



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. 7
SEP. 2015

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL

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

STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief

Roberto Pizarro

Editora Ejecutiva / Executive Editor

Zelmira May
UNESCO

Coordinador de Edición / Editorial Coordinator

Carolina Van Soest / Florencia Alonzo
UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design

Ser Gráficos

Diseño de Portada / Cover Design

Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Análisis integrado del "Rio Negro" un cauce de gran ancho en Colombia mediante trazadores y el modelo fluvial clasico de Leopold-Maddock
- Constaín Aragon, Alfredo José; Peña-Guzman, Carlos**
- Integrated analysis of "Rio Negro" a wider stream in Colombia by means of tracers and classical fluvial model of Leopold-Maddock 1
- Identificación de localidades rurales de Querétaro, México, para la implementación de desinfección solar en agua de lluvia captada
- Duhne-Ramírez, Marcela Susana; Domínguez-Cortazar, Miguel Ángel; Ventura-Ramos, Eusebio; Ruiz-González, Israel**
- Identifying Rural Communities of Queretaro, Mexico, where Rainwater Harvesting and its solar disinfection may be Implemented..... 9
- Metodología para la propuesta de caudales ecológicos en función de restricciones ambientales y de gestión
- Soares, Laura; Santos, Hersília; Martínez-Capel, Francisco; Callisto, Marcos; Tupinambás, Taynan; Castro, Diego; França, Juliana; Pompeu, Paulo; Sampaio, Francisco; Gandini, Cíntia; Lopes, João Victor; Alves, Carlos**
- Ecological flow methodology based on environmental and management restrictions 17
- Cuenca del Rio São Francisco: ¿Conflicto de intereses?
- Gonçalves de Souza, Reginaldo; Hernández-Bernal, Norma Angélica**
- São Francisco River Basin: Conflict of interest? 29
- Influencia de las grandes precipitaciones en la garantía de entrega de agua anual
- Eduardo O. Planos Gutiérrez**
- Influence of extreme rainfall in the annual water supply 38
- Proyecto máximos hidrológicos en Latinoamérica y el Caribe
- Eduardo O. Planos Gutiérrez; Alfonso Gutiérrez López**
- Maximum hydrological project in Latin America and the Caribbean..... 49
- Aplicación de la ecuación de kinoshita para la delimitación de la zona de funcionamiento óptimo de un estero costero
- Alfonso Gutiérrez-López, María Gricelda Jiménez J.**
- Definition of optima hydraulic use area in a coastal estero, using kinoshita equation..... 58

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

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

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

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

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

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

BLANCA JIMÉNEZ

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

EDUARDO PLANOS

Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

ALFONSO GUTIÉRREZ

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

JUAN CARLOS BERTONI

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

EVENS EMMANUEL

Université Quisqueya, Haití
University of Quisqueya, Haití

WILL LOGAN

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

SUSCRIPCIONES

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

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

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

AQUA LAC nació de la familia latinoamericana y caribeña del Programa Hidrológico Internacional, para llenar un espacio necesario de intercambio y desarrollo de conocimientos. Desde su primer número, asumió el reto de establecerse en la cima de la creación científica e ingenieril, reconociendo que el universo del agua plantea muchos retos para todos sin excepción: usuarios, ingenieros, científicos y políticos. Todos tenemos que ver con el agua y todos, a nuestra escala, somos usuarios y decisores a la vez. Cada uno, desde su perspectiva, tiene la responsabilidad de velar por la preservación de este invaluable recurso y utilizarlo con conocimiento, responsabilidad y racionalidad. Esta responsabilidad individual debe integrarse en responsabilidad colectiva, a través de una gestión que incluya a todos, para lograr un buen gobierno del agua para el presente y el futuro.

El conocimiento es la base de la gestión del agua y a pesar de lo mucho que se ha avanzado en el quehacer hidrológico, aún falta por andar un fructífero camino, para lograr la sostenibilidad en la gestión segura de los recursos hídricos. La experiencia demuestra que la naturaleza cobra cuando se le maltrata o se le conoce mal. En este sentido, las estadísticas de desastres ocurridos en América Latina y el Caribe, demuestran cómo la naturaleza reacciona allí donde existen intervenciones humanas, más si éstas son excesivas; según el *Annual Disaster Statistical Review*, en el año 2013, en las Américas ocurrieron 74 desastres, de los cuales más del 40 por ciento fueron de origen hidrológico.

Por una parte, desde el punto de vista de los extremos hidrológicos, el análisis de los desastres provocados por fenómenos naturales requiere de una visión integradora de todos los elementos naturales, económicos, sociales y políticos que determinan el estado y la evolución de la relación *Naturaleza - Intervenciones Humanas*. El aumento de la frecuencia de los desastres y los daños conexos en la Región de América Latina y el Caribe, forman parte de una tendencia mundial causada por una mayor vulnerabilidad y que se refleja también en cambios de las condiciones climáticas. Los desastres hay que verlos en el contexto de un mundo cambiante y el cambio en las amenazas.

Por otro lado, la gestión de los recursos hídricos bajo condiciones de un régimen hidrológico normal, requiere del mismo enfoque integrador mencionado para el caso de los extremos hidrológicos, y de un mejor entendimiento de lo que significa un régimen normal o promedio. En los valores medios de una variable hidrológica hay mucha información que debe ser adecuadamente interpretada, como se demuestra en uno de los artículos que contiene este número de AQUA LAC. El inadecuado conocimiento del régimen hidrológico normal, puede provocar desastres, que no son contabilizados en las estadísticas, un ejemplo puede ser, la falla en la satisfacción de la entrega de agua planificada.

En el camino del conocimiento para lograr la sostenibilidad en la gestión segura del agua, el cambio climático merece una mención aparte; simplemente porque los estudios hidrológicos que sustentan la gestión del agua se basan en el conocimiento de un

AQUA LAC was born out of the Latin American and Caribbean water family of the International Hydrological Programme, to provide a necessary space for the exchange and development of knowledge. Since its first issue, the journal took up the challenge to establish itself as a leader in covering scientific and engineering development, recognizing that the world of water poses many challenges for everyone without exception: users, engineers, scientists and politicians. Each one of us has the responsibility to ensure the preservation of this invaluable resource and use it knowingly, responsibly and rationally. This individual responsibility must be integrated into collective responsibility, through a system of management that includes everyone, to achieve good water governance in the present and future.

Knowledge is the basis for water management and despite how much progress has been made in hydrological research, there is still much to be done to achieve sustainability through effective management of water resources. Experience shows that nature reacts when it is mistreated or is poorly understood. In this regard, statistics of disasters in Latin America and the Caribbean demonstrate how nature reacts where there are human interventions, especially if they are excessive; according to the *Annual Disaster Statistical Review*, in 2013, 74 disasters occurred in the Americas, over 40 percent were hydrological in origin.

On the one hand, from the point of view of hydrological extremes, analysis of disasters caused by natural phenomena requires an integrated view of all natural, economic, social and political factors that determine the state and evolution of the relationship between nature and human interventions. The increased frequency of disasters and associated damage in Latin America and the Caribbean form part of a global trend of increased vulnerability which is also reflected in changes in climatic conditions. Disasters should be seen in the context of a changing world and changing threats.

On the other hand, water management under a regime of normal hydrological conditions requires the same inclusive approach previously mentioned in the case of hydrological extremes, and a better understanding of what normal or average conditions mean. The mean values of any hydrological variable contain much information that should be properly interpreted, as demonstrated in one of the articles contained in this issue of AQUA LAC. Inadequate knowledge of a normal hydrological regime may lead to disasters, which are not accounted for in statistics, one example being the failure to satisfactorily deliver water through planned systems.

In the way of knowledge to achieve sustainability in the safe management of water, climate change deserves a special mention simply because the hydrological studies that support water management are based on the knowledge of a hydrological regime of the past and today's changing climate imposes new conditions that will vary this regime. This invites us to search for new

régimen hidrológico del pasado, y el clima cambiante de hoy impone nuevas condiciones que harán variar este régimen. Lo anterior nos invita a la búsqueda de nuevas técnicas de análisis que, por ejemplo, contemplen la ruptura de la homogeneidad estadística de las series o que permitan construir escenarios alternativos que dependan de la evolución del clima.

El mundo activo y cambiante de hoy impone nuevos desafíos a quienes tienen el noble compromiso de avanzar en el conocimiento del agua. En este sentido, este número de Aqua LAC, fiel a la línea de los objetivos de la revista: difundir el conocimiento que se genera en la Región en torno a los recursos hídricos y con ello contribuir al desarrollo de capacidades, pone a disposición del lector, siete artículos relevantes, en los que se refleja la problemática abordada en este editorial.

En este ejemplar se ponen de relieve los temas siguientes: la necesidad de operar las obras hidráulicas tomando en cuenta los caudales ambientales, proponiendo una metodología multidisciplinaria que aporta una perspectiva novedosa para los caudales ecológicos en América Latina; la capacidad de los sistemas de información geográfica como una alternativa más económica y precisa, para identificar localidades aptas para implementar desinfección solar en agua de lluvia captada, siendo éste un aporte a la solución del problema que existe en poblaciones que reciben el agua con bajo nivel de potabilización; en el campo de la innovación tecnológica, se demuestra como el uso combinado de nuevas técnicas de trazador con un adecuado análisis de los parámetros del flujo, permiten caracterizar mejor el escurrimiento de grandes ríos como los que existen en la Región y también se propone una herramienta de análisis multivariado para lograr el funcionamiento óptimo de los esteros costero, empleando ecuaciones de meandro; un tema de particular importancia que se encontrará en este número, es el relacionado con los conflictos de intereses en el manejo de las cuencas fluviales, debido a la falta de una gestión integral de todos los componentes naturales, sociales y políticos que coexisten en una cuenca; relacionando las grandes precipitaciones con la gestión del agua, se demuestra la importancia de considerar estas precipitaciones de manera distinta para evitar fallas en la planificación de la entrega de agua; y, finalmente, se expone la experiencia y resultados que se alcanzan en un trabajo conjunto de los proyectos FRIEND e IFI, en el campo de la intensidad de las precipitaciones, demostrando el espíritu de colaboración y sinergia que existe en el Programa Hidrológico Internacional en nuestra Región.

Bienvenido este nuevo número de creación colectiva, que todos recibimos con el deseo de que AQUA LAC, continúe difundiendo, cada vez más, los conocimientos de los expertos de la Región y de quienes, aún desde otras partes del mundo, se incorporen a este camino de creación.

