comenzar con las obras y acciones para la potabilización de las aguas y su entrega para el consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

- Ardila A., Alba N. 2014. Degradación foto catalítica de materia orgánica no biodegradable presente en efluentes de la industria farmacéutica. Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. 5 p.
- APHA, (AWWA, WPCF), Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Edition. Biological Examination of Water, 1998.
- Aziz J., Tebbutt T. Water Res., 14, 319-324, (1980).
- Fagundo, J.R. y González, P. 2005. Hidrogeoquímica. En 8vo Curso Internacional de Agua Subterránea y Medio Ambiente, ISPJAE, INRH, 314 pp.
- Fagundo, J.R. 1996. Química del agua karstica. EN: Hidroquímica del Karst Edit: J.R.Fagundo, J.E. Rodríguez y J.J. Valdés. Universidad de Granada. Pag. 13124,
- Fagundo, J.R. and P. González, 1999. Agricultural use and water quality at karstic best in Cuban southern plain. IN: Karst and agriculture in the world. International Journal of Speleology (Italy) 28B (1/4): 175-185,
- IGP (MEM), 2013. Léxico estratigráfico de Cuba. Servicio Geológico de Cuba, Ministerio de Energía y Minas. 3ra Versión. ISBN: 978-959-7117-58-2. 459pp.
- Kenbi | Laboratorios INTEMAN S.A. 2015. Relación entre la DQO y la DBO. http://kenbi.eu/kenbipedia_3.php?seccion=kenbipedia&capitulo=3# 13/11/15.
- Krienitz, L. and Kotut, K., Biodiversity of selected model groups of the phytoplankton in standing inland waters of Kenya. [Consultada 25/05/2006], <http://www.rsnz.govt.nz/index.php> y <http://www.jcu.edu.au/school/tbiol/Botany/staff/hk.htm> ., 2001.
- Lewis, W. 1983. A revised classification of lakes based on Mixing. Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 40 : 1779-1787.
- Lewis, W. 1984. A five year record of temperature, mixing, and stability for a tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). Arch. Hydrobiol Vol 99: 3: 340-346
- Lewis, W. 2011. Global primary production of lakes: 19th Baldi Memorial Lecture. *Inland Waters* (2011) 1, pp. 1-28.
- NC 1021. 2014. Higiene Comunal - Fuentes de abastecimiento de agua - Calidad y protección sanitaria. Communal hygiene - Water supply sources - Quality and sanitary protection. ONN (Oficina Nacional de Normalización) 14 pp
- ORSG, 2000. Massachusetts Drinking water Guidelines. Spring. Guía de la Oficina de Investigación y Estándar.
- Shiralipour, A., L.A. Garrard & W.T. Haller. 1981. Nitrogen source, Biomass Production and Phosphorus Uptake in Waterhyacinth. J Aquat Plant Manage., 19: 40-43.
- Tinnberg, L., 1978. Changes in succession rate in a natural phytoplankton community following nutrient enrichment. Mitt Internat Verein Limnol 21: 593-599,
- WHO. 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Ed. Vol 1. Recommendations. Geneva: WHO.

MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL DE LOS DESBORDE EL CHAÑARAL Y LA GARRAPATA DEL RÍO PILCOMAYO

TWO-DIMENSIONAL MODELING OF PILCOMAYO RIVER EL CHAÑARAL AND LA GARRAPATA OVERFLOWS

Testa Tacchino, Alejo J. S^{1,2,3,4}; Gyssels, Paolo^{2,3}; Corral, Mariano^{2,3}; Pagot Mariana^{2,3}; Vargas, Constanza^{2,3,4,5}; Farías, Héctor D.⁶; Rodríguez, Andrés^{1,2,3}

Resumen

Este trabajo pretende obtener los caudales de desborde de El Chañaral y La Garrapata del Río Pilcomayo. Para lograr este objetivo se realizó una modelación numérica bidimensional permanente a fondo fijo y sin transporte de sedimentos de la hidráulica del tramo. La zona de estudio se localiza en la zona que se conoce como Pilcomayo Superior, parte de la cuenca baja del río Pilcomayo, 13 km al noroeste de la localidad Santa Victoria en la provincia de Salta Argentina.

Para realizar la modelación se han analizado imágenes satelitales, hidrogramas, aforos durante crecidas, topografías e imágenes de radar SRTM.

En una primera etapa se analizó la topografía e imágenes SRTM para elaborar el modelo digital del terreno, posteriormente se seleccionaron las condiciones de contorno del modelo con la ayuda de imágenes satelitales y series hidrométricas, y finalmente se evaluaron los resultados de las simulaciones numéricas para determinar los caudales que desbordan y los que continúan aguas abajo por el Río Pilcomayo.

Con los resultados del modelo se pudo obtener una aproximación de los caudales que activan los desbordes y los caudales desbordados.

Palabras claves: Río Pilcomayo, Modelación hidráulica bidimensional, Desbordes.

Abstract

This work aims to obtain the flow rates of El Chañaral and La Garrapata overflows of the Pilcomayo River.

This article presents a stationary two-dimensional model with fixed bed and no sediment transport in the overflow reach of El Chañaral and La Garrapata, located in the Upper Pilcomayo, part of the lower basin of the Pilcomayo River, in order to approximate the flow that activates the overflows.

To achieve the proposed objective it has been analyzed satellite imagery, hydrographs, gauging during floods, topographies and SRTM radar images.

In a first stage the topography and images SRTM were analyzed to develop the digital terrain model, then the boundary conditions model were selected with the help of satellite images and hydrometric series, and finally the results are evaluated to determine flow rates that overflows as well as those which continue downstream in the Pilcomayo River. Subsequently the results of the modeling are superimposed on satellite images available for the studied flows.

It could be determined with this information an approximation to the flows that activate the overflows and those that overflows.

The result obtained showed a good agreement with previous work.

Key words: Pilcomayo River, Two-dimensional hydraulic modeling, Overflow.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Pilcomayo abarca una superficie de 288.360 km² y es una de las mayores subcuencas de la gran cuenca del Plata. Su cuenca se divide en dos, la cuenca alta de montaña con cota hasta 5700 m sobre el nivel del mar (m s. n. m.) y una longitud de 500 km, y la cuenca baja de llanura con cota desde 400 m s. n. m. hasta 50 m s. n. m y con una longitud de 785 km.

El Río Pilcomayo es un río trinacional con sus nacientes en Bolivia y que luego recorre como límite entre los países Argentina y Paraguay. El Río Pilcomayo desborda todos los años como consecuencia de las crecidas, cuyo caudal supera la capacidad de encauzamiento del río. Los desbordes ocurren aguas abajo de Villamontes, Bolivia (VM)

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IDIT-CONICET,UNC)

² Laboratorio de Hidráulica (L.H.), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYn), Universidad Nacional de Córdoba (UNC)

³ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), FCEfYn, UNC

⁴ Instituto Superior de Estudios Ambientales, (ISEA), UNC

⁵ Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT), UNC

⁶ Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT UNSE

cuando el río entra en su cuenca baja, en lo que se ha denominado Pilcomayo Superior. En particular, los desbordes El Chañaral y La Garrapata desbordan hacia lado argentino en la provincia de Salta.

Las aguas de desbordes son importantes para la alimentación de bañados, recarga de acuíferos y el sector agropecuario, pero perjudiciales para las poblaciones que sufren inundaciones con las consecuentes pérdidas materiales, aislamiento, debido a la rotura de infraestructura vial, o anegamiento de los ingresos además de la pérdida de terreno para cultivo por enlame, encharcamiento y erosión de barrancas.

En el Río Pilcomayo las inundaciones o desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. El tramo de río dónde desborda El Chañaral y La Garrapata posee un cauce de tipo "colgado", sus llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes, estos desbordes tienen el comportamiento de surcos de derrame digitado (como dedos de una mano) normalmente asociados a roturas de albardones (Cafaro y Ramonell, 2007). Al sobrepasarse el nivel de las márgenes durante las crecidas, el agua escurre por la llanura de inundación con velocidades bajas, al retirarse el agua, ya sea porque regresa al río, sigue su camino aguas abajo o después de unas semanas se infiltra y evapora, quedando depositado sobre el suelo sedimento muy fino, a este proceso se lo conoce como enlame. El enlame trae como consecuencias la elevación de la cota de llanura de inundación.

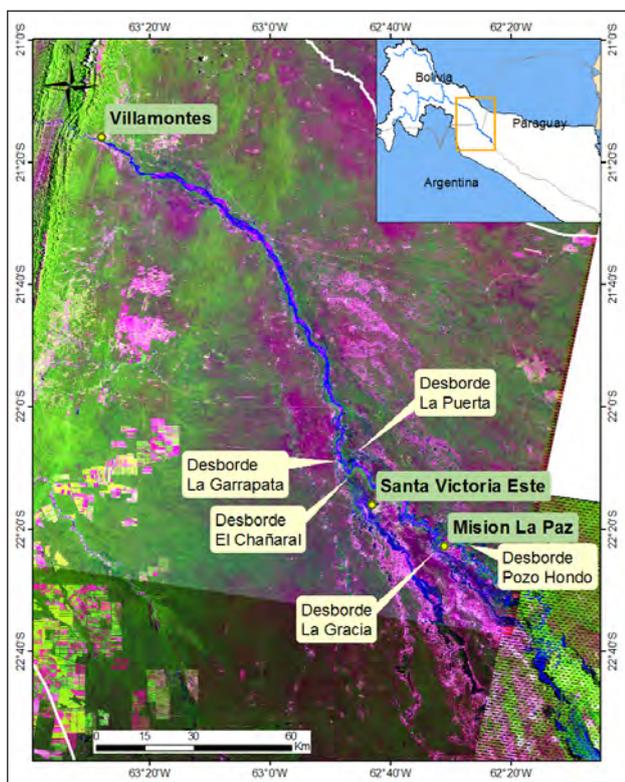


Figura 1.- Localización de desbordes entre Villamontes y Misión La Paz (Img. Landsat 1/2/2008 Bandas:5-4-3).

Para el estudio de los caudales que arriban a La Garrapata y el Chañaral se poseen los datos de la estación de aforo de Villamontes (Tarija, Bolivia), 138 km aguas arriba del Chañaral y para los caudales que continúan se encuentra la estación de aforos de Misión La Paz (Salta, Argentina), 51,2 km aguas abajo. En el tramo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz ocurren cinco desbordes principales: La Puerta y Pozo Hondo, que desbordan hacia Paraguay y La Garrapata, El Chañaral y La Gracia, que desbordan hacia Argentina (Figura 1).

El Río Pilcomayo presenta numerosas particularidades que obligan el estudio de una posible avulsión (cambio repentino del cauce), entre ellas encontramos el retroceso de su cauce, la elevada cantidad de desbordes, la alta tasa de transporte de sedimentos y material vegetado, las bajas pendientes en la cuenca baja, el cauce colgado. El Chañaral es uno de estos puntos críticos con posibilidad de avulsión. Actualmente no se cuenta con mediciones de caudales de desborde en El Chañaral, debido a la imposibilidad de acceder durante crecidas.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS DESBORDES EN ESTUDIO

El desborde denominado el Chañaral es el más importante en magnitud del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia Argentina. Está localizado aproximadamente a los 22° 10' de Latitud Sur y 62° 47' de Longitud Oeste sobre margen derecha del río, en la provincia de Salta, República Argentina. Una vez activado predomina el sentido longitudinal en dirección N-SE. Es un desborde cuyas aguas no vuelven al cauce del Río Pilcomayo (Testa Tacchino, 2015). Este desborde rodea la ciudad de Santa Victoria, que cuenta con un anillo de defensa. Otras poblaciones afectadas por este desborde son: Pozo El Tigre, La Ovejera, Monte Cristo, Chañares Altos, Amberes y Campo Largo.