Dr. Eduardo Planos Gutiérrez
Miembro Consejo Dirección AQUA LAC
Coordinador FRIEND América Latina y el Caribe
Investigador Titular Instituto Meteorología de Cuba
Profesor Titular Instituto Superior de Ciencias y
Tecnologías Aplicadas
Asesor Hidrológico Región IV OMM

techniques of analysis that, for example, contemplate the breakup of statistical homogeneity of the series or that allow for the building of alternative scenarios that depend on climatic evolution.

Today's active and changing world poses new challenges to those with noble commitment to advancing the knowledge of water. In this respect, this issue of Aqua LAC contributes to the objectives of the journal to spread the knowledge generated in the region around water resources and thereby advance the development of capabilities offering the reader seven relevant articles which reflect the problems addressed in this editorial.

This issue highlights the following themes: the need to operate hydraulic works taking into account environmental flows, suggesting a multidisciplinary approach that brings a fresh perspective to ecological flows in Latin America; the ability of geographic information systems to offer a cheaper and more accurate alternative to identify apt localities to implement solar disinfection of captured rain water, therein contributing to solving the problem of water availability for populations living in zones with low levels of potable water; in the field of technological innovation it is shown how the combined use of new tracing techniques, with an adequate analysis of flow parameters, allow for the better characterization of the runoff of large rivers that exist in the region and a proposition is also made for the use of multivariate analysis tools to achieve optimal functioning of coastal estuaries while employing meander equations; an issue of particular importance will be covered in this issue and is related with the conflicts of interest in basin management due to the lack of integrated analysis of all natural, social and political components that coexist in a basin; relating heavy rainfall to water management, the importance of considering rainfalls differently to avoid failures in planning the delivery of water is demonstrated; and finally, this issue presents the experiences and results of the collaboration between projects FRIEND and IFI, in the field of precipitation intensity, demonstrating the spirit of collaboration and synergy promoted by the International Hydrological Programme in our region.

Join us in welcoming this new issue created in collective participation and may AQUA LAC continue to spread the knowledge of experts from the region, as well as those that from other parts of the world, to be incorporated on this path of creation.

Dr. Eduardo Planos Gutiérrez
Board Member of AQUA LAC
Coordinator of FRIEND - LAC
Researcher at the Meteorology Institute of Cuba
Associate Professor at the Institute of Superior
Sciences and Applied Technology
Region IV Hydrological Advisor OMM

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”*.

ANÁLISIS INTEGRADO DEL RIO NEGRO: UN CAUCE DE GRAN ANCHO EN COLOMBIA MEDIANTE TRAZADORES Y EL MODELO FLUVIAL CLASICO DE LEOPOLD-MADDOCK

INTEGRATED ANALYSIS OF "RIO NEGRO" A WIDER STREAM IN COLOMBIA BY MEANS OF TRACERS AND CLASSICAL FLUVIAL MODEL OF LEOPOLD-MADDOCK

Constaín Aragon, Alfredo José¹; Peña-Guzman, Carlos²

Resumen

El uso combinado de nuevas técnicas de trazador y las potentes formulaciones desarrolladas por L.B. Leopold y otros investigadores del USGS a mediados del siglo pasado, permiten un análisis muy congruente y preciso de ríos anchos o grandes en los que otras técnicas convencionales quedan cortas dada la gran magnitud del flujo. En este artículo se detallan las condiciones de desarrollo del método, las que se aplican a caracterizar el Rio Negro, un cauce muy ancho en la región central de Colombia.

Palabras clave: Análisis, ríos anchos, método.

Abstract

The combined use of new tracer techniques and the powerful formulations developed by L.B. Leopold and other researchers of USGS in middle past century, allow a very congruent and precise analysis of wider or larger streams where other current techniques remain behind, given the big size of flow. In this article is detailed the development conditions of method, which is applied to describe the Rio Negro stream, a wider flow in central region of Colombia.

Key words: analysis, wide rivers, method.

1. INTRODUCCION

El análisis de los parámetros que definen a un cauce natural muchas veces se hace de forma inconexa entre diversas partes, es decir sin una relación de congruencia entre la hidráulica, el transporte de masa y la geomorfología, perdiéndose la oportunidad de conectar los diferentes datos en forma óptima, virtud muy deseable en el desarrollo de los diversos modelos de calidad del agua. En este artículo se desarrolla una presentación "integrada" de estos parámetros, enlazando técnicas ya clásicas como el modelo de Leopold-Maddock y nuevas técnicas de trazador.

2. ANTECEDENTES: EL MODELO DE CAUCE EN "EQUILIBRIO DINÁMICO"

L. Leopold y T. Maddock, (Leopold L., Maddock, 1953) propusieron su modelo potencial, suponiendo una geometría simple para la sección transversal del flujo, con W como ancho medio, h como profundidad media, U como velocidad media, S_b como pendiente y n como Número de Manning. (Christofolletti, A., 1981). De acuerdo con este esquema simple (sin considerar taludes) el caudal será el producto de los parámetros geométricos

$$Q = W \times h \times U \quad [1]$$

Ellos desarrollaron las siguientes definiciones de potencias sobre el caudal, basados en numerosas observaciones que realizaron en su extensa experimentación.

$$W \approx a Q^b \quad [2]$$

$$h \approx c Q^f \quad [3]$$

$$U \approx k Q^m \quad [4]$$

$$S_b = p Q^z \quad [5]$$

$$n \approx q Q^y \quad [6]$$

Los parámetros a , c , k , p y q son valores a hallar mediante los datos experimentales. Normalmente se determinan a través de los datos Caudal-nivel de la oficina gubernamental de hidrología (en

¹ Fluvia Tech, Bogotá, Colombia alfredoconstain@fluvia.co

² Universidad Autónoma de Colombia, Bogotá, Colombia

Colombia el IDEAM), de los datos de trazador y de las observaciones. Las identidades que se cumplen para que las ecuaciones anteriores sean válidas son:

$$k \times c \times a = 1 \quad [7]$$

$$m + f + b = 1 \quad [8]$$

$$k = p^{\frac{1}{2}} \times c^{\frac{2}{3}} \times q^{-1} \quad [9]$$

$$m = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - y \quad [10]$$

Las observaciones de Leopold apuntan a unos valores muy aproximados de los exponentes de la siguiente forma: $f \approx 1/2 > m \approx 1/3 > b \approx 1/4$, y $z \approx -1/2$. Las anteriores franjas de valor aproximado nos dice que el nivel (h) es el parámetro que más varía, seguido de la velocidad (U) y el que menos varía es la anchura (W).

3. MARCO TEORICO:

3.1. Un nuevo método de trazadores

En anteriores artículos los autores han propuesto una función inédita de la siguiente forma, relacionando dos velocidades, una la de dispersión del trazador, V_{disp} , de naturaleza irreversible y medida por su desplazamiento Random Walk y la otra la de advección, U , como factor integrante. Aquí Δ y τ son parámetros característicos de desplazamiento y fase del movimiento Gaussiano mono-dimensional de la pluma de trazador. (Constaín A. y Lemos R., 2011).

$$\phi = \frac{V_{disp}}{U} = \frac{\left(\frac{\Delta}{\tau}\right)}{U} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2E\tau}}{\tau}\right)}{U} = \frac{\sqrt{2E}}{U\tau} \quad [11]$$

La naturaleza especial de Φ se puede caracterizar diciendo que es una función de estado del sistema, definida mediante la siguiente ecuación:

$$\oint_c d\phi = 0 \quad [12]$$

De la Ec. [11] se puede establecer una definición para la velocidad media advectiva:

$$U = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2E}{\tau}} \quad [13]$$

Esta ecuación tiene la misma estructura matemática que la ecuación de Chezy, Ec. [14]. Donde C es el factor de resistencia de Chezy, R el Radio hidráulico y S_b la pendiente.

$$U = C\sqrt{R \times S_b} \quad [14]$$

Despejando a E de la Ec. [13]:

$$E(t) = \frac{\phi^2 U^2 \tau}{2} \quad [15]$$

Debe notarse aquí que τ es diferente a la variable independiente t . La relación entre ambos tiempos se puede establecer mediante una dinámica del tipo Poisson-Svedberg (Constaín A., Peña-Guzmán C., Mesa D. & Acevedo P., 2014)

$$\beta = \frac{\tau}{t} = e^{-1.54} \approx 0.215 \quad [16]$$

3.2. Una descripción ampliada de la pluma de trazador

La descripción de la pluma de soluto se hace clásicamente por la ecuación clásica de Fick, con M la masa de soluto y A la sección transversal del flujo. (Fischer H.B., 1967).

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi E t}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \quad [17]$$

Sin embargo, dicha descripción es exacta solo si el coeficiente E es una función del tiempo, tal como se describe en la ecuación [15]. Ahora reemplazando el valor de la Ecuación [13] en la Ec. [17] se tiene con: $\sqrt{2\pi\beta} \approx 1.16$. La variable QL es el caudal "local" correspondiente al tubo de corriente.

$$C(x,t) = \frac{M}{Q_l \phi t 1.16} e^{-\frac{(x-U_x t)^2}{2\beta \phi^2 U_x^2 t^2}} \quad [18]$$

La particularidad de esta ecuación (fórmula modificada de Fick) es que reproduce bastante bien las curvas experimentales de trazador.

3.3. La ecuación de Elder como función del tiempo

En 1959 J.W. Elder (Elder, 1959) propuso una ecuación simple para determinar el Coeficiente Longitudinal de dispersión, en función de la pendiente, teniendo en cuenta los fenómenos de turbulencia en un flujo natural.

$$E \approx 5.93 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [19]$$

Ahora, si se tiene en cuenta en 1.2.1 esta definición debe también ser función del tiempo, pues corresponde a la *misma* entidad que define la Ec. [15]

3.4. Concepto de "tubo de corriente de trazador"

Se define de manera elemental como el cilindro ideal dentro del fluido que contiene las partículas de trazador a partir del punto de inyección hasta el punto en donde se mide su evolución. El trazador paulatinamente se va extendiendo longitudinalmente y se va ampliando a lo ancho.

Cuando el trazador llena uniformemente el área de la sección transversal del tubo, se dice que el trazador cumple con "Mezcla completa" en dicho tubo. La distancia correspondiente se denomina "Longitud de mezcla" para el tubo considerado y se puede mostrar que ocurre a $\Phi \approx 0.38$ para el desarrollo de la pluma.

3.5 Estimación de la velocidad "local" por la pluma de trazador

La distribución lateral de velocidades para un flujo natural se puede dar aproximadamente mediante una curva normalizada para un flujo turbulento confinado en un tubo rugoso, tal como se muestra en la Figura 1.

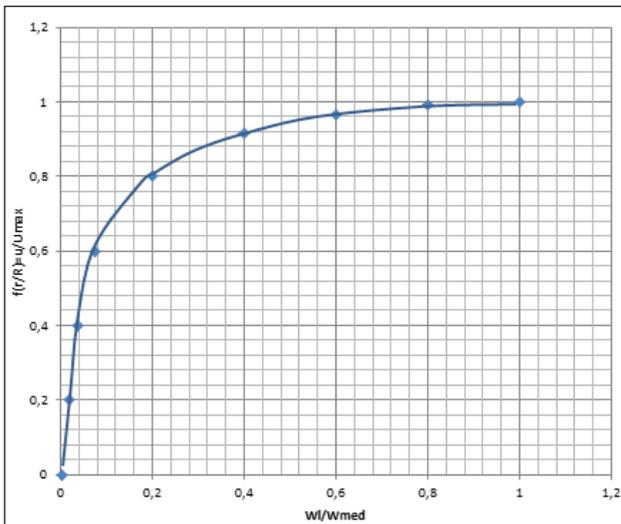


Figura 1. Distribución lateral de velocidades normalizadas en función de la razón $Wl/Wmed$.

Esta distribución define la razón de la velocidad "local" de la pluma de trazador a la "velocidad máxima" en el centro del flujo, $UL/Umax$, en función de la razón del ancho "local" (de la pluma) al semi-ancho del flujo ($WL=W/2$). La pluma de trazador se ubica desarrollándose adyacente en la orilla, Figura 2.

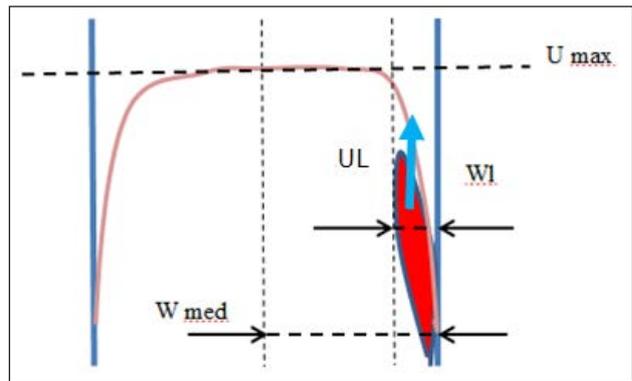


Figura 2. Distribuciones transversales de velocidades longitudinales y la pluma de trazador

Conociendo la velocidad máxima es posible calcular la velocidad media mediante la siguiente relación aproximada.

$$U \approx 0.93 \times U_{max} \quad [20]$$

Es claro ahora que para conocer la velocidad "local" de la pluma de trazador se debe conocer el ancho "local". Para este cálculo se usa la relación de Ruthven que enlaza la distancia longitudinal con parámetros transversales. Aquí ϵ_y el Coeficiente transversal de difusión.

$$X \approx \frac{0.31 \times U \times W_l^2}{\epsilon_y} \quad [21]$$

Por lo tanto el ancho "local" de la pluma de trazador, a un tiempo t , se puede establecer como en la Figura 3 y la siguiente ecuación.

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \epsilon_y \times t} \quad [22]$$

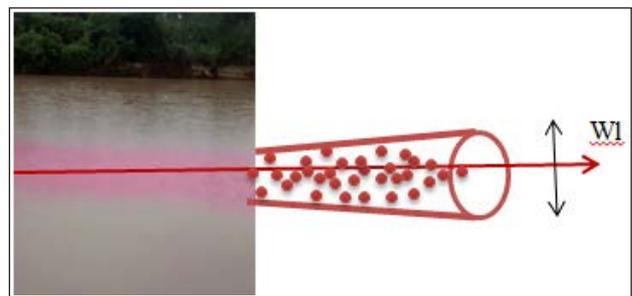


Figura 3. Estimación del ancho de la pluma por los trazadores

El Coeficiente transversal de difusión se calcula usualmente con una segunda ecuación de Elder, una vez se conozca la pendiente S_b , y la profundidad, h . La aceleración de la gravedad es g .

$$\epsilon_y \approx 0.23 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [23]$$

Como existe una relación definida entre el Coeficiente longitudinal de dispersión, E , función del tiempo, y el coeficiente transversal de difusión (también función del tiempo), a veces se prefiere calcular el segundo a partir del primero, obviando el conocimiento directo de la pendiente.

$$\varepsilon_y(t) \approx \frac{E(t)}{25.8} \quad [24]$$

4. METODOLOGIA:

4.1. Fundamentos

Los trazadores en el método analizado en este artículo se van a utilizar fundamentalmente para describir la distribución lateral de velocidades que es válida para un experimento dado. En concreto, a partir del ancho "local" y velocidad "local" de la riada de soluto en el punto de medición se calcula la velocidad media del cauce. De allí, a partir de las relaciones potenciales de Leopold-Maddock, E_c [4] y E_c [3], cuyas constantes de definición se hallan con los datos del IDEAM, se determinan el caudal y nivel reales.

En una segunda fase se calculan los constantes para los modelos potenciales de geomorfología y a partir de ellos, más la observación directa de la rugosidad superficial, se calcula la pendiente. Este valor se constata mediante el cálculo alterno por medio de la Ecuación de Elder, usando los datos correspondientes de trazador.

4.2. Aplicación específica de la metodología a un cauce ancho en la región central de Colombia.

Se aplica la metodología al Rio Negro en la región de Cundinamarca en Colombia. Las condiciones encontradas en el cauce para el día de la medición (primeros días de agosto) corresponden a las de estiaje. De acuerdo con los datos del IDEAM para la estación hidrometeorológica "Guaduro" (23067050) el mes de agosto es tradicionalmente el más seco, con caudal mensual medio de $Q=31,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y mínimo de $Q=6.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Su curso es de anchura variable (100m-30m) con una media estimada de $W \approx 60 \text{ m}$. Figura 4



Figura 4. Aspectos del Rio Negro en "Guaduro"

5. RESULTADOS:

5.1. Experimentos de trazador

Dadas las condiciones del cauce, se procuró hacer unos vertimientos a relativa larga distancia, $X_1=365 \text{ m}$ y $X_2=500 \text{ m}$, con gran masa de trazador, de forma que la pluma cubriera una anchura significativa del cauce y representar aproximadamente bien la velocidad de transporte. Además se trató de hacer vertimientos en la parte central del cauce para que el trazador cubriera zonas amplias en el flujo.

Se utilizaron masas de Rodamina significativas para poder hacer visible el movimiento de las plumas. La Figura 5 muestra el avance de la pluma en diversos lugares, incluido el de la medición, aguas abajo. Nótese que la estrategia en este cauce muy ancho fue verter una gran cantidad de rodamina WT y dejar que evolucione en un tramo muy largo, de tal manera que la mancha cubra una porción significativa de semi-ancho y caracterice adecuadamente la distribución lateral de velocidades, condición necesaria para evaluar la velocidad media de todo el flujo en el tramo.

5.2. Resultados de los experimentos con trazador



Figura 5. Avance de la pluma de trazador en varios puntos, incluido el de medición.

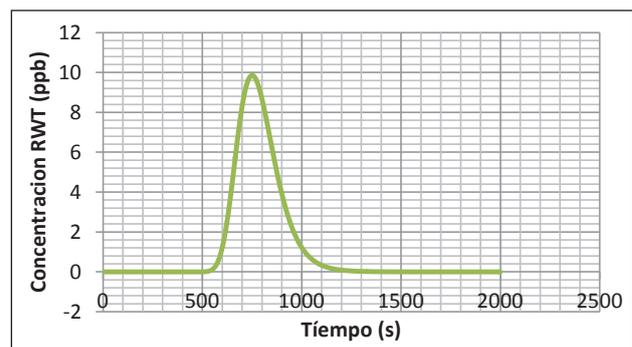


Figura 6. Curva de trazador modelada

A partir de los datos del equipo IDF con un vertimiento aguas arriba y una distancia $X= 365 \text{ m}$ y con una masa de 42 gramos aproximadamente de RWT se muestra la curva de modelación correspondiente. Figura 6.

5.3. Datos básicos del trazador

En el tramo escogido del Río Negro, se hizo un vertimiento de RWT a una distancia de $X=365 \text{ m}$ y con $m=42 \text{ gramos}$ de RWT. Los datos correspondientes a las modelaciones logradas se muestran en el Cuadro 1. Pese a la gran variación del ancho un valor representativo es cercano a $W\approx 60 \text{ m}$.