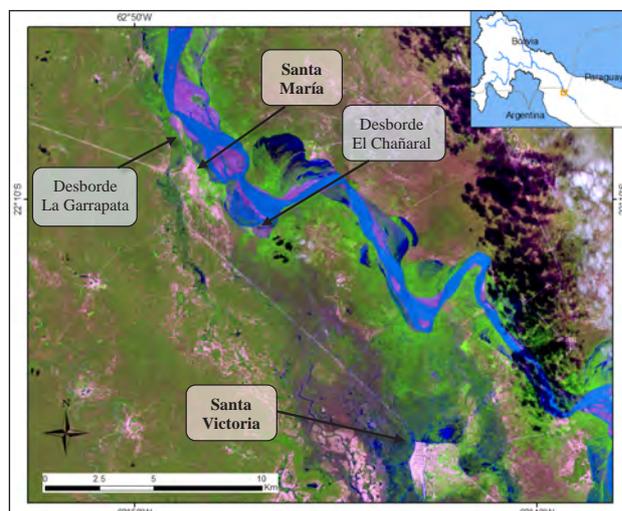


Figura 2.- Desbordes La Garrapata y El Chañaral. (Img. Landsat 5/2/2014 Bandas: 5-4-3).

El Chañaral es el primero en activarse de los desbordamientos principales que se localizan aguas arriba de Misión La Paz. Este desborde se activa para caudales de 2700 m³/s en Villamontes, que equivale a una lectura de escala de 4,40 m en esta estación (Testa Tacchino, 2015).

El desborde La Garrapata, está localizado 6 km aguas arriba del desborde El Chañaral y afecta a la localidad de Santa María, la cual actualmente posee terraplenes de defensa que desvían el desborde hacia el oeste. El desborde la Garrapata se activa para caudales mayores que los que activan El Chañaral y posee dirección preponderante N-S. Parte de las aguas que desbordan en La Garrapata se unirían a las de El Chañaral. La Figura 2 presenta la localización de los desbordamientos en estudio.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la obtención de un modelo hidráulico bidimensional a fondo fijo y con régimen permanente para el análisis de los desbordamientos La Garrapata y El Chañaral que permita estimar los caudales que activan los desbordamientos así como los caudales que abandonan el río.

4. METODOLOGÍA

El Río Pilcomayo es un sistema fluvial de régimen muy variable y no regulado, con una de las tasas de transporte de sedimentos en suspensión más altas del mundo con 125 millones Tn/año (Dirección Ejecutiva, 2014). Al salir de su tramo de montaña cercano a la ciudad boliviana de Villamontes, el río se caracteriza por altas tasas de sedimentación que aumentan hacia aguas abajo. Este trabajo se plantea como una primera fase en el cálculo de caudales de desbordamientos del tramo y no contempla los efectos de sedimentación/erosión, ni transporte de sedimentos, que se irán incorporando en trabajos posteriores.

Para la determinación de caudales que activan los desbordamientos se utilizaron dos metodologías diferentes: por un lado se recopilaron imágenes satelitales del período entre 2009 y 2015 y a partir de hidrogramas de crecida de Villamontes se pudieron relacionar caudales estacionarios con las manchas de desborde; por otro lado se realizó un análisis hidrológico de probabilidad de excedencia, analizando caudales en Villamontes y Misión la Paz de los más de 40 años de registro determinando diferencias de caudales por percentiles.

El modelo hidráulico bidimensional se realizó con el Software Delft-3D (Deltares, 2010). Se utilizó como modelo digital de terreno datos obtenidos de imágenes SRTM (USGS, 2014) que han sido mejorados incorporando modificaciones en la topografía, como la inclusión de terraplenes que en el momento del levantamiento no existían y la profundización del cauce donde escurre el agua y donde el SRTM no puede detectar la batimetría.

El coeficiente de rugosidad de Manning se obtuvo de la modelación hidráulica unidimensional del tramo Villamontes – Misión La Paz presentada en Testa Tacchino (2015). El valor del n de Manning utilizado fue de 0,032 (m^{1/3}/s). El ancho del lecho y terrazas se obtuvo a partir de imágenes satelitales, contrastada con el modelo digital de terreno de SRTM y la cota de fondo a partir del modelo hidráulico unidimensional, considerando la pendiente media de un tramo de río que incluye la zona de estudio de este trabajo. La llanura de inundación se obtuvo a partir de los archivos SRTM y se incorporaron las defensas y rutas a partir de información topográfica.

Las cotas de desbordamientos se definieron a partir del modelo digital del terreno. Para determinar las condiciones de borde aguas abajo y así calibrar el modelo bidimensional se utilizaron: a) las manchas de desbordamientos obtenidas a partir de imágenes satelitales b) los datos de caudales correspondientes a imágenes satelitales de desborde incipiente y desborde activo, c) los hidrogramas de Villamontes.

5. MODELO DIGITAL DEL TERRENO

La Figura 3 presenta el modelo digital de terreno obtenido a partir de la integración de información de SRTM, topografía e imágenes Landsat. En la imagen ha sido necesario añadir las defensas de Santa María y corregir la topografía en el cauce debido a que el SRTM no detecta la cota de fondo por debajo del agua. Se adoptó una resolución de malla numérica es de 30 m x 30 m consistente con la resolución de la información satelital y de radar disponible (Figura 4).

Como condiciones de borde se adoptó un caudal de ingreso en la sección aguas arriba, identificado como Q_{ingreso} en la Figura 4 y dos condiciones de borde aguas abajo, que consisten en los niveles de la superficie de agua en las secciones aguas abajo de los desbordamientos y aguas abajo del tramo de río, identificados como H_{Desborde} y H_{Cauce} en la Figura 4. Las condiciones de borde adoptadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de borde. Niveles de agua en las secciones aguas abajo (η_{out} , aguas abajo en el cauce, η_{desb} , aguas abajo en la zona de desbordamientos) para diferentes caudales de ingreso al tramo (Q_{in}).

| Condiciones de borde | | | |
|----------------------|-----|------------------|-------|
| $\eta_{out}(+)$ | | $\eta_{desb}(-)$ | |
| Q _{in} | h | Q _{in} | h |
| 0 | 270 | 0 | 270 |
| 400 | 272 | 100 | 270.5 |
| 1000 | 274 | 300 | 271 |
| 2000 | 276 | 1000 | 272 |
| 3800 | 278 | 2000 | 273 |
| | | 3800 | 275 |

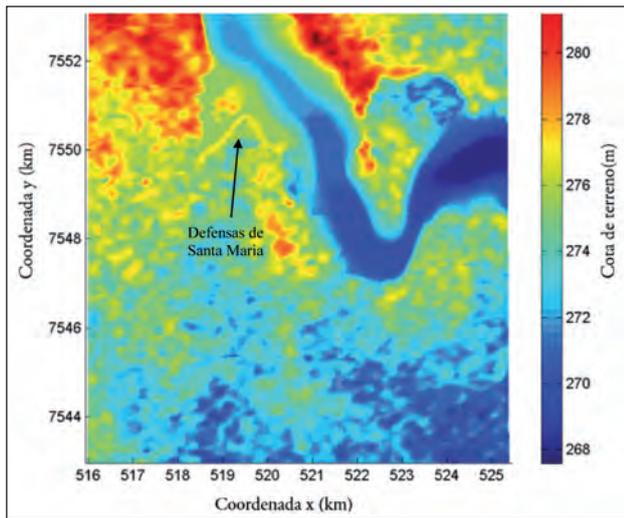


Figura 3.- Modelo digital de terreno de la zona de Estudio

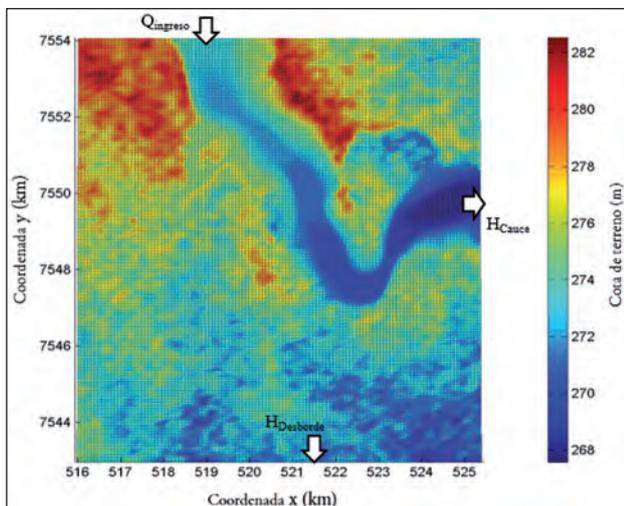


Figura 4.- Malla de cálculo con interpolación del MDT en zona de estudio y condiciones de borde.

6. ESCENARIOS MODELADOS Y RESULTADOS

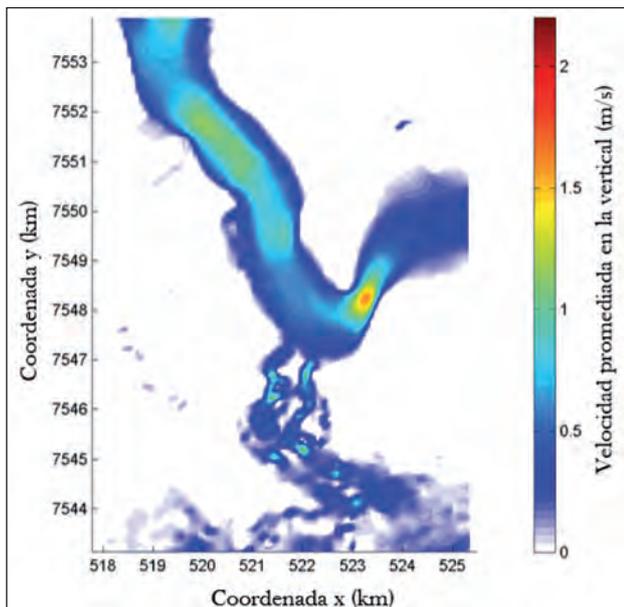


Figura 5.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=2500\text{m}^3/\text{s}$.

Con el modelo digital de terreno y la malla definidos, se procedió a realizar las corridas del modelo. Se ensayaron caudales de diferente magnitud, con el objetivo de ver que caudales activan los desbordes de La Garrapata y El Chañaral, así como para ver las velocidades del desborde a medida que aumenta el caudal evacuado. En este trabajo se presentan los resultados para caudales de $2500\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 5), $3000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 6), $3500\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 7), $4000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 8) y $5000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 9).

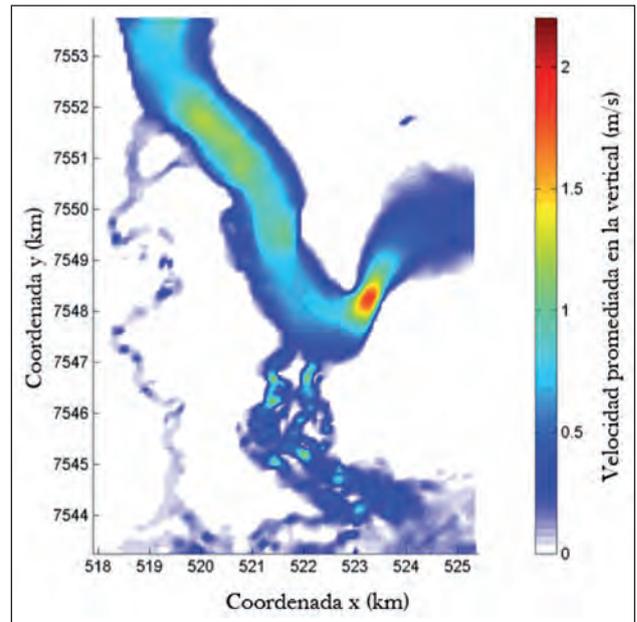


Figura 6.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3000\text{ m}^3/\text{s}$.

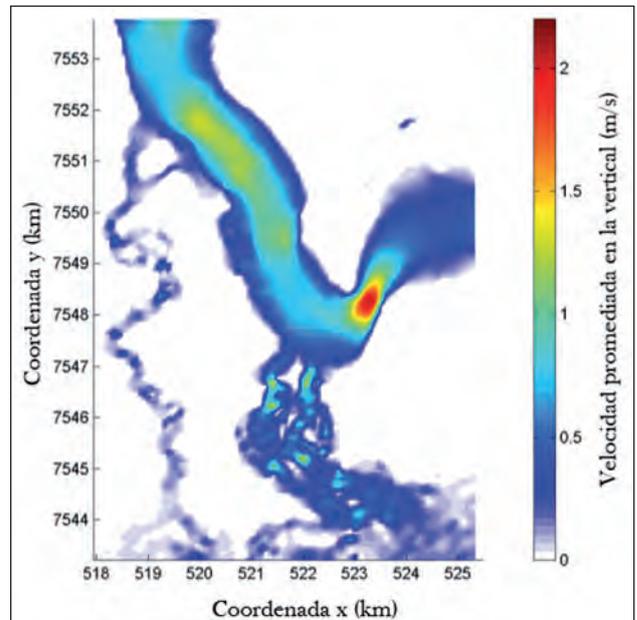


Figura 7.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3500\text{ m}^3/\text{s}$.

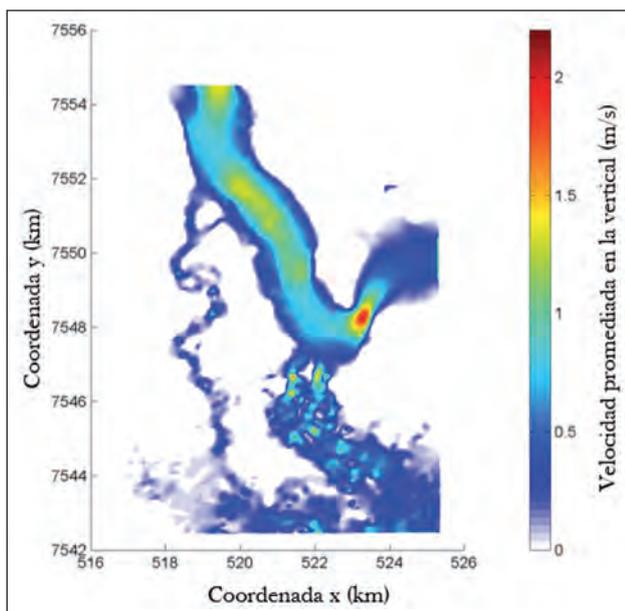


Figura 8.- Velocidad promediada en la vertical $Q=4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

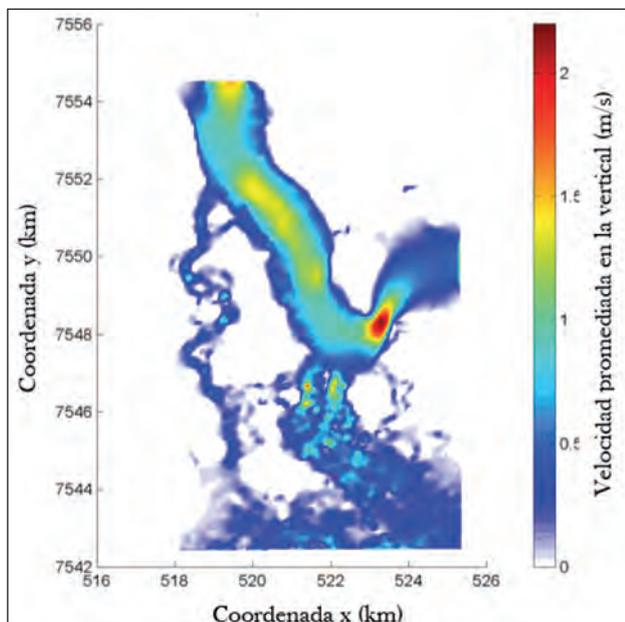


Figura 9.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se observa al comparar las figuras, que el desborde El Chañaral se activa antes que el desborde La Garrapata. Para un caudal de ingreso de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ El Chañaral se encuentra activo con velocidades de $0,50 \text{ m/s}$, mientras que La Garrapata se activa incipientemente para caudales de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que El Chañaral desborda en dos brazos que luego se unen, cuyas velocidades de desborde van aumentando a medida aumentan los caudales, desde una velocidad de aproximadamente $0,50 \text{ m/s}$ para el primer caso simulado y hasta el orden de 1 m/s para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el desborde La Garrapata, se observan velocidades del orden de $0,10 \text{ m/s}$ para los $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando hasta $0,60 \text{ m/s}$ para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

7. IMÁGENES SATELITALES

Se han recolectado imágenes Landsat 5 y Landsat 7 disponibles en fechas cercanas a crecidas importantes del Río Pilcomayo, de acuerdo a caudales obtenidos en las estaciones de las ciudades Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP). Las imágenes fueron obtenidas del USGS (2014) para el periodo comprendido entre los años 1982 y 2014. Se obtuvieron imágenes en falso color y se seleccionaron aquellas en las cuales se observaban manchas de agua en zonas que ya han sido determinadas como de posibles desbordes en trabajos previos.

Una vez seleccionadas las imágenes se procedió a la interpretación, identificando así los contornos de los espejos de agua para posteriormente calcular sus áreas y longitud máxima. Se obtuvieron 14 imágenes en total para los años 1995, 2005, 2006, 200, 2013 y 2014.

La combinación de bandas seleccionada fue 5-4-3, infrarrojo medio (Banda 5), infrarrojo cercano (Banda 4) y rojo (Banda 3), que nos brinda información para delimitar agua continental y resalta ciertos detalles que no se observan en las bandas de espectros visibles. Mientras más bandas infrarrojas utilizemos, con mayor precisión podremos ubicar lagos y ríos y en este caso particular las manchas de inundación. En esta combinación la vegetación se observa verde, permite ver diferencias de humedad y en general mientras más húmedo el suelo más oscuro aparece como consecuencia de la absorción infrarroja.

Se disponía de datos hidrométricos históricos, serie de caudales medios diarios en dos estaciones: Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP) para los periodos en estudio. De acuerdo a la fecha de la imagen se obtuvieron el caudal medio del día de la imagen y el del día del pico de la crecida; los datos son proporcionados por la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina.

El satélite Landsat, como consecuencia de las características de los sensores pasivos que posee, no permite obtener imágenes los días nublados, debido a que no las puede atravesar, situación que limita el número de imágenes de calidad, ya que, obviamente, en general cuando hay crecida está lloviendo y hay nubes.

En los casos en que se dispone de más de una imagen satelital para una misma crecida o mancha de inundación por desborde, se realiza un estudio considerando la evolución en el tiempo de las superficies inundadas con el objeto de estimar tiempos de permanencia y evacuación de agua (Testa Tacchino, 2015).

La Tabla 2 presenta un resumen de los datos obtenidos y calculados para el análisis y calibración del modelo bidimensional. Se resaltan en verde los referidos a los datos hidrométricos correspondientes a las fechas próximas a las imágenes satelitales que se utilizaron para contrastar las manchas de desbordes.

Tabla 2. Caudales pico del hidrograma de crecida (Qp VM y Qp MLP) y caudales en la fecha de la imagen (Q VM y Q MLP); Longitud y áreas de las zonas inundadas por El desborde El Chañaral calculadas a partir de las imágenes; tiempo entre picos de hidrogramas (ΔT pico) y tiempo entre pico en MLP y la captura de la imagen (ΔT foto y pico) (Testa Tacchino 2015).

| Imagen aaaaadd | Fecha dd/mm/yy | Fecha Pico VM | Qp m ³ /s | Fecha del Pico MLP | Qp MLP m ³ /s | Q VM m ³ /s | QMLP m ³ /s | ΔT pico días | ΔT foto y pico días | Longitud Km | Área Km ² |
|-------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------|
| 1999107 | 17/04/1999 | 22/03/1999 | 5609 | 24/03/1999 | 2079 | 532 | 337 | 2 | 24 | 61.37 | 178.68 |
| 2005051 | 20/02/2005 | 15/02/2005 | 5335 | 16/02/2005 | 2973 | 539 | 743 | 1 | 4 | 19.59 | 32.10 |
| 2006030 | 30/01/2006 | 23/01/2006 | 5321 | 24/01/2006 | 2539 | 850 | 955 | 1 | 6 | 21.53 | 36.51 |
| 2006038 | 07/02/2006 | | | | | 559 | 527 | | 14 | | |
| 2006046 | 15/02/2006 | 13/02/2006 | 2743 | 15/02/2006 | 2445 | 1161 | 2445 | 2 | 0 | 20.89 | 59.67 |
| 2006054 | 23/02/2006 | 13/02/2006 | 2743 | 15/02/2006 | 2445 | 348 | 474 | | 16 | 52.39 | 122.65 |
| 2008036 | 05/02/2008 | 26/01/2008 | 4402 | 28/01/2008 | 2867 | 771 | 929 | 2 | 8 | 61.00 | 158.74 |
| 2008044 | 13/02/2008 | | | | | 393 | 472 | | 16 | 52.39 | 122.65 |
| 2008060 | 29/02/2008 | 28/02/2008 | 2037 | 29/02/2008 | 2299 | 1076 | 2299 | | 0 | 52.06 | 107.35 |
| 2008076 | 16/03/2008 | 11/03/2008 | 2297 | 13/03/2008 | 2422 | 904 | 1298 | 2 | 3 | 75.98 | 272.63 |
| 2009062 | 03/02/2009 | 05/03/2009 | 2680 | | 2300 | | | | 0 | | |
| 2013025 | 25/01/2013 | 18/01/2013 | 3860 | 23/01/2013 | 2446 | 964 | 573 | 5 | 2 | 42.38 | 135.00 |
| 2014036 | 05/02/2014 | 01/02/2014 | 3071 | 03/02/2014 | 2137 | 1035 | 1336 | 2 | 2 | 47.71 | 115.78 |
| 2014037 | 06/02/2014 | | | | | 867 | 797 | | | 49.81 | 122.22 |

8. OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DESBORDE

La Figura 10 presenta las secciones para las cuales se han calculado los caudales en el modelo. Se estudiaron cuatro secciones que corresponden a: el caudal de ingreso (Q_{ingreso}), que se toma coincidente con la condición de borde aguas arriba, Q_G que representa el caudal del desborde La Garrapata, Q_C que es caudal desbordado por El Chañaral y Q_{AAb} que es el caudal en el cauce del río aguas abajo de los desbordes. La Figura 11 presenta la distribución de caudales, a partir del caudal de ingreso se obtiene el que desborda por El Chañaral, por la Garrapata y cuánto continúa aguas abajo por el cauce del río, estos resultados se encuentran tabulados en la Tabla 3.