$X=365 \text{ m}$	$t_0= 762 \text{ s.}$
$M \text{ (masa)}= 42 \text{ g (RWT)}$	$W \text{ (Ancho medio estimado)}\approx 60 \text{ m}$
$U \text{ (velocidad media)}=0.48 \text{ m/s}$	$\phi=0.27$

Cuadro 1. Resumen de datos básicos del trazador

5.4. Análisis de los datos de series históricas de la estación limnométrica del IDEAM: Correlaciones potenciales (Leopold-Maddock) para Q-h (nivel- caudal) y Q-U (velocidad- caudal)

Se parte de la distribución cruda de pares (nivel- Caudal) debidamente clasificados. Se obtiene en seguida una curva potencial de regresión aproximada ($R^2= 0.8503$) que relaciona analíticamente los datos estudiados. Figura 7. La ecuación de la curva correspondiente es:

$$\bar{h} \approx 0.4227 \times Q^{0.3127} \text{ (m)} \quad [25]$$

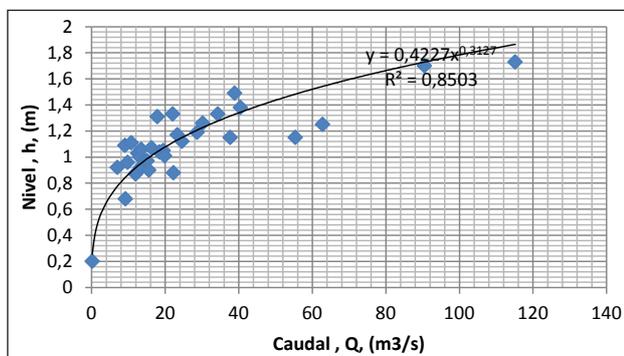


Figura 7. Distribución experimental y curva aproximada de correlación (h-Q)

Por lo tanto los parámetros potenciales correspondientes son: $c\approx 0.4227$ y $f\approx 0.3127$

Para desarrollar esta expresión aproximada se usa la distribución anterior (Nivel- Caudal) introduciendo la semi-anchura (ya que la velocidad varía simétricamente de una orilla al centro) y se modifica de acuerdo con la siguiente ecuación para obtener la distribución deseada (U-Q) asumiendo que el semi-Ancho aproximado del tramo es $W/2=30 \text{ m}$.

$$U \approx \frac{Q}{h \times W/2} \quad [26]$$

A partir de esta definición se puede hallar la segunda regresión potencial aproximada ($R^2= 0.9487$), la cual se muestra en la Figura 8. Su expresión potencial queda, con los parámetros potenciales correspondientes como $k\approx 0.062$ y $m\approx 0.7643$:

$$U \approx 0.062 \times Q^{0.7643} \quad [27]$$

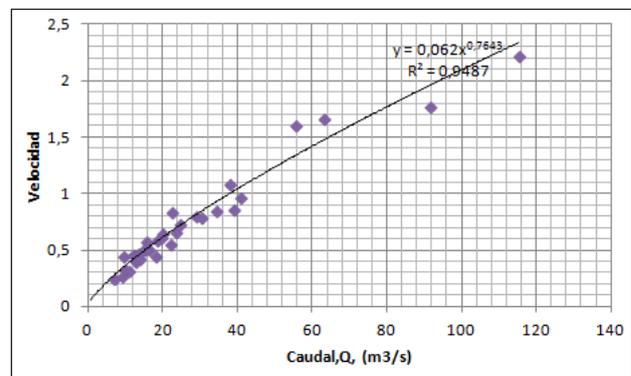


Figura 8. Distribución y curva de regresión correspondiente (U-Q)

5.5. Cálculo de la velocidad media en función del ancho de la pluma de trazador en el punto de medición

Se calcula inicialmente el Coeficiente Longitudinal de dispersión en el sitio indicado, asumiendo que la velocidad media es la dada por el trazador.

$$E \approx \frac{\phi^2 \times U^2 \times 0.215 \times t}{2} \approx \frac{(0.27)^2 \times (0.48)^2 \times 0.215 \times 762}{2} \approx 1.38 \text{ m}^2 / \text{s} \quad [28]$$

Se calcula entonces el Coeficiente transversal de difusión, Ec. [24]:

$$\varepsilon_y(t) \approx \frac{E(t)}{25.8} \approx \frac{1.38}{25.8} \approx 0.054 \text{ m}^2/\text{s} \quad [29]$$

Luego se utiliza la Ec. [22] y los datos del Cuadro 1 de los datos del trazador.

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t} \approx \sqrt{(3.22 \times 0.054 \times 762)} \approx 11.5 \text{ m} \quad [30]$$

Por lo tanto, la razón $W_l/(W/2)$ es:

$$\frac{W_l}{(W/2)} \approx \frac{11.5}{(60/2)} \approx \frac{11.5}{30} \approx 0.38 \quad [31]$$

Con este dato concreto se grafica su correspondiente razón U_l/U_{mx} en la Figura 9. Por lo tanto la relación de velocidades correspondiente es:

$$\frac{W_l}{(W/2)} \approx 0.38 \Rightarrow \frac{U_l}{U_{max}} \approx 0.90 \quad [32]$$

Esto quiere decir que la velocidad máxima es:

$$U_{Mxm} \approx \frac{U_l}{0.90} \approx \frac{0.48}{0.90} \approx 0.53 \quad [33]$$

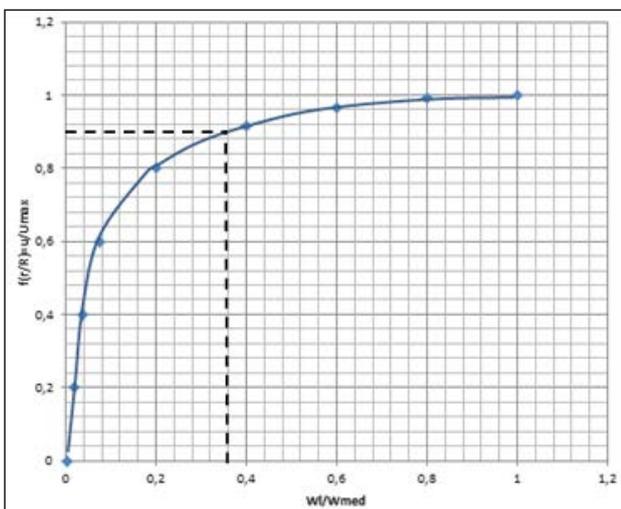


Figura 9. Relación entre las razones de ancho y velocidad para el tramo.

Si se quiere conocer la velocidad media del flujo en el tramo se calcula así:

$$U \approx 0.93 \times 0.53 \approx 0.50 \text{ m/s} \quad [34]$$

Se demuestra de esta forma que cuando la pluma de trazador cubre significativamente el flujo (casi un 40% del semi ancho) y el tubo de corriente por el que avanza el trazador lleva sus partículas llenando uniformemente la sección transversal del mismo (en "mezcla completa ya que $\phi < 0.38$) entonces la velocidad media medida por el instrumento IDF ($U=0.48 \text{ m/s}$) es virtualmente la misma velocidad media del flujo calculada ($U=0.50 \text{ m/s}$).

5.6. Cálculo del caudal y nivel actuales para el tramo medido

Con este dato de la velocidad media $U=0.50 \text{ m/s}$ en firme se calcula entonces el valor del caudal utilizando la distribución potencial de Leopold-Maddock de la Ec. [27]

$$Q \approx \left(\frac{U}{0.062} \right)^{\frac{1}{0.7652}} \approx \left(\frac{0.50}{0.062} \right)^{1.31} \approx 15.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad [35]$$

Con este dato en firme del caudal real sobre el flujo se calcula ahora el nivel real en ese mismo tramo, Ec. [25]:

$$\bar{h} \approx 0.4227 \times Q^{0.3127} (\text{m}) \approx 0.4227 \times (15.4)^{0.3127} \approx 1.0 \text{ m} \quad [36]$$

Para un cauce muy ancho la profundidad (nivel) es el mismo Radio hidráulico:

$$\bar{h} \approx R_h \approx 1.0 \text{ m} \quad [37]$$

5.7. Cálculos de geomorfología (pendiente) en el tramo estudiado a partir de los modelos potenciales y la observación directa de la rugosidad superficial

Para hallar valores aproximados que se ajusten congruentemente se plantean las ecuaciones de Leopold-Maddock para este tipo de parámetros, Ec. [5] y Ec. [6]

$$S_b = p Q^z \quad [38]$$

$$n \approx q Q^y \quad [39]$$

Además las siguientes ecuaciones auxiliares, Ec. [9] y Ec. [10]

$$k = p^{\frac{1}{2}} \times c^{\frac{2}{3}} \times q^{-1} \quad [40]$$

$$m = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - y \quad [41]$$

En el desarrollo anterior se aclaró que: $m \approx 0.7643$, $k \approx 0.062$, $c \approx 0.4227$ y $f \approx 0.3127$. A modo de hipótesis se acepta en principio el valor típico usado por Leopold de $z \approx -1/2$. Por lo tanto el exponente y vale:

$$y = \frac{2f}{3} + \frac{z}{2} - m = \frac{2 \times 0.3127}{3} + \frac{-1}{4} - 0.7643 \approx -0.81 \quad [42]$$

Para resolver la Ec. [39] y determinar q es necesario determinar la rugosidad por el procedimiento usual reseñado en el texto de V.T. Chow (Chow V., 1983) mediante el siguiente Cuadro 2, que alimenta la siguiente relación de estimación:

$$n \approx m_s (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad [43]$$

Ítem	Condiciones	Valor
1. Material del lecho	Gran distribución de grava fina y algo de grava gruesa	N0 \approx 0.025
2. Grado de irregularidad	suave	N1 \approx 0.005
3. Variaciones de la sección transversal	Frecuentemente alternante	N2 \approx 0.010
4. Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	N3 \approx 0.005
5. Vegetación	Baja	N4 \approx 0.005
Suma		$\Sigma = 0.050$
6. Multiplicador: Grado de efecto por los meandros	Apreciable	1.15
Resultante		N \approx 0.058

Cuadro 2. Estimación de la rugosidad superficial para el tramo

Por lo tanto:

$$n \approx 0.058 \approx q Q^{-0.81} \quad [44]$$

Y entonces:

$$q \approx 0.058 \times \frac{1}{Q^{-0.81}} \approx 0.058 \times 15.3^{0.81} \approx 0.53 \quad [45]$$

Y finalmente para hallar p se tiene:

$$p^{\frac{1}{2}} \approx \frac{k \times q}{c^{\frac{2}{3}}} \quad [46]$$

O sea:

$$p \approx \left(\frac{k \times q}{c^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \approx \left(\frac{0.062 \times 0.53}{(0.4227)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \approx 0.0034 \quad [47]$$

Y la pendiente es:

$$S_b = \frac{0.0034}{\sqrt{15.3}} \approx 8.7 \times 10^{-4} \quad [48]$$

Se verifica la validez de este valor mediante la ecuación de Chezy-Manning:

$$U \approx \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n} \times \sqrt{h \times S_b} \approx \frac{1.0^{\frac{1}{6}}}{0.058} \times \sqrt{1.0 \times 0.00087} \approx 0.51 \text{ m/s} \quad [49]$$

Esta coincidencia entre el cálculo de la velocidad media por el modelo potencial de Leopold-Maddock y la aplicación de la ecuación aproximada de Chezy-Manning con un error del 2% es una primera indicación de la congruencia interna y certeza de los resultados de la aplicación de esta metodología.