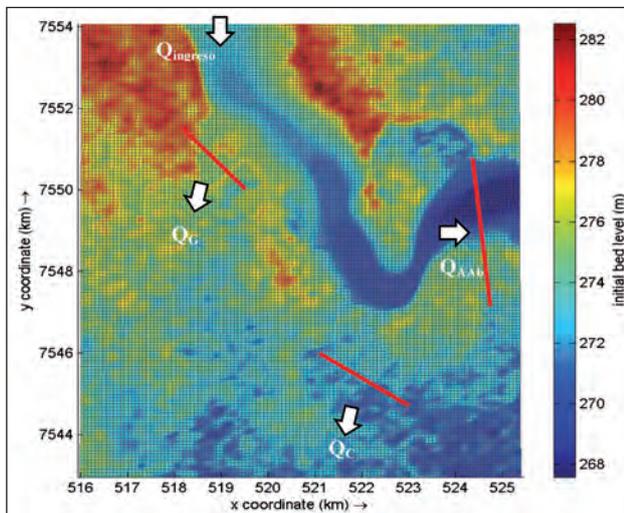


Figura 10.- Secciones de cálculo de caudales.

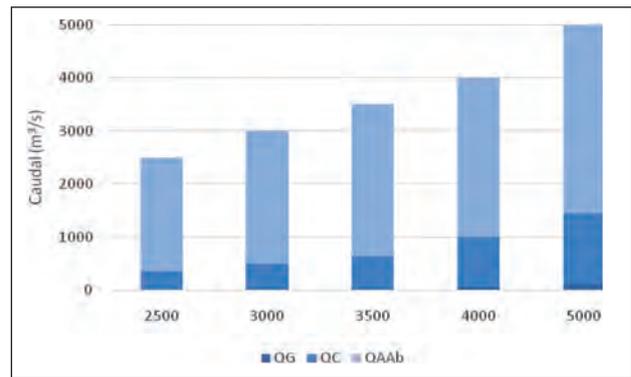


Figura 11.- Distribución de caudales según caudal de ingreso.

Tabla 3. Caudales calculados para los desbordes y aguas abajo, en el cauce (m³/s).

| | Caudales (m ³ /s) | | | | |
|--------------------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 5000 |
| Q_{INGRESO} | | | | | |
| $Q_{\text{GARRAPATA}}$ | 4 | 12 | 23 | 41 | 118 |
| $Q_{\text{CHAÑARAL}}$ | 352 | 477 | 609 | 964 | 1332 |
| $Q_{\text{AGUAS ABAJO}}$ | 2144 | 2511 | 2868 | 2995 | 3550 |

La Figura 12 presenta los caudales en las secciones de condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de los desbordes La Garrapata y El Chañaral. Para comprender la figura hay que tener en cuenta que los caudales aforados se miden en las estaciones de Villamontes y Misión la Paz, mientras que los calculados se obtienen en las secciones delimitadas anteriormente. Es necesario remarcar que los caudales medidos en Villamontes (138 km aguas arriba de El

Chañaral), al arribar a la sección modelada 50 km aguas arriba de MLP disminuyen como consecuencia del tránsito en el cauce y que en el tramo comprendido entre aguas abajo de El Chañaral y Misión la Paz ocurren desbordes (Figura 1) que se activan para caudales superiores a los 3.000 m³/s, efectos que

no están presentes en el tramo modelado. Es decir, la comparación entre los caudales aforados y los modelados tiene ciertas limitaciones, pero al observar la Figura 13 se observa una buena relación entre la mancha del desborde obtenida a partir de la imagen satelital y la mancha modelada.

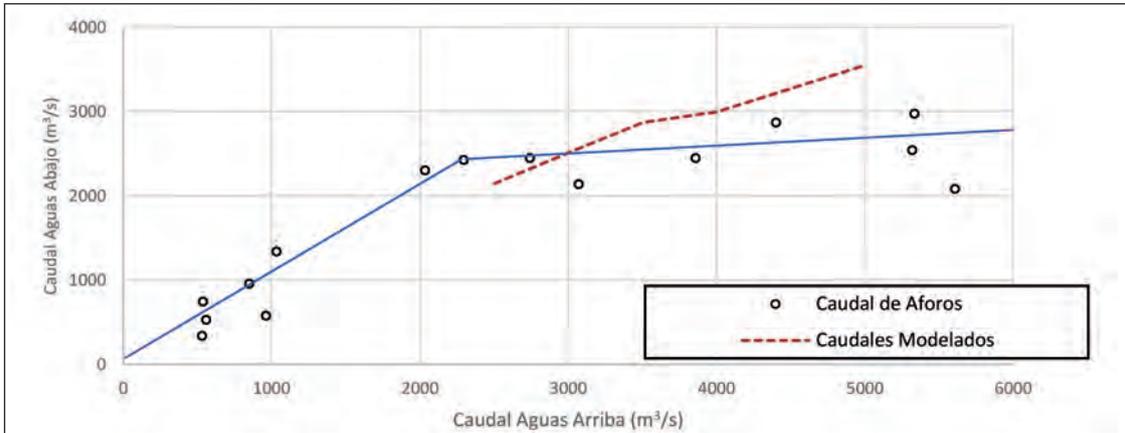


Figura 12.- Caudales aguas arriba vs aguas abajo de los desbordes en estudio.

A partir de imágenes satelitales durante crecidas en combinación de bandas de falso color 543 para Landsat 5 y 7 y combinación 6-5-4 para Landsat 8 y su correspondencia con hidrogramas y caudal pico del evento presente en la imagen (Testa Tacchino, 2015) se extrajeron las imágenes correspondientes a caudales pico próximos a los modelados para validar el modelo bidimensional.

La Figura 13 presenta los resultados modelados para el caudal de 2500 m³/s sobre la imagen Landsat del día 3 de marzo de 2009 y la Figura 14 para el caudal de 3500 m³/s sobre la imagen del 25 de enero de 2013. Sobre estas imágenes se han delimitado también los desbordes observados en las imágenes de satélite: en azul el desborde El Chañaral y en rojo La Garrapata.

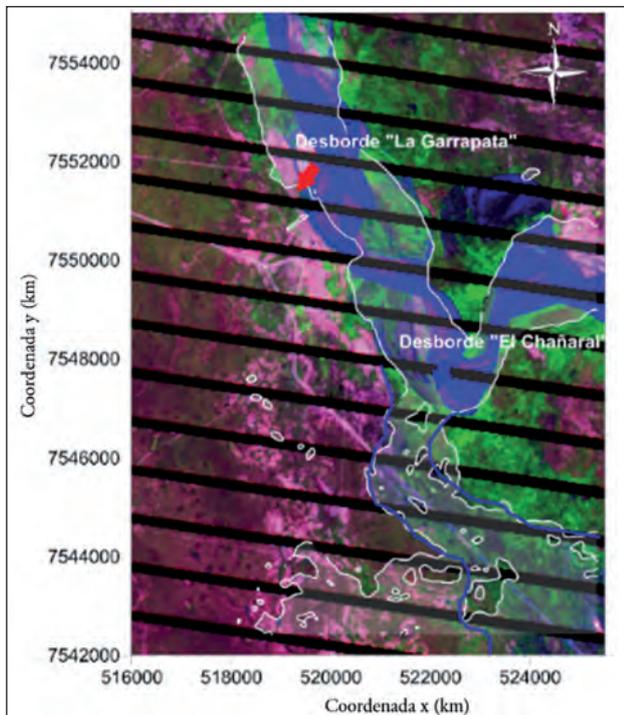


Figura 13.- Superposición de desborde modelado para un caudal de 2500 m³/s (Img. Landsat 3/3/2009 Bandas 5-4-3). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral.

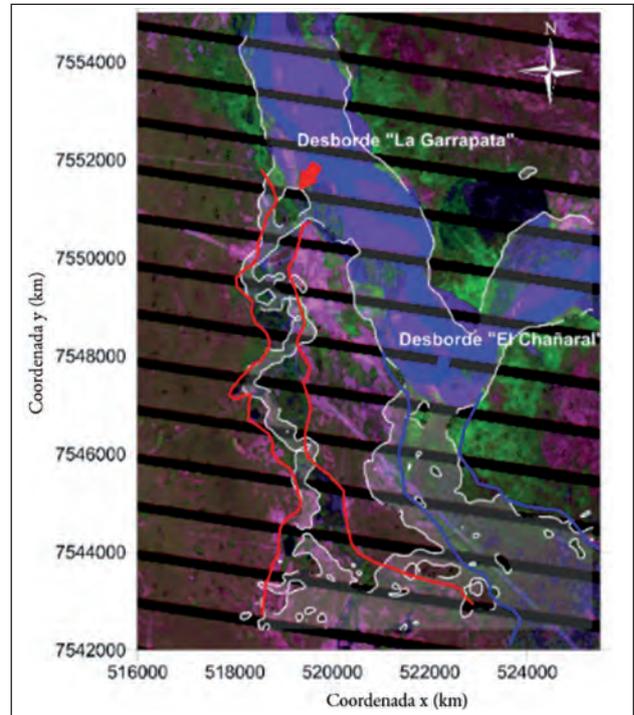


Figura 14.- Superposición de desborde modelado para un caudal de 3500 m³/s (Img. Landsat 25/1/2013 Bandas 5-4-3). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul y rojo el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral y La Garrapata, respectivamente.

9. LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN

La modelación presenta una serie de limitaciones al compararla con las diversas complejidades del tramo en estudio. La modelación al ser a lecho fijo y sin transporte de sedimentos no contempla los efectos de la elevada tasa de transporte de sedimentos y material vegetado, así como grandes variaciones de la cota de lecho: en Misión la Paz, 51,2 km aguas abajo de El Chañaral, se han registrado movimientos del fondo de 7 m en profundidad en aforos antes y después del paso de la crecida. Otra limitación es la resolución del modelo digital del terreno obtenido a partir de SRTM, que necesariamente debería ser contrastada con topografía de la zona.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de imágenes satelitales, hidrogramas y análisis de curvas de excedencia, se ha determinado que el desborde La Garrapata se encuentra inactivo para 2500 m³/s y se activa incipientemente a los 3000 m³/s para una cota de 274,1 m s. n. m. El desborde El Chañaral se encuentra inactivo para los 2300 m³/s y se activa para los 2500 m³/s a la cota 273,85 m s. n. m. Es importante recordar que los caudales que ingresan a la zona de estudio son inferiores a los obtenidos por las lecturas de escalas y relaciones h-q en Villamontes, consecuencia de los desbordes aguas arriba (La Puerta) y el tránsito de la crecida, que reduce el pico aguas abajo.

Se ha verificado una buena correspondencia entre el caso modelado y el observado a través de imágenes satelitales e hidrogramas, se presenta una muy bue-

na correspondencia entre las manchas obtenidas a partir de la delimitación de los desbordes visibles en las imágenes satelitales y las manchas obtenidas como resultados de la modelación numérica, tanto para El Chañaral como para La Garrapata.

BIBLIOGRAFÍA

Cafaro E. D. y C. G. Ramonell, 2007. Evaluación de la Información Necesaria para el diagnóstico de una posible avulsión del Río Pilcomayo. Informe Final. Santa Fe: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Deltares, 2010. Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments.

Dirección Ejecutiva, 2014. Comisión Trinacional para el desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo. www.Pilcomayo.net. recuperado en Enero 2014.

Testa Tacchino, Alejo Juan Sebastián, 2015. Caracterización de los Desbordes del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz. Córdoba: Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, UNC.

USGS, 2014. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc second (30m). 14 de 08 de 2014. <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>.

Vauchel, P., 2006. Análisis, críticas y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de misión La Paz (Argentina). Informe final.

TENDENCIAS DE PRECIPITACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS, MÉXICO

TRENDS OF PRECIPITATION AND CLIMATE CHANGE IN THE BASIN OF THE RIVER CONCHOS, MEXICO

Martínez Austria, Polioptro F. ¹; Irula Lutzow, Federico²

Resumen

La cuenca del río Conchos, ubicada en la frontera de los Estados Unidos y México, es la principal aportadora de volúmenes para el cumplimiento del Tratado de Distribución de Aguas entre ambos países. En la última década se han registrado dificultades para la entrega de los volúmenes previstos en el Tratado, y se ha argumentado que la causa se encuentra en la gestión del agua. En este texto, para verificar la posibilidad de que se trate de causas naturales, se revisa la variabilidad histórica de la precipitación en la cuenca y se hace un análisis de tendencias recientes de esta variable empleando el Índice Estandarizado de Precipitación en estaciones climatológicas representativas. Se concluye que en la cuenca hay una clara tendencia a una mayor sequedad y una menor variabilidad climática, y se resaltan las implicaciones de esta tendencia para la gestión de del agua en esta cuenca transfronteriza. Se revisan los pronósticos de diversos escenarios de cambio climático, y se encuentra que son consistentes con las tendencias encontradas en el análisis de precipitación.

Palabras clave: Tendencias de cambio climático. Cuencas Transfronterizas. Gestión de cuencas transfronterizas.

Abstract

The Conchos River basin, located on the border of the United States and Mexico, is the main contributor to comply with the Water Distribution Treaty between the two countries. In the last decades, there have been difficulties in delivering the volumes committed at the Treaty, and it has been argued that the cause is water management. In this text, to verify the possibility of dealing with natural causes, the historical variability of precipitation in the basin is reviewed and an analysis of recent precipitation trends is performed using the Standardized Precipitation Index on representative meteorological stations. It is concluded that in the basin there is a clear trend towards greater dryness and reduced climate variability, and the implications for the management of this transboundary basin are highlighted. Forecasts of various climate change scenarios are reviewed and found to be consistent with the trends observed in the analysis of precipitation.

Key Words: Climate change trends. Transboundary watersheds. Transboundary water management.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Conchos forma parte de la cuenca binacional del río Bravo/Grande, que en su parte baja divide a los Estados Unidos y México, formando una frontera de 2,000 km. La cuenca del río Bravo, es una de las de mayor extensión en Norteamérica y de ella dependen millones de personas en siete estados de ambos países. La superficie total de la cuenca del río Bravo/Grande es de 444,560 km², de los cuales 229,796 se encuentran en territorio de los Estados Unidos y 214,762 en territorio mexicano (ver Figura 1). Es una cuenca que se caracteriza por su condición de semiárida, con una muy alta variabilidad climática y recurrentes sequías. Por su desarrollo demográfico y económico, el uso intensivo del agua la ha conducido a una condición de elevado estrés hídrico (Aparicio, *et al.*, 2009).

Los Estados Unidos y México firmaron en 1944 un Tratado que incluye previsiones para la distribución de las aguas del río Bravo (Mexico-USA, 1944), en el cual México se comprometió a compartir con los

EEUU, de las aguas que escurren en su territorio hacia el cauce internacional, un volumen de por lo menos de 431.72 millones de metros cúbicos en promedio anual, en ciclos que se contabilizan cada cinco años, lo que equivale a suministrar un volumen mínimo de 2,158.6 millones de metros cúbicos en cada ciclo. México puede cubrir ese volumen en cualquier orden en el periodo de cinco años, arreglo que se adoptó en reconocimiento a la alta variabilidad climática de la cuenca, en efecto, como asienta el Ing. Orive Alva en un informe técnico del Tratado, presentado al senado mexicano con motivo de la discusión de Tratado, el ciclo de cinco años se seleccionó para evitar hacer extracciones de las presas “en el caso de sequía en una año o varios”, dado que “en numerosas ocasiones, cada año, el gasto del río es tan reducido que no alcanza a satisfacer las necesidades de riego en ambas márgenes” y “el río Bravo llegaba a estar totalmente seco en algunos meses” (Orive de Alba, 1945).

¹ Profesor. Universidad de las Américas Puebla. polioptro.martinez@uldap.mx

² Estudiante, Programa de Honores. Universidad de las Américas Puebla

No obstante, y considerando solamente razones de crecimiento demográfico en la región, el agua renovable per cápita en la cuenca mexicana, es

ahora de apenas 1 063 m³/hab/año, lo que la coloca en el límite de la escasez extrema, condición que alcanzará en los próximos años (CONAGUA, 2014).



Figura 1.- Cuenca del río Bravo, principales afluentes, presas y sistemas de riego.

Conforme al Tratado, las aportaciones mexicanas a los Estados Unidos no pueden provenir de cualquiera de los tributarios del río Bravo, sino solamente de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas. De estos afluentes, el río Conchos cuenta con el 87% de la disponibilidad total. De ahí su importancia tanto para el desarrollo social en su cuenca, como para el río Bravo aguas abajo y para el cumplimiento de las aportaciones de agua a los Estados Unidos.

Las sequías en la cuenca del río Bravo, en las décadas recientes, han producido conflictos entre ambos países, que hasta ahora se han podido resolver gracias a la participación de la sociedad, los gobiernos y las instituciones binacionales que ambos países han formado para atender los asuntos de interés binacional en su frontera (Martínez-Austria, *et al.*, 2013; Chávez, 1999).

2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA HISTÓRICA

La historia de la sequía en México incluye muy poca información de las registradas en la región norte de México (ver Florescano, 2000 y Ortega Gaucin, 2013), debido sobre todo debido a que estos territorios se encontraron despoblados o con escasa población hasta finales del siglo XIX, en que se desarrollaron los primeros grandes asentamientos urbanos. Sin embargo, es posible reconstruir las sequías en periodos largos de tiempo empleando información *proxi*, tal como el estudio de los anillos de árboles centenarios.

Para el estado de Chihuahua, donde se encuentra la cuenca del río Conchos, Cerano-Paredes *et al.* (2009) utilizaron series de anillos de árboles de la reserva “Cerro El Mohinora”, ubicada en la cuenca del río Florido, tributario del río Conchos, en la zona alta de Chihuahua, en la frontera con los estados de Sinaloa y Durango, región en la que se produce la mayor parte de la precipitación de la cuenca. Con esta técnica, Cerano-Paredes *et al.* (2009) reconstruyeron las series de precipitación de los últimos 350 años, como se muestra en la figura 2. Los periodos de sequías más intensas en el registro coinciden con datos históricos de sus efectos en la sociedad.

Por otra parte, si bien el análisis con series *proxi* permite observar tendencias de muy largo plazo, este tipo de análisis no permite analizar con suficiente exactitud las tendencias y variabilidad de la precipitación, sobre todo en un clima que puede haber cambiado en las décadas recientes. En este caso se requiere del estudio de series históricas directas.

De acuerdo con mediciones reportadas por diversas bases de datos globales, como muestra el más reciente reporte del IPCC sobre las bases físicas del cambio climático (IPCC, 2013), y se ilustra en la figura 3. Para la región en estudio es notoria la diferencia entre las diversas bases de datos: desde una en la que se observa una mayor precipitación hasta otra en que se registra una disminución importante. Es evidente que para determinar las tendencias en una cuenca como la del río Conchos, se requieren estudios más detallados, en el ámbito local.

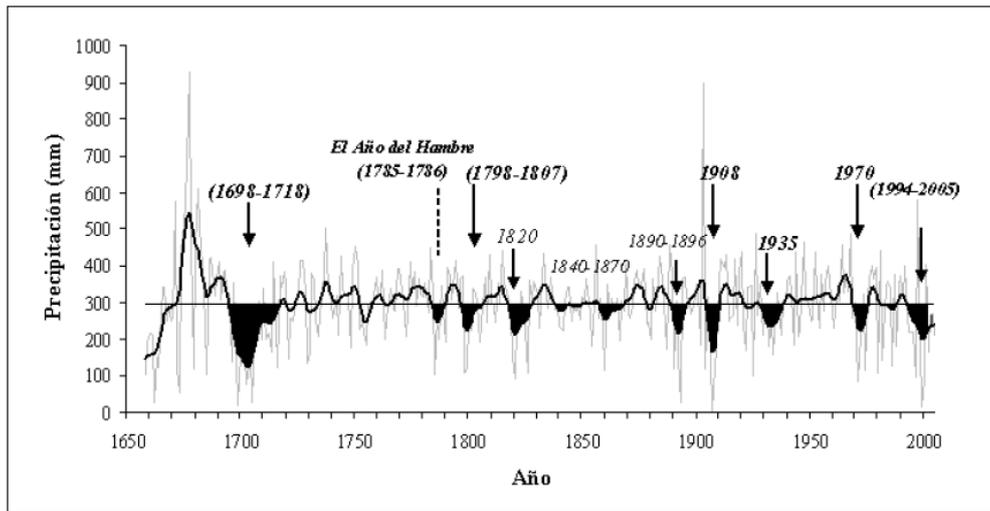


Figura 2.- Precipitación reconstruida en los últimos 350 años en el suroeste de Chihuahua, reserva Cerro El Mohinora (Cerano-Paredes, *et al.*, 2009).

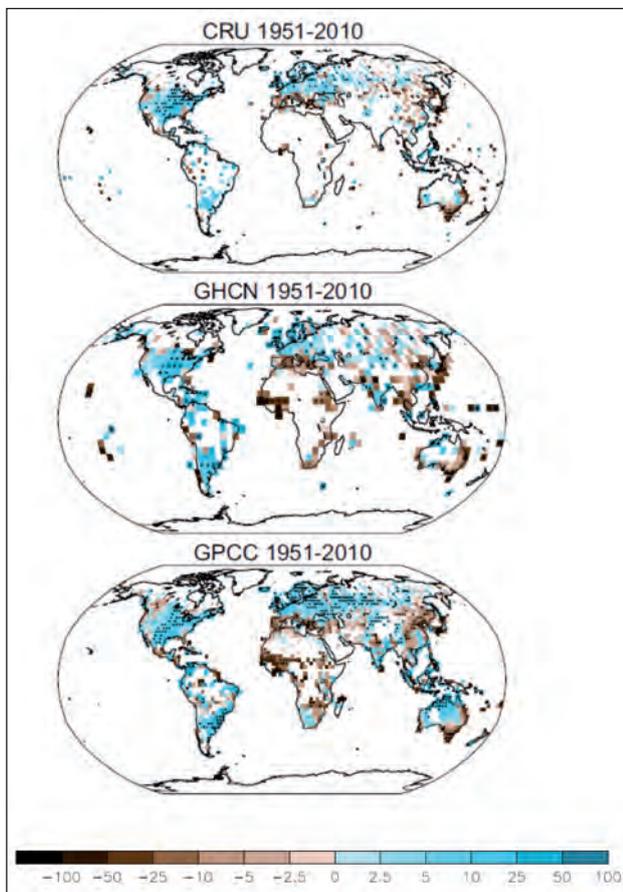


Figura 3.- Tendencia observada en la precipitación en el periodo 1951-2010, en mm/año por década (IPCC, 2013). En la figura: CRU, Global Historical Climatology Network, NOAA; CRU, Climate Research Unit, University of East Anglia; GPCC, Global Precipitation Climatology Project, NCAR.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Conchos se ubica prácticamente en su totalidad en el estado de Chihuahua, salvo una muy pequeña fracción en su nacimiento, que pertenece al estado de Durango. La mayor parte de su población se ubica en zonas urbanas; de acuerdo al censo de población de 2010, solamente el 17% se ubica en poblados rurales. La precipitación en la cuenca es muy variable, alcanza los 700 mm anuales en promedio en la parte alta de la cuenca, 350 mm anuales en la parte media y solamente 250 mm en la parte baja (i.e. Aparicio, *et al.*, 2009), y (Houston Advanced Research Center and Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2000). Se trata entonces de una cuenca en una región semiárida, cuyos principales escurrimientos se producen en la zona alta en las sierras que la rodean. El promedio histórico de la precipitación se muestra en la figura 4.