5.8. Verificación de la geomorfología según Elder

Hay una forma adicional, directa de verificar este dato de la pendiente hallado a partir de la evaluación de la rugosidad según Manning y el modelo potencia de Leopold-Maddock. Este método alterno es usando la ecuación de Elder. Un primer paso es despejar la pendiente de la ecuación de Elder. Luego se igualan las dos definiciones de la velocidad, Ec. [13] y [14] y de allí se define una función de "estimación óptima", F , la cual en el caso ideal debe valer exactamente el Coeficiente numérico de Elder, $F=5.93$

$$S \approx \frac{E^2}{35.2 \times h^3 \times g} \quad [50]$$

Y

$$F \approx \phi^2 \times 0.215 \times t \times \left(\frac{C^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{S_b}{h \times g}} \quad [51]$$

$$E \approx \sqrt{(S_b \times 35.2 \times h^3 \times 9.81)} \approx \sqrt{(0.00087 \times 35.2 \times 1.0^3 \times 9.81)} \approx 0.55 \text{ m}^2 / \text{s} \quad [52]$$

Se calcula el coeficiente de resistencia de Chezy, necesario para calcular la función de estimación:

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}} \approx \frac{0.50}{\sqrt{1.0 \times 0.00087}} \approx 17.0 \text{ m}^{1/2} / \text{s} \quad [53]$$

En el caso presente del Rio Negro, se quiere es verificar el valor de la pendiente ($S_b \approx 0.0007$) entonces se hace cambio y más bien se calcula el valor correspondiente del Coeficiente Longitudinal de dispersión (que como se sabe no es constante) y con este valor concreto se calcula la función de estimación, la cual debe dar muy cercana al valor ideal de 5.93. Entonces:

Se despeja el siguiente factor de la definición de E :

$$\phi^2 \times \tau \approx \frac{2E}{U^2} \approx \frac{2 \times 0.55}{0.50^2} \approx 4.40 \text{ s} \quad [54]$$

Se calcula finalmente F , la función de estimación para verificar si vale el ideal de 5.93:

$$F \approx \phi^2 \times \tau \times \left(\frac{C^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{S}{h \times g}} \approx 4.40 \times \left(\frac{17.0^2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{0.00087}{1.0 \times 9.81}} \approx 5.99 \quad [55]$$

Esta es una aproximación bastante aceptable (1.0%), teniendo en cuenta las aproximaciones en los distintos cálculos, por lo tanto queda mostrada fehacientemente la congruencia de los diferentes valores.

6. CONCLUSIONES:

- 1.- Se plantea un método de análisis integral de cauces en el que los diversos campos (hidráulica, transporte de masa y geomorfología) son interconectados de manera congruente a partir de los modelos potenciales de cauce (Leopold-Maddock) y un nuevo concepto en la evolución de los trazadores. Se aplica este procedimiento a resolver un cauce muy ancho en la región central de Colombia. Para esto se manipulan los valores estadísticos Nivel-caudal de una estación limnimétrica del IDEAM.
- 2.- Dentro de las innovaciones conceptuales introducidas en la teoría de trazadores se acepta que los coeficientes de transporte son funciones del tiempo. Usando entonces la ecuación de Elder es posible estimar el valor aproximado de la pendiente mediante su manipulación en el tiempo.
- 3.- Con los datos de trazador, asumiendo un valor dado para la anchura, se obtiene una distribución aproximada Velocidad media-Caudal. Luego, a partir de los datos de la estación limnimétrica cercana se obtienen los coeficientes potenciales de los parámetros geométricos e hidráulicos del tramo considerado. Estos datos son verificados entonces por los datos de trazador.
- 4.- La aplicación ordenada de este procedimiento va a permitir caracterizar cauces muy anchos utilizando

medios limitados, y lo más importante estos datos serán altamente congruentes, muy útiles a la hora de calibrar modelos hidráulicos o de calidad de agua.

BIBLIOGRAFIA

- Christofolletti, A. (1981). La noción de equilibrio en geomorfología fluvial. *Revista de Geografía Norte Grande*, 8: 69-86.
- Constaín, A.J y Lemos R.A. (2011). Una ecuación de velocidad media del flujo en régimen no uniforme, su relación con el fenómeno de dispersión como función del tiempo y su aplicación a los estudios de calidad de agua. *Revista Ingeniería Civil*, No 164, CEDEX, Pp 114-135.
- Constaín, A., Peña, C., Mesa, D. y Acevedo, P. (2014). Svedberg's number in diffusion processes. 2014 International Conference in hydraulic resources. Santorini.
- Fischer, H.B. (1967). The mechanics of dispersion in natural streams. *Journal of the Hydraulics division*, November, Pp. 187-216.
- Elder, W.J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear Flow. *Journal of Fluid Mechanics / Volume 5 / Issue 04 / May 1959*, pp 544- 560
- Leopold, L.B. y Maddock T.(1953).The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. USGS paper 252.
- Chow V.T. (1983). Hidráulica de canales abiertos. Editorial Diana, México.

IDENTIFICACIÓN DE LOCALIDADES RURALES DE QUERÉTARO, MÉXICO, PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE DESINFECCIÓN SOLAR EN AGUA DE LLUVIA CAPTADA

IDENTIFYING RURAL COMMUNITIES OF QUERETARO, MEXICO, WHERE RAINWATER HARVESTING AND ITS SOLAR DISINFECTION MAY BE IMPLEMENTED

Duhne-Ramírez, Marcela Susana¹; Domínguez-Cortazar, Miguel Ángel²; Ventura-Ramos, Eusebio²; Ruiz-González, Israel¹

Resumen

El acceso al agua potable es una necesidad de la población; sin embargo, hoy en día aún hay localidades sin acceso a fuentes mejoradas de agua potable. En México, esto representa a más de 7 millones de habitantes. En la presente investigación se realiza una evaluación multicriterio (EMC) con el fin de jerarquizar las poblaciones con una mayor necesidad y factibilidad para implementar captación pluvial, y posteriormente desinfección solar en las mismas. Por lo cual, se identificaron las localidades rurales del estado de Querétaro cuya población no tiene acceso al agua potable. Para el análisis espacial se utilizó el software ArcGIS 9.3. Ocho, fueron los criterios considerados para la evaluación, siendo el principal, en lo social, el índice de marginación y, análogamente en los criterios climatológicos, el principal fue la precipitación media anual (PMA). Las alternativas fueron las localidades de más de 50 y menos de 2500 habitantes, en las cuales ninguna de sus viviendas tiene acceso al agua potable en su terreno, de acuerdo al Censo de Población y Vivienda de México del 2010. Posteriormente, a cada alternativa se les asignó un valor por cada criterio el cuál se estandarizó en una escala de 0 a 1 y multiplicó por un factor de ponderación por criterio para obtener un valor por alternativa. Los resultados obtenidos fueron 138 alternativas identificadas, las cuales se jerarquizaron obteniendo valores entre los rangos de 0.414 y 0.7397. De esta manera, se cumplió con el objetivo de la investigación y se observa que la EMC con apoyo de sistemas de información geográficos es una alternativa para identificar localidades aptas para implementar desinfección solar en agua de lluvia captada. Posterior a esta investigación, se requiere ir a las diferentes localidades para verificar la información y las condiciones de cada localidad.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, evaluación multicriterio, sistemas de captación pluvial

ABSTRACT

Access to drinking water is a population need; however, currently there are still communities without access to safe sources of drinking water. In Mexico, this situation represents more than 7 million inhabitants. In this study, a multi-criteria analysis (MCA) was performed with the purpose to prioritize communities with a greater need and feasibility to implement rainwater harvesting followed by solar disinfection. Rural communities with no access to drinking water were identified in the state of Queretaro. For the spatial analysis, the software ArcGIS 9.3 was used. Eight criteria were considered for the evaluation, with the index of marginalization, and the mean annual precipitation (MPA), being the most important social and climatological criteria, respectively. The alternatives were communities with more than 50 and less than 2500 inhabitants without access to drinking water, according to the 2010 Population and Housing Census of Mexico. Each alternative was assigned a value for each criterion, which was standardized on a scale from 0 to 1 and multiplied by a weighting factor per criterion to obtain the value for the alternative. The results obtained were 138 identified alternatives, which were prioritized with values bearing from 0.414 to 0.7397. In this way, the goal of the study was achieved and it was observed that MCA with the support of geographical information systems is an alternative to identify communities subject to the implementation of solar disinfection in the rainwater harvested. Following this research, it is necessary to visit the different communities to verify the information and the local conditions.

Key words: geographic information systems, multi-criteria decision analysis, rainwater harvesting systems

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para vida en la Tierra, sin embargo, únicamente el 0.1 por ciento de ésta, es apropiada para consumo humano. La disponibilidad de ésta varía por ubicación geográfica y temporalmente (Conagua, 2014), lo cual representa una posible escasez de este recurso en ciertos lugares o tiempos, ésta se acentúa en las comunidades rurales

dónde el abastecimiento de agua potable mediante redes no es una opción viable, puesto que las casas no siempre se localizan cercanas entre sí. De acuerdo al Informe del 2014 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), 783 millones de personas aún no tienen acceso a fuentes mejoradas de agua potable (ONU, 2014); en México, esto representa más de

¹ División de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Teléfono: (+52 442) 192 1200 ext. 3591. marcela.duhne@uaq.mx

² Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro.

siete millones de habitantes (Conagua, 2014) que viven en localidades con menos de 2500 habitantes en una superficie de 100 km² (Villalazo *et al.*, 2002) y no tienen acceso a 100 L/persona/día de agua potable para utilizar en las actividades de consumo, saneamiento, lavado de ropa, preparación de alimentos e higiene personal y doméstica (OACDH, 2011). Estas comunidades, debido a su dispersión y baja población, carecen de acceso al agua potable y deben satisfacer sus necesidades más básicas acudiendo a fuentes de abastecimiento públicas, adquiriendo el agua a través de pipas (camiones que la distribuyen), o recorriendo grandes distancias para dotarse del agua de manantiales. En este contexto, se plantea como alternativa para la obtención de agua, la captación pluvial.

La captación pluvial es una técnica que comenzó como una forma rudimentaria de irrigación hace más de 5000 años en Mesopotamia, la cual, debido a la contaminación microbiológica y mineral del agua superficial y subterránea, así como la escasez del recurso, se ha vuelto más relevante a nivel mundial en la actualidad. Esta técnica, implementada a pequeña escala por medio de techumbres, se utiliza como abastecimiento de agua potable para uso doméstico. Los componentes básicos de dicho sistema son el área de captación o techumbre, el sistema de conducción (canaletas y tuberías), cisterna o estructura de almacenamiento con su tubería de drenado y tubería de exceso, y un sistema de tratamiento (al menos desinfección) (Jordan *et al.*, 2008). Para su diseño se requiere considerar la precipitación media anual (PMA), la demanda de agua a cubrir, el tamaño del techo y la calidad del agua, con el fin de poder dimensionar la cisterna a implementar así como el sistema de tratamiento del agua (Anaya & Martínez, 2007).

Cabe destacar que, pese a que el agua de lluvia se considera como no contaminada, su calidad es alterada debido a la contaminación atmosférica, la contaminación animal y vegetal, la condición y tipo de material que compone el techo, así como la ubicación y condiciones de almacenamiento de la misma (Ahammed & Meera, 2006; Jordan *et al.*, 2008). Por tal motivo el agua de lluvia requiere de un tratamiento previo a su consumo y uso doméstico. La revisión de la literatura indica que los sistemas de captación de agua de lluvia contaminan el agua captada principalmente microbiológicamente (Ahammed & Meera, 2006). La presencia de microorganismos como virus, bacterias y parásitos, causan enfermedades gastrointestinales, las cuales son el principal problema de salud en México. Los niños menores de cinco años son el grupo más vulnerable a este tipo de padecimientos que provocan diarrea aguda y, en ocasiones, muerte por deshidratación (Conagua, 2007). Las enfermedades se pueden reducir asegurando que toda persona tenga acceso a siete litros al día de agua potable para beber, cocinar, limpiar alimentos y lavarse las manos.

Para asegurar la calidad del agua captada, se plantea la desinfección solar como método de tratamiento, ya que no genera residuos, como la aplicación de cloro, ni requiere de una fuente de energía externa, como el fuego. Este método utiliza la radiación ultravioleta tipo A y radiación infrarroja (responsable de incrementar la temperatura) para inactivar las células de los microorganismos, como mencionan Solarte *et al.* (1997) y Bosshard *et al.* (2010) en sus investigaciones de *Vibrio cholerae* y *Escherichia coli*, respectivamente. Para realizar una desinfección solar se requiere tener un fluido almacenado o fluyendo en un contenedor o tubo transparente por la parte superior para que la radiación penetre al fluido. A su vez, el contenedor se pinta de color negro por la parte inferior permitiendo que el agua aumente de temperatura. La variable que se requiere monitorear para poder realizar este procedimiento de desinfección solar es la radiación solar medida en Wh/m² por día. Ésta se puede obtener por medio de estaciones climatológicas con piranómetros. Se requiere un valor mayor a 500 W/m² para poder realizar la desinfección solar (Solarte *et al.*, 1997).

La evaluación multicriterio (EMC) es la metodología utilizada en la presente investigación. Ésta corresponde a un conjunto de técnicas estadísticas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, ya que permite describir, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar un número de alternativas partiendo de múltiples criterios y objetivos en conflicto (Gómez & Barredo, 2006). La EMC integra el uso de Sistemas de Información Geográficos (SIG) para llevar a cabo procedimientos espaciales y temáticos simultáneos de análisis. La EMC que se aplicó en esta investigación tiene el objetivo de identificar y priorizar las comunidades rurales del estado de Querétaro sin acceso al agua potable aptas para implementar captación pluvial y desinfección solar del agua recolectada. Por lo cual, adicional a los criterios climatológicos inherentes a los lugares a evaluar como la precipitación media anual y la radiación, se consideraron criterios socioeconómicos. Estos buscan priorizar y analizar la viabilidad de implementar proyectos de captación pluvial y desinfección solar en las comunidades rurales. La principal variable a considerar es el índice de marginación. Acorde a De la Vega *et al.* (2012), el índice de marginación es una medida-resumen que permite diferenciar localidades del país según el impacto global de las carencias que padece la población y busca establecer un parámetro analítico que permita entender cuándo un sector de la sociedad se encuentra en una situación donde no están presentes las oportunidades para el desarrollo, ni la capacidad para encontrarlas. El Consejo Nacional de Población (CONAPO), desde 1990, considera tres dimensiones (educación, vivienda e ingreso) de la marginación de las localidades las cuales componen este índice. Asimismo, este índice es utilizado por la Secretaría de Desarrollo

Social y la Comisión Nacional del Agua para dar prioridad en la asignación de recursos económicos. Por otro lado, también se debe considerar que la presencia de instituciones como escuelas y centros de salud indican la posibilidad de a través de las mismas capacitar a la población, habiendo así foros existentes dónde la población se reúne.

2. METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio: Estado de Querétaro

La zona de estudio es el Estado de Querétaro, en México. Éste se ubica geográficamente en el centro de la república y tiene una superficie de 11699 km². Su extensión representa el 0.6 por ciento del territorio nacional y lo ubica en el lugar 27 por extensión territorial a nivel nacional.

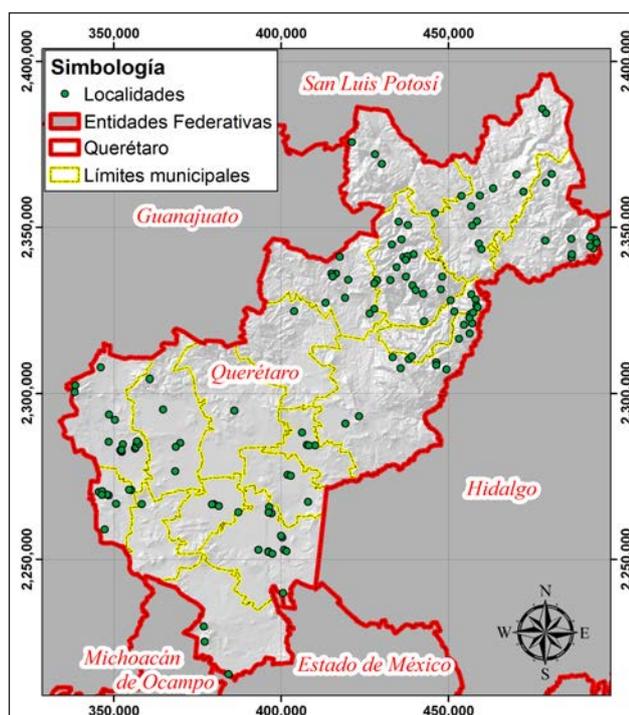


Figura 1. Localidades rurales del Estado de Querétaro, México, con más de 50 habitantes y 3 viviendas que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas.

Acorde al Censo de Población y Vivienda del 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2011), este estado tiene 1 827 937 habitantes, de los cuales el 30 por ciento vive en 2631 comunidades rurales. El 97 por ciento de dicha población reside en 1275 localidades con más de 50 habitantes y 3 viviendas habitadas. El número de localidades que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas es de 138, lo que representa un total de 21426 habitantes que no disponen de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno, por lo cual deben satisfacer su necesidad mediante suministro con redes públicas, pipas, pozos, ríos,

arroyos, lagos u otro. La población que habita en dichas comunidades se ubica principalmente en los municipios de Pinal de Amoles (14.3%), Landa de Matamoros (11.9%), Querétaro (11.8%), Corregidora (10.8%) y Cadereyta de Montes (10.7%), como se muestra en la Figura 1. Por último, el 77.4 por ciento de las localidades rurales con más de 50 habitantes y 3 viviendas tienen un índice de marginación alto o muy alto (Figura 2).

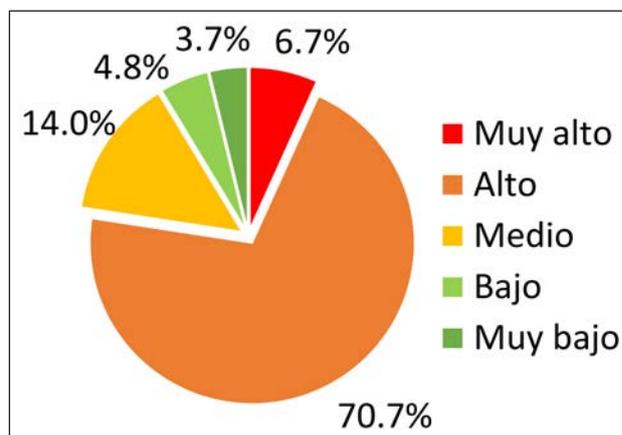


Figura 2. Índice de marginación de localidades rurales del Estado de Querétaro. (Fuente: CONAPO, 2010).

Hidrológicamente, el Estado de Querétaro es cruzado por el parteaguas continental que divide las aguas superficiales en dos vertientes como se presenta en la Figura 3. La parte suroeste del estado corresponde a la región hidrológica Lerma-Santiago (No. 12), la cual fluye al lago de Chapala y posteriormente vierte hacia el Océano Pacífico. Por otro lado, el norte del estado pertenece a la región hidrológica del Pánuco (No. 26), ésta cuenca desemboca en el Golfo de México e irriga la parte oriental. Entre los ríos principales de cada región hidrológica se encuentran el río El Pueblito y Querétaro, y el río Moctezuma, el Extoraz y el Santa María, pertenecientes a las regiones hidrológicas número 12 y 26, respectivamente. Los principales cuerpos de agua son las presas Zimapán, Constitución de 1917, San Ildefonso, Centenario, Santa Catarina, La Llave, Jalpan y La Soledad; así como la laguna del Divino Redentor. Las presas almacenan 268 millones de m³ de agua superficial. La precipitación media anual del estado es de 763 mm y la temperatura media anual es de 18°C. Cabe destacar que de acuerdo a la clasificación climatológica del INEGI, el clima es seco y semiseco en la mayor parte del estado, ubicándose en la porción central del mismo. Esta región se caracteriza por un índice bajo de precipitación y temperaturas entre los 7°C y 14°C. Al sur del estado hay climas templados subhúmedos con temperatura estable entre los 12°C y 18°C, con precipitaciones abundantes en verano y un período de sequía en el invierno. Finalmente, al norte se tienen climas cálidos y semicálidos que prevalecen

en la Sierra Gorda, las temperaturas promedio en las áreas bajas oscilan entre los 18°C y 28°C, y la precipitación media anual es de 850 mm, mientras que en la zona montañosa se tienen temperaturas entre los 14°C y 20°C, así como precipitación media anual de 1270 mm.