La cuenca del río Conchos tiene una superficie total de 9,006 km², y está integrada por las subcuencas de los ríos Florido, Parral, Balleza, San Pedro y Chuviscar, además de su cuenca propia (CONAGUA, 2011). En el río Conchos y sus afluentes se ha construido una importante infraestructura hidráulica que incluye grandes presas con una capacidad de almacenamiento total de 3,939.74 millones de metros cúbicos, además de otras presas pequeñas y bordos. El principal uso del agua es el agrícola. En la cuenca se encuentran ubicados cuatro distritos de riego que, si bien tienen una superficie regable de 128,137 hectáreas, raramente se siembran en su totalidad de la superficie. En el ciclo agrícola 2013-2014, por ejemplo, solamente se sembró el 58% de la superficie total.

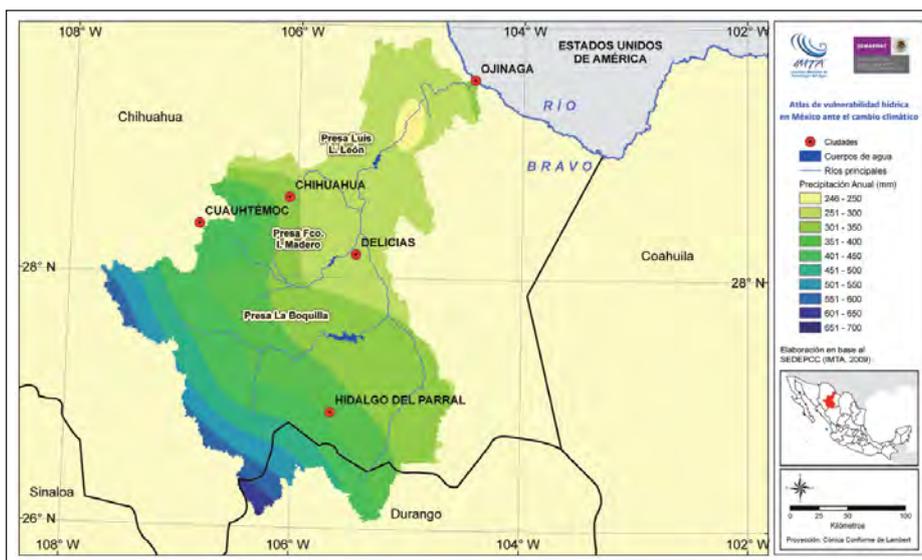


Figura 4.- Distribución de la precipitación histórica (Martinez-Austria & Patiño (editores), 2010).

Respecto de la información climatológica, en la cuenca se ubican varias estaciones. Sin embargo, muchas de ellas han dejado de operar desde hace varios años, y otras tienen un periodo demasiado corto de registro para realizar un análisis de variabilidad. No obstante, siendo una de las cuencas mexicanas con mayor infraestructura hidráulica, fue posible contar con información suficiente de estaciones en la parte alta, media y baja de la cuenca. En la tabla 1 se muestran las estaciones empleadas en el análisis, y su ubicación gráfica puede apreciarse en la figura 5.

Tabla 1. Estaciones climatológicas empleadas en el estudio.

| Número de estación | Nombre | Fecha de inicio de operación |
|--------------------|-------------|------------------------------|
| 8037 | Coyame | 01/10/1964 |
| 8085 | La Boquilla | 01/06/1949 |
| 8270 | La Mesa | 01/11/1975 |

La cuenca del río Conchos, como se ha indicado anteriormente, padece sequías recurrentes, que se espera sean más frecuentes e intensas, como resultado de una tendencia general en este sentido, esperada para las regiones en esta latitud (ver (Dai, 2011), (The Royal Society, 2014)). En un análisis para todo el territorio de México, realizado en 2012, la Comisión Nacional del Agua clasificó a la cuenca del río Conchos como una de las regiones más vulnerables a la sequía en México (CONAGUA, 2012).

De conformidad con los balances desarrollados por la Comisión Nacional del Agua, la cuenca del río Conchos cuenta con un escurrimiento promedio de 982.00 Mm³, y una demanda de 1295.16 Mm³, por lo que tiene un déficit promedio de -313.17 Mm³ (CONAGUA, 2013). No obstante, se aprovechan los

periodos de precipitaciones mayores que ocurren por la variabilidad climática de la región, para almacenar el agua en su sistema de presas y obtener un mejor balance anual de disponibilidad.

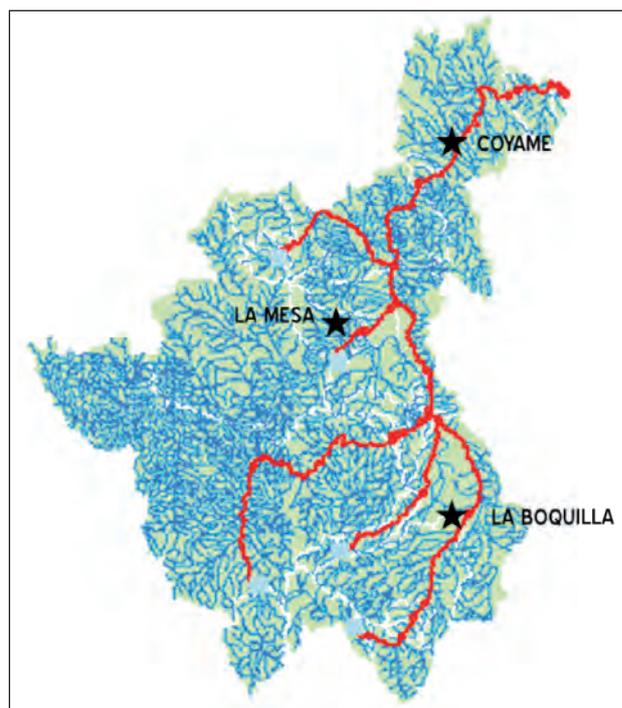


Figura 5.- Estaciones climatológicas consideradas en el estudio. Croquis de localización en la cuenca.

4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS

Existen numerosos métodos para determinar la variación de la precipitación y la ocurrencia de una sequía meteorológica. La diversidad de estos métodos incluye índices como porcentajes de la normal, deciles, el índice de severidad de la sequía

de Palmer, el índice estandarizado de precipitación o el monitor de sequía de Norteamérica. En otros casos, se usan valores límites de la precipitación en un periodo de tiempo, los cuales sólo son válidos para los sitios en los que fueron obtenidos (ver (Hisdal & Tallakasen, 2000), (Marcos Valiente, 2001)). Para establecer un índice de uso internacional, en el año 2009, en la ciudad de Lincoln, bajo los auspicios del National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska, se llevó a cabo un taller internacional para analizar los índices para la sequía en uso por los centros meteorológicos mundiales y en investigación (ver Hayes, et al., 2011). Se llegó a un consenso entre los integrantes del taller para hacer uso de un solo índice y así poder generar una base de datos mundial. Se acordó emplear el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI por sus siglas en inglés), por la disponibilidad de datos, por su facilidad de interpretación, así como por su capacidad de cálculo en intervalos cortos o muy prolongados de tiempo. Otra ventaja del SPI es que permite observar no sólo los periodos anormalmente secos, sino también los extremadamente húmedos y la variabilidad entre ellos.

El Índice Estandarizado de Precipitación representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico, que por lo tanto representa el valor cero. La ventaja de utilizar este índice es que no solo cuantifica el déficit (valores negativos) sino también los excesos significativos (valores positivos) de precipitación respecto a las condiciones normales. Para calcular el SPI se considera una distribución gamma para el histograma de precipitación. La función de densidad de probabilidades se transforma (mediante una transformación equiprobable) en la de una distribución normal. El índice de Precipitación Estandarizado se calcula como la diferencia entre la precipitación estacional estandarizada respecto de la media, entre la desviación estándar.

$$SPI = \frac{X_{ij} - X_{im}}{\sigma} \quad (01)$$

Donde X_{ij} es la precipitación estacional en la i -ésima estación y en la j -ésima observación y X_{im} es la media estacional y σ la desviación estándar.

Conforme al valor registrado del SPI se puede caracterizar la condición de humedad, como se muestra en la tabla 2, desde extremadamente húmedo ($SPI \geq 2$) hasta extremadamente seco ($SPI \leq -2$)

El SPI puede calcularse en diferentes periodos, los más empleados son de un mes, tres meses, seis meses y doce meses. Cada uno de estos valores tendrá un significado físico diferente. Los valores de SPI a uno y tres meses reflejan la condición de

precipitación en periodos cortos. Pueden emplearse para identificar el inicio de la sequía, o bien para determinar los efectos del déficit de importancia en periodos cortos, por ejemplo, durante la época de siembra o floración de los cultivos. Debe tenerse cuidado con la interpretación de estos parámetros en las regiones donde la escasez de lluvias es normal durante la temporada de secas. El SPI de seis meses es significativo para identificar las variaciones de precipitación entre estaciones. Si ocurre un valor de sequía del SPI durante la estación de lluvias, se puede identificar como un periodo de sequía que tendrá impactos importantes en la sociedad.

Tabla 2. Valores del índice estandarizado de precipitación y clasificación de rangos de precipitación en el periodo analizado.

| Valor del SPI | Categoría |
|---------------|---------------------------------|
| 2.0 y más | extremadamente húmedo |
| 1.5 a 1.99 | muy húmedo |
| 1.0 a 1.49 | moderadamente húmedo |
| 0.99 a -0.99 | normal o aproximadamente normal |
| -1.0 a -1.49 | moderadamente seco |
| -1.5 a -1.99 | severamente seco |
| -2 o menor | extremadamente seco |

Los valores del SPI de doce o 48 meses permiten analizar las condiciones de humedad en ciclos largos, e identificar condiciones de sequía severa o extrema. Este enfoque es el más adecuado para estudiar las variaciones de largo plazo –climáticas– de la precipitación.

En el análisis de tendencias de precipitación en la cuenca del río Conchos se revisaron los registros históricos de las estaciones señaladas en la tabla 1 y se calcularon los valores de Índice Estandarizado de Sequías. Los resultados se resumen en las figuras 6, 7 y 8.

En toda la cuenca, a partir de la década de los noventa, se observa una disminución de la precipitación. Esta tendencia es menos acusada en la parte alta de la cuenca (estación La Boquilla), y más clara y significativa en la parte media (estación La Mesa) y en la parte baja (estación Coyame).

Asimismo, también a partir de la década de los noventa se observa una disminución en la variabilidad climática, en particular en la parte baja de la cuenca, la más árida. Así, en la estación Coyame, desde 1994 los valores del SPI se mantienen en el rango de ligeramente seco, salvo un evento de lluvia registrado en 1998 y que se registra en el SPI de 6 meses. Contrasta este comportamiento de la precipitación con lo observado en el periodo 1975-1992, en el que se alternaron periodos de altos valores del SPI con otros secos o ligeramente secos.

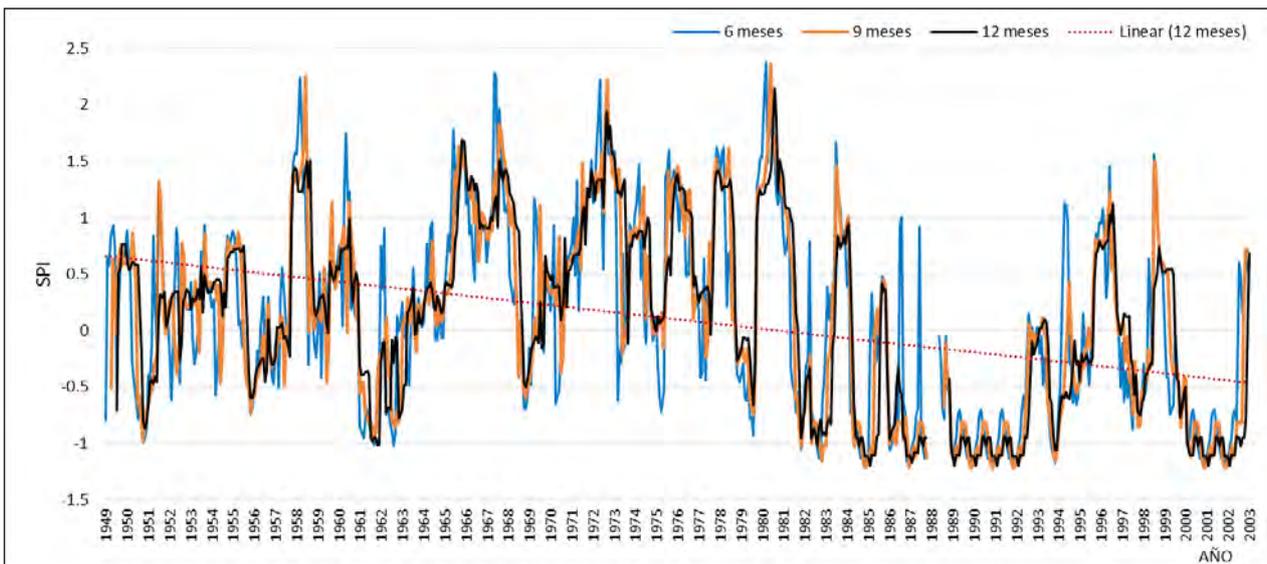


Figura 6.- Índice de Precipitación Estandarizado, 6,9 y 12 meses, estación La Boquilla. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de 12 meses.

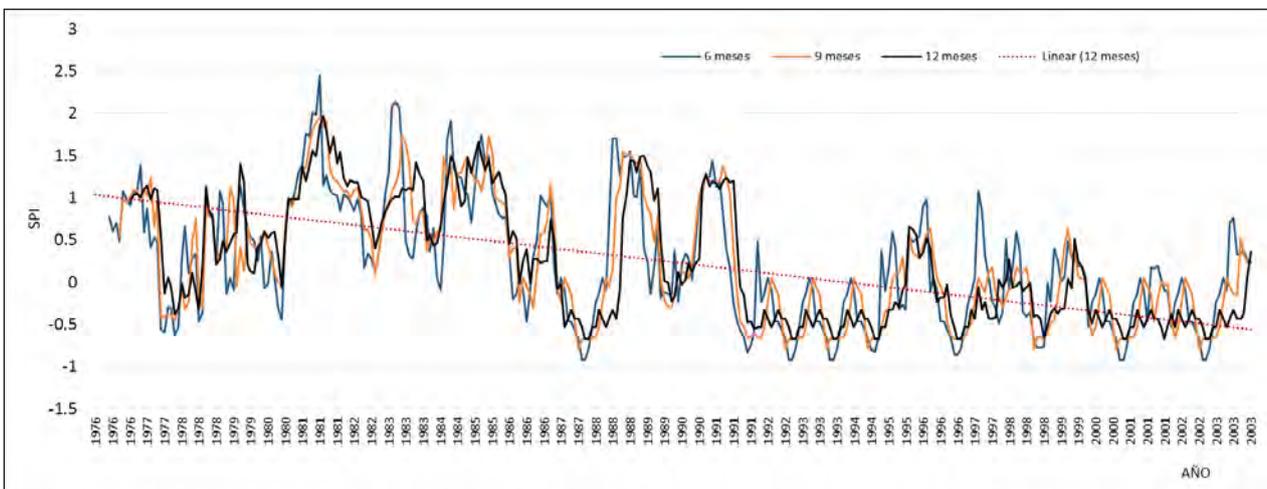


Figura 7.- Índice de Precipitación Estandarizado, 6,9 y 12 meses, estación La Mesa. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de 12 meses.

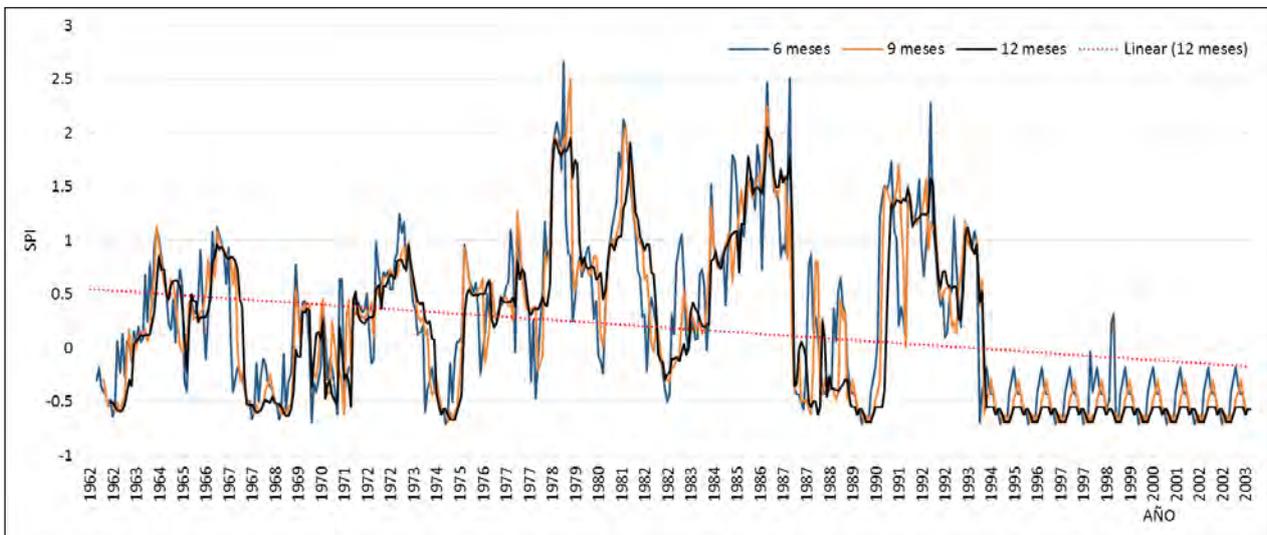


Figura 8.- Índice de Precipitación Estandarizado, 6,9 y 12 meses, estación Coyame. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de 12 meses.

En la parte media de la cuenca, caracterizada por la estación La Mesa, se observa también una tendencia a la disminución de la precipitación a partir de 1990. Desde ese año, no se han registrado valores del SPI superiores a 1.5, como ocurrió varias veces en el registro entre 1980 y 1990. De hecho, desde 1990 el SPI de 12 meses no alcanzó valores superiores a 1, indicativo de moderadamente húmedo, manteniéndose desde entonces en el rango entre 0.5 y -0.5; lo que indica también una disminución de la variabilidad climática.

Finalmente, en la parte alta de la cuenca, caracterizada por la estación La Boquilla, se observa también una disminución en la precipitación a partir de los noventa. Puede observarse que mientras hasta 1985 fueron recurrentes periodos húmedos, con valores del SPI-12, de 2 o mayores, a partir de los noventa no se han registrado valores superiores a uno, que es el límite de los periodos húmedos. En esta estación, ubicada en la zona de mayores precipitaciones de la cuenca, la tendencia es menos evidente. Sin embargo, puede observarse que mientras en el periodo 1957-1985 se registraron varios episodios moderadamente y muy húmedos, a partir de 1985 no se han observado valores del SPI-12 mayores a 1, y se observan periodos prolongados de sequía moderada, en los años 1989-1992 y 2000-2002.

En general, en todos los registros analizados, el ajuste lineal (que sólo puede considerarse como indicativo de una tendencia) es claramente negativo. En conclusión, existe una tendencia a una mayor sequedad en la cuenca.

Por otra parte, también la disminución en la variabilidad de la precipitación es un problema mayor para la gestión del agua en la cuenca. Esto es debido a que con frecuencia han sido las lluvias extraordinarias las que han producido excedentes en la cuenca, con derrames y transferencias a la cuenca baja del río Bravo, lo que ha permitido el cumplimiento de los compromisos de México con los Estados Unidos, previstos en el Tratado de 1944.

Las tendencias previstas para el siglo XXI como resultado del cambio climático se refieren a una menor disponibilidad natural. En la figura 9 se observa que en la región de la cuenca del río Bravo se esperan disminuciones en la precipitación de alrededor de 10%. Estos resultados son consistentes con los de un análisis multimodelo que compara los promedios del periodo 1931- 1999, realizado por Cook *et al* (Cook, et al., 2014) que encuentran resultados semejantes para el escenario RCP 8.5, que es uno de los nuevos escenarios propuestos por IPCC, basados en incrementos de la radiación más que en algún escenario de emisiones, como ocurría en los escenarios SERES. Para este escenario, se estima una disminución en la precipitación en la cuenca del orden de -0.2 a -0.4 mm/día

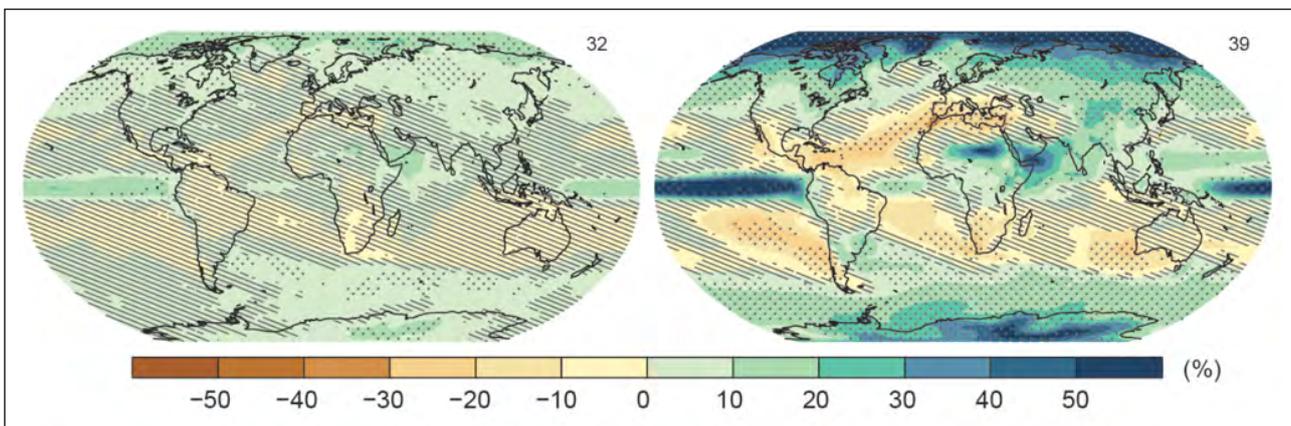


Figura 9.- Cambio esperado en la precipitación promedio en los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha), para el periodo 2081-2100 respecto del periodo 1986-2005 (IPCC, 2013).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México ha elaborado mapas con un mayor detalle en la República Mexicana, para los nuevos escenarios RCP. En las figuras 10 y 11 se muestran los mapas de anomalía de precipitación esperada para el final del siglo, para los escenarios RCP 6

y RCP 8.5. En el escenario RCP 6 se esperarían disminuciones en la precipitación del orden de -10 a -20 %, mientras que en el escenario RCP 8.5, se esperarían disminuciones en la precipitación de entre -20 a -30%. Estos resultados son consistentes con los obtenidos antes con los escenarios SRES.