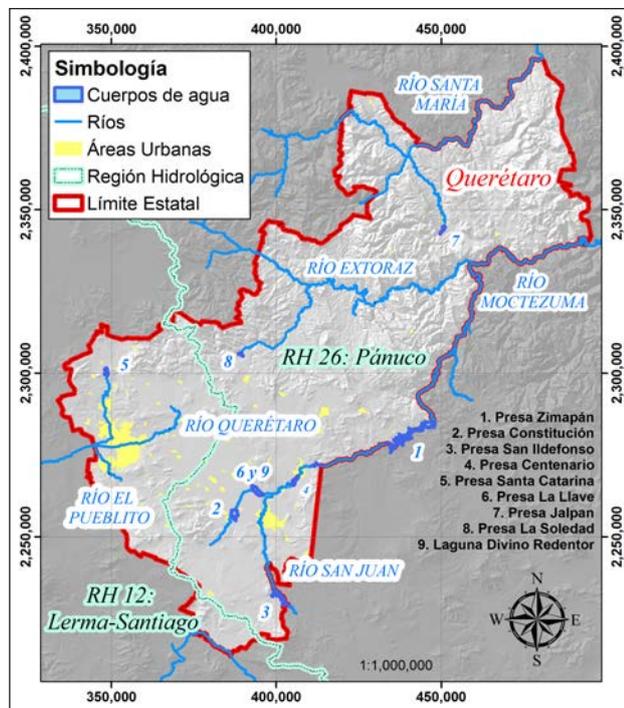


Figura 3. Mapa hidrológico del Estado de Querétaro.

2.2 Evaluación Multicriterio (EMC)

Para lograr la identificación de comunidades rurales con potencial para captación pluvial y su posterior desinfección solar, se realizó una Evaluación Multicriterio (EMC) (Gómez y Barredo, 2006), utilizando la información existente de diversas fuentes disponibles a nivel nacional, en México. De INEGI (2011) se obtuvo de manera tabular la información estadística de las localidades del Estado de Querétaro con menos de 2500 habitantes actualizada al censo de población del 2010 y la ubicación geográfica de las mismas en formato vectorial (extensión *shape*). De la Gerencia de Energías No Convencionales (2010) se consultó el Explorador de Recursos Renovables, herramienta generada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, para obtener los valores puntuales (por localidad) de la Irradiación Solar Global para México del 2008 y 2009. Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2012) se obtuvo las precipitaciones medias normales de las estaciones ubicadas en Querétaro y a 5 km del límite estatal para el periodo 1981 – 2010 (estas normales climatológicas la Comisión Nacional del Agua las publica de manera mensual), así como los días de lluvia en promedio por año. De la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) se obtuvo de manera tabular el índice de marginación

calculado por CONAPO en 2010 (De la Vega *et al.*, 2012). Para analizar los datos se utilizó el software Excel, para la información tabular, y la plataforma ArcGIS 9.3, para manejar las capas con información georreferenciada (ESRI, 2008).

Primero, se definió las alternativas a evaluar: localidades rurales del Estado de Querétaro. De acuerdo a la definición del INEGI, son poblaciones con menos de 2500 habitantes (criterio adaptado desde el Censo de Población de 1970 por el INEGI). Únicamente se consideraron aquellas con ninguna vivienda particular habitada con agua entubada dentro de la vivienda o en el terreno de la misma. Asimismo, se consideraron localidades con más de 3 viviendas habitadas, ya que debido al principio de confidencialidad que marca la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, el INEGI no genera información para unidades geográficas que tienen menos de tres viviendas. Por último, se identificó que del 81.7 por ciento de la población que habita en las comunidades antes descritas tiene más de 50 habitantes y habita en menos del 40 por ciento de las localidades.

En seguida, cada alternativa se caracterizó con base a los criterios o factores. Éstos fueron la base para la toma de decisión. Cada criterio se convirtió en el sistema de información geográfica (SIG) a una capa de información, por lo cual se les da el nombre de capa-criterio. A las localidades seleccionadas se les definieron los valores para los criterios sociales (número de habitantes por localidad, número de habitantes promedio por vivienda, índice de marginación, red pública de agua potable disponible y presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales) y climatológicos (PMA, número de días con lluvia en el año y radiación solar global), mostradas en la Tabla 1. En caso de no contar con la información tabular correspondiente a la localidad, ésta se obtuvo mediante interpolación espacial. Asimismo, estos criterios se estandarizaron a una escala de valores entre cero y uno para la presente investigación.

La estandarización de los valores de cada criterio se realizó mediante funciones de transformación o mediante la asignación de un valor adimensional. Se utilizó asignación de valores adimensionales para los criterios de índice de marginación (ver Tabla 2), red pública de agua potable disponible, presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales (escuelas, centro de salud y tienda comunitaria) y precipitación media anual. El criterio de red pública de agua potable disponible se obtuvo del censo de población y vivienda, con esta información se buscó favorecer a las localidades en donde no había identificada una red pública de agua potable (valor de 1); por otro lado, con el criterio de presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales se identificaron las localidades con centro de salud y/o escuelas (preescolar,

primaria, secundaria y preparatoria); cabe destacar que para ambos criterios, las localidades cuya información no estuvo disponible se definió un valor de 0.5. Con el criterio de precipitación media anual, se buscó favorecer a las regiones que presentaron una menor precipitación media anual considerando que es ahí donde las necesidades de agua potable son mayores, éstos se muestran en la Tabla 3 y no hay una base técnica que sustente los valores mostrados en la misma.

Tabla 1. Resumen de variables consideradas en el estudio, sus rangos e unidades.

Variable	Rango	Unidades
Índice de marginación (Clasificación CONAPO)	Muy bajo a muy alto	No aplica
Número de habitantes por localidad	51 a 790	habitantes
Número de habitantes promedio por vivienda	3 a 9	habitantes por vivienda
Red pública de agua potable disponible	SI, NO o Sin información disponible	No aplica
Presencia de instituciones para apoyar la implementación social	“No hay” a “Existen tres instituciones”	No aplica
Precipitación media anual	250 a 1650	mm
Número de días con lluvia en el año	32 a 105	días
Radiación Solar Global	5.98 a 6.08	kWh/m ² por día

Tabla 2. Valores estandarizados para el criterio: Índice de Marginación para propósitos de la EMC.

Índice de marginación (Clasificación CONAPO)	Valor
Muy alto	1
Alto	0.75
Medio	0.5
Bajo	0.25
Muy Bajo	0

Tabla 3. Valores estandarizados para el criterio: PMA para propósitos de la EMC.

Rango de PMA	Valor
250 a 500 mm	1
500 a 750 mm	0.8
750 a 1000 mm	0.6
1250 a 1500 mm	0.4
1500 a 1650 mm	0.2

Por otro lado, se utilizaron funciones de transformación para el resto de los criterios, favoreciendo las localidades con más habitantes, mayor número de

habitantes promedio (considerando que la inversión se realizará por vivienda y esto representará beneficiar a una mayor población con una menor inversión), mayor número de días promedio con lluvia y mayor radiación solar diaria. La función de transformación que se utilizó para obtener la escala normalizada de 0 a 1 de cada uno de los criterios se presenta en la ecuación 1.

$$m_i = \frac{x_i - \min.x_i}{\max.x_i - \min.x_i} \quad (1)$$

Dónde, m_i es el valor estandarizado del criterio de priorización i , x_i es el valor a estandarizar, $\min.x_i$ es el valor mínimo de dicho criterio y $\max.x_i$ es el valor máximo del mismo. (Barba-Romero y Pomerol, 1997).

Con los criterios estandarizados, se aplicó la regla de decisión, la cual constituye la superposición de las diferentes capas-criterio en un sólo conjunto de datos. La evaluación o aplicación de la regla de decisión produjo finalmente el modelo de decisión que, para este estudio, correspondió a una jerarquización de las alternativas mediante una Sumatoria Lineal Ponderada (WLP en inglés, Eastman, 2002; Gómez y Barredo, 2006), mediante los valores de capacidad (r_i) más altos. La siguiente expresión (ecuación 2) define el modelo general de capacidad.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (2)$$

Dónde, r_i son los valores de capacidad de cada alternativa, w_j es el factor de ponderación para cada criterio j , x_{ij} son las alternativas valoradas en base al criterio j y n es el número de criterios involucrados.

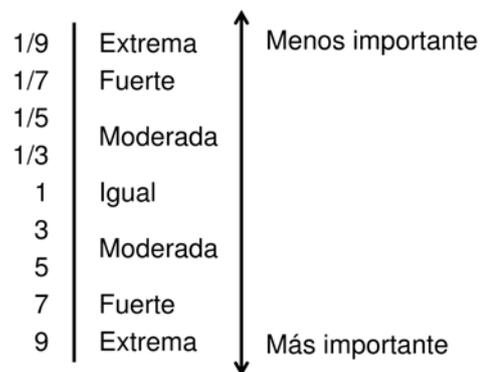


Figura 4. Escala de medida para asignar juicios de valor.

Para definir el factor de ponderación (w_j) para cada criterio, se utilizó el método de comparación de pares de Saaty propuesto en 1977, también conocida como la ponderación eigen-pesos por pares. Para ello, se generó una matriz cuadrada de comparación por pares, presentada en la tabla 4, de los ocho factores y en esta matriz se asignó en cada celda un juicio de valor (a_{ij}), que representa la importancia relativa de cada factor en la columna principal (i) con otros

de la fila principal (j). La escala de medida para la asignación de juicios de valor (a_{ij}), es una escala del tipo continuo (ratios o razón) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Saaty, 1980) y se muestra en la Figura 4. Asimismo, en la diagonal solamente se asignaron valores de uno, denotando la igualdad en la comparación de cada factor consigo mismo. Cabe destacar que los juicios de valor asignados se definieron con base a la descripción del problema en el presente estudio.

Una vez asignados los juicios de valor, se calculó el eigenvector principal de la matriz y, posteriormente, se normalizó para obtener los factores de ponderación (w_j) para cada criterio. Para obtener el eigenvector principal de la matriz, primero se normalizaron los valores al obtener el cociente entre cada valor y el valor de la sumatoria de cada columna. Posteriormente, los valores normalizados se sumaron por filas, obteniendo así el eigenvector principal. El cual se normalizó dividiendo entre el número de factores, obteniendo así el eigenvector principal normalizado que representa los pesos (w_j) de cada criterio. Una vez hecho esto, se calculó la consistencia mediante la razón de consistencia ($c.r.$), ver ecuación 3.

$$c.r. = c.i./r.i. \tag{3}$$

Dónde, $c.i.$ es el índice de consistencia, el cual se obtuvo de la siguiente manera: $c.i. = (\lambda_{MAX} - n)/(n - 1)$, siendo λ_{MAX} el valor del eigenvector máximo, obtenido a partir del producto del eigenvector principal normalizado por la matriz de comparación de factores; y n el número de factores en la matriz de comparación. Por otra parte, $r.i.$ es el índice aleatorio (Tabla 5), el cual representa el índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de la escala presentada en la Figura 4. En nuestro caso, el índice aleatorio obtenido de la tabla propuesta por Alonso & Lamata (2006) es de 1.4056 para una $n = 8$ (Tabla 5). Fue necesario asegurar un valor de razón de consistencia menor a 0.1, el cual indica que los juicios de valor asignados fueron satisfactorios.