Figura 10.- Cambios esperados en la precipitación al 2075-2099, en el escenario RCP 6 (INECC, 2016).



Figura 11.- Cambios esperados en la precipitación al 2075-2099, en el escenario RCP 8.5 (INECC, 2016).

Por otra parte, aplicando un análisis multimodelo y downscaling, Rivas Acosta, *et al.* (2010) realizaron un estudio detallado de la cuenca del río Conchos, y como resultado estiman que la disminución en la precipitación al final del siglo será de entre 15 y 21 %, respecto de la registrada históricamente hasta el año 2009 para el escenario SRES A2, como se muestra en la figura 12. El valor mostrado en la figura corresponde a la fracción en que disminuirá la precipitación.

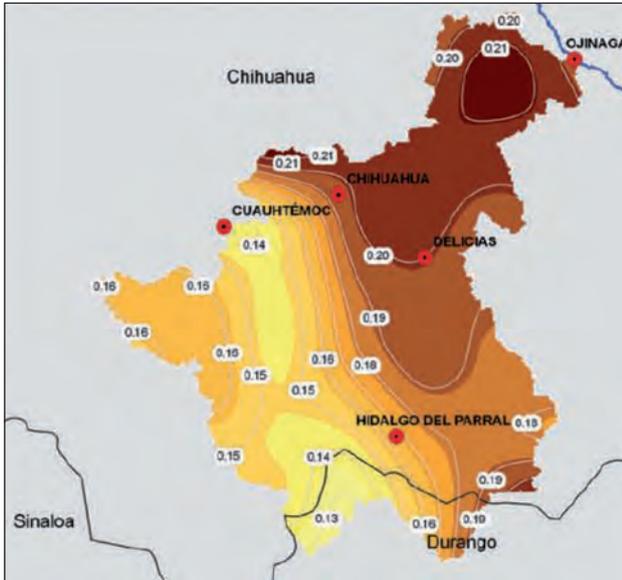


Figura 12.- Disminución prevista en la precipitación en la cuenca del río Conchos, al final del siglo XXI, respecto de la precipitación histórica registrada hasta 2009, en el escenario A2 (Rivas Acosta, *et al.*, 2010)

Es importante observar que el análisis multimodelo predice una menor disminución en las partes altas de la cuenca, y una mayor en la parte baja, hacia su confluencia con el río Bravo, y que estos resultados son consistentes con las tendencias observadas y que se han mostrado anteriormente. A la disminución en la precipitación le corresponderá una reducción en el escurrimiento, y por lo tanto en la disponibilidad. Esta disminución será no lineal, típicamente mayor que la correspondiente a la precipitación. Rivas Acosta *et al.* (Rivas Acosta, *et al.*, 2010) realizaron una evaluación para el río Conchos, empleando el denominado Método Indirecto y que se recomienda en la NOM-011-CNA-2015 (CONAGUA, 2002) elaborada por la Comisión Nacional del Agua para calcular la disponibilidad del agua en cuencas de México. Para el mismo escenario A2, pronostican disminuciones en el escurrimiento de entre 23 y 27% hacia el final del siglo XXI, como se muestra en la figura 13.

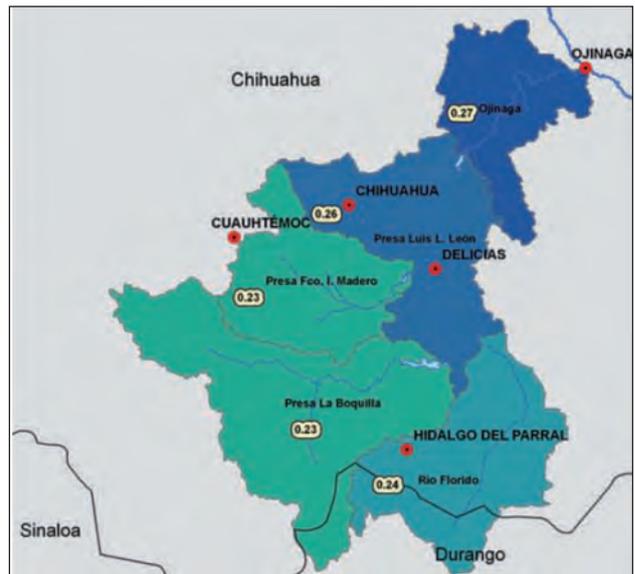


Figura 13.- Cambios esperados en la disponibilidad natural en la cuenca del Río Conchos hacia el final del siglo XXI, en el escenario A2 (Rivas Acosta, *et al.*, 2010).

5. CONCLUSIONES

La cuenca del río Conchos es la principal tributaria del sistema de ríos y arroyos que abastecen la parte baja de la cuenca del río Bravo, tributarios en territorio mexicano, y que aportan volúmenes para el cumplimiento de los compromisos de México con los Estados Unidos, conforme al Tratado de distribución de aguas entre ambos países. Concretamente, la cuenca del río Conchos aporta alrededor del 87% de este volumen.

La cuenca ha presentado históricamente una alta variabilidad climática con periodos recurrentes de sequías de diferente magnitud. No obstante, un análisis de tendencias de precipitación realizado con el Índice Estandarizado de Precipitación muestra que, sobre todo a partir de la década de los noventa del siglo pasado, la cuenca presenta una clara tendencia a la sequedad, que es mayor hacia su confluencia con el río Bravo, así como a una menor variabilidad climática. Se observa que desde la década de los noventa del siglo pasado no se han registrado años húmedos, y la cuenca registra valores del SPI cercanos a -0.5, lo que indica una condición persistente de precipitación escasa. Estos resultados son consistentes con los previstos en los escenarios de cambio climático para la región y la cuenca, realizados en diversos estudios previos.

Las consecuencias de esta tendencia climática en la cuenca sobre la disponibilidad para los diversos usos del agua en la cuenca y aguas abajo en el cauce del río Bravo son de gran relevancia para el futuro de la

gestión del agua, así como para el cumplimiento del Tratado de Distribución de Aguas de 1944 entre los Estados Unidos y México. La única solución viable será un uso integrado, eficiente y sustentable del agua en la cuenca, de lo contrario son de prever mayores conflictos, entre usuarios y binacionales, ocasionados por una mayor escasez.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es parte del proyecto de investigación 248080 *Gestión Integrada de la Cuenca del Río Bravo bajo Escenarios de Cambio Climático*, realizado con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio, F. J., Ortega, E., Hidalgo, J. & Aldama, A., 2009. *Recursos Hídricos en la frontera norte*. Jiutepec(Morelos): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cerano-Paredes, J. y otros, 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), pp. 27-44.

Chavez, O. E., 1999. The 1994-1995 drought, what did we learn from it?: The Mexican perspective. *Natural Resources Journal*, 39(Winter), pp. 35-60.

CONAGUA, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. *Diario Oficial de la Federación*, 17 abril, pp. 2-18.

CONAGUA, 2011. Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos. *Diario Oficial de la Federación*, 2 Junio.

CONAGUA, 2012. *Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante sequías en México*. [En línea] Available at: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/sequiasB.pdf>

CONAGUA, 2013. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en la cuenca del río Bravo. *Diario Oficial de la Federación*, 23 agosto, pp. 31-92.

CONAGUA, 2014. *Atlas del agua en México 2014*. Mexico: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2015. *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2013-2014*, México: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.

Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R. & Coats, S., 2014. Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, Volumen 43, pp. 2607-2627.

Dai, A., 2011. Drought under global warming: a review. *Climate Change*, 2(1), pp. 46-65.

Florescano, E., 2000. *Breve historia de la sequía en México*. Ciudad de México(Distrito Federal): Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.

Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. & Widhal, M., 2011. The Lincoln declaration on drought indices. *American Meteorological Society*, Issue April, pp. 485-488.

Houston Advanced Research Center and Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2000. *Water and sustainable development in the binational lower Rio Grande/Rio Bravo Basin*, Houston: Houston Advanced Research Center and Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

INECC, 2016. *Escenarios de cambio climático*. [En línea] Available at: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>

IPCC, 2013. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.

Martinez-Austria, P., E., E. D. L. & Giner, M. E., 2013. The US-Mexico institutional arrangement for transboundary water governance. En: *Free Flow. Reaching water security through cooperation..* Paris: Tudor Rouse and UNESCO, pp. 182-197.

Martinez-Austria, P. & Patiño, C. edits., 2010. *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Jiutepec(Morelos): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Mexico-USA, 1944. *USA and Mexico Treaty on the Utilization of waters of Colorado and Tijuana Rivers and of the Rio Grande*. s.l.:s.n.

Orive de Alba, A., 1945. Informe Técnico sobre el Tratado Internacional de Aguas. *Irrigación en México*, XXVI(3).

Ortega Gaucin, D., 2013. Impacto de las sequías en Nuevo León. *Ciencia UANL*, Issue 63, pp. 8-14.

Rivas Acosta, I., Güitron de los Reyes, A. & Ballinas González, H., 2010. Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales. En: P. Martínez Austria & C. Patiño Gómez, edits. *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del agua, pp. 81-114.

The Royal Society, 2014. *Resiliencie to extreme weather*. London: The Royal Society.

WMO, 2012. *Standardized Precipitation Index. User Guide.*, Geneva: World Meteorological Organization.

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

Balocchi, Francisco

Universidad de Chile, Chile

Centeno, Juan Carlos

Comisión Nacional del Agua, México

Chreties, Christian

Universidad de la República, Uruguay

Emmanuel, Evens

Universidad de Quisqueya, Haití

Gil, Joram

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

Gutiérrez, Alfonso

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Laiz, Orlando

Empresa de investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Cuba

Logan, William

International Center for Integrated Water Resource Mangement (ICIWaRM), United States

Martínez, Polioptro

Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos, Universidad de las Américas Puebla, México

Mazzeo, Nestor

Universidad de la República, Uruguay

Mejía Zermeño, Roberto

Pérez, Fidel

Universidad Brigham Young, Estados Unidos

Pizarro, Roberto

Universidad de Talca, Chile

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Cuba

Pochat, Víctor

Consultor en Planeamiento y Gestión de los Recursos Hídricos, Argentina

Sapriza, Gonzalo

Universidad de la República, Uruguay

Spalletti, Pablo

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Val, Rafael

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México

UNESCO

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

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

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