Tabla 4. Matriz de comparación por pares.

FACTOR	HL	HV	IM	RP	IA	PM	DL	RS
HL	1	2	1/3	3	3	1/3	1	1
HV	1/2	1	1/5	2	2	1/5	1/2	1/2
IM	3	5	1	5	5	1	3	2
RP	1/3	1/2	1/5	1	1	1/4	1/2	1/2
IA	1/3	1/2	1/5	1	1	1/5	1/3	1/3
PM	3	5	1	4	5	1	3	2
DL	1	2	1/3	2	3	1/3	1	1
RS	1	2	1/3	2	3	1/2	1	1

Definición de variables: HL = número de habitantes por localidad, HV = número de habitantes promedio por vivienda, IM = índice de marginación, RP = red pública de agua potable disponible, IA = presencia de instituciones para apoyar la implementación social, PM = precipitación media anual, DL = número de días con lluvia en el año y RS = radiación solar.

Tabla 5. Índice aleatorio ($r.i.$) (Alonso & Lamata, 2006)

n	$r.i.$
5	1.1086
6	1.2479
7	1.3417
8	1.4056
9	1.4499
10	1.4854

Una vez estandarizados los valores obtenidos y teniendo los factores de ponderación, se procedió a multiplicar cada factor de ponderación por el valor estandarizado correspondiente a cada criterio, como indica la ecuación 2. Esto ponderó las alternativas y se generó un mapa con los resultados correspondientes, colocando la jerarquización de las comunidades aptas para la implementación de los sistemas de potabilización de agua captada y su desinfección con los colores verde, amarillo y rojas, dividiendo el total de localidades entre cada clase.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Estado de Querétaro existían 2637 localidades rurales de menos de 2500 habitantes, en 2010. De este total, 138 comunidades no contaban con agua potable en ninguna de sus viviendas, lo cual representaba un total de 21426 habitantes que no disponían de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno, por lo cual debían satisfacer su necesidad mediante suministro con redes públicas, pipas, pozos, ríos, arroyos, lagos u otro.

Utilizando la “Tabla 4. Matriz de comparación por pares”, se obtuvieron los factores de ponderación para cada uno de los criterios, los cuales se muestran en la Tabla 6. Ésta nos indica que el índice de marginación y la precipitación media anual fueron las variables más importantes, mientras que la presencia de instituciones para apoyar la implementación social las menos relevantes.

Tabla 6. Factores de ponderación para cada criterio.

Criterio	w_j , Factor de ponderación
Número de habitantes por localidad	0.11
Número de habitantes promedio por vivienda	0.06
Índice de marginación	0.26
Red pública de agua potable disponible	0.05
Presencia de instituciones para apoyar la implementación social	0.04
Precipitación Media Anual	0.26
Número de días con lluvia en el año	0.1
Radiación solar	0.12

Utilizando el modelo general de capacidad, presentado en la ecuación 2, se obtuvieron las 138 comunidades rurales en orden jerárquico. La Figura 5 muestra la clasificación de las localidades con mayor a menor valor obtenido en la EMC.

Asimismo, se presenta en la Tabla 6 las cinco localidades prioritarias para implementar desinfección solar de agua de lluvia captada. Éstas cinco comunidades tuvieron un índice de marginación muy alto de acuerdo a la clasificación de la CONAPO, Puerto de la Luz fue la localidad con más habitantes de las cinco presentadas con un total de 439 habitantes, mientras que el valor mínimo lo tuvo La Mesa Providencia con 76 habitantes. Mesa del Castillo (La Fajilla) y Puerto de la Luz tenían 7.7 y 5.5 habitantes en promedio por vivienda, respectivamente, mientras las otras tres localidades tenían valores cercanos a la media, es decir, 4.7 habitantes en promedio por vivienda. Tres de las cinco localidades tenían escuelas o centros de salud en la localidad y no tenían red de agua acorde al Censo de Población del 2010 (la información de este criterio para las localidades Mesa del Castillo (La Fajilla) y La Mesa Providencia no estaba disponible al tener menos de 50 viviendas). La Mesa Providencia fue la localidad que tuvo un menor valor de PMA (296.8 mm) y un mayor valor de irradiación solar global del universo completo de alternativas. Asimismo, las localidades presentan irradiación solar global entre 6.05 y 6.08 kWh/m² por día. Las localidades Puerto de la Luz y Ocotitlán, de ambos municipios, tuvieron 882.0 mm de PMA y 93.9 días con lluvia en promedio, mientras que Mesa del Castillo (La Fajilla) tuvo una PMA de 634.6 mm y 77.5 días con lluvia en promedio.

Tabla 6. Localidades prioritarias para implementar desinfección solar de agua de lluvia captada al aplicar la EMC.

Clave	Localidad	Municipio	Total
220040086	Puerto de la Luz	Cadereyta de Montes	0.7397
220040070	Ocotitlán	Cadereyta de Montes	0.7354
220040066	Mesa del Castillo (La Fajilla)	Cadereyta de Montes	0.7301
220040065	La Mesa Providencia	Cadereyta de Montes	0.7100
220150097	Ocotitlán	San Joaquín	0.7026

4. CONCLUSIONES

La evaluación multicriterio permitió trabajar capas de información (criterios) de manera separada, para después evaluarlas como un todo y cumplir con el objetivo planeado, el cual era identificar y priorizar las localidades con mayor potencial para la implementación de desinfección solar que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas. Esto

arrojó un listado de todas las alternativas en orden de prioridad que se puede observar en la Figura 5.

Para esta investigación se seleccionaron (por disponibilidad de la información y decisión basada en el marco teórico planteado) los criterios: número de habitantes por localidad, número de habitantes promedio por vivienda, índice de marginación, red pública de agua potable disponible, presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales, PMA, número de días con lluvia en el año y radiación solar global; sin embargo, de haber más información respecto a fuentes de agua y su calidad, contaminación atmosférica y condiciones socioeconómicas de la población, se podría realizar un análisis más detallado.

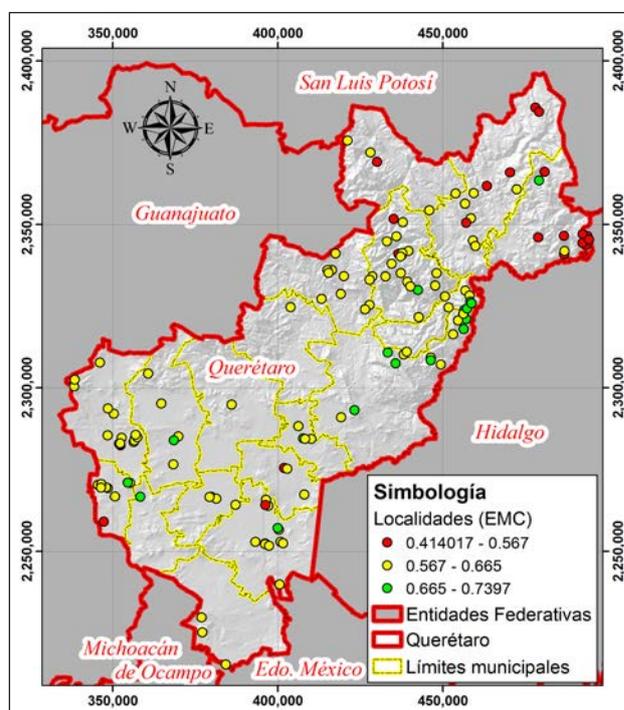


Figura 5. Mapa con los resultados de la evaluación multicriterio.

Por otro lado, previo a la implementación de este proyecto de captación pluvial y desinfección solar de la misma, será necesario un recorrido en campo para identificar que las condiciones obtenidas del Censo de Población y Vivienda 2010 aún existan en las localidades, identificar si no tienen proyectos en proceso de implementación que solucionen la falta de agua potable para beber, si existen actores adicionales como Organismos No Gubernamentales implementando proyectos y la disposición de la población para utilizar el agua proveniente de lluvia para consumirla.

Asimismo, se recomienda que para posteriores investigaciones utilizando información proveniente del INEGI (cuyo criterio de discretización entre localidades rurales y urbanas son número de habitantes en una superficie de 100 km²), se

considere que la contaminación presente en localidades cercanas a las zonas urbanas será diferente a aquellas que se encuentran más alejadas de las mismas. Para lo cual se podría incluir un criterio adicional que es cercanía a las zonas urbanas. Esto nos permitiría incluir en la evaluación este factor y así diferenciar las localidades cercanas de las alejadas geográficamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo de beca para realizar los estudios de posgrado que generaron el conocimiento para realizar la investigación presentada. Asimismo, a la Dirección de Vinculación Tecnológica y Proyectos Especiales que forma parte de la Secretaría de Extensión Universitaria de la Universidad Autónoma de Querétaro, por su apoyo a través del financiamiento de proyectos de investigación en el tema de desinfección solar de agua de lluvia captada.

BIBLIOGRAFÍA

Ahammed, M. M. & V. Meera. 2006. Iron hydroxide-coated sand filter for household drinking water from roof-harvested rainwater. *Journal of Water Supply: Research & Technology – Aqua*. 55 (7-8): 493-498.

Alonso, J.A. & M.T. Lamata. 2006. Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 14 (4): 445-459.

Anaya, M. & J. J. Martínez. 2007. Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. 1ª ed. Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

Barba-Romero, S. & J. C. Pomerol. 1997. Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica. Colección de Economía. Universidad de Alcalá. Madrid. 420 pp.

Bosshard, F., K. Riedel, T. Schneider, C. Geiser, M. Bucheli & T. Egli. 2010. Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated *Escherichia coli* cells as signs of accelerated cellular senescence. *Environ. Microbiol.* 1-15.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Estadísticas del agua en México, edición 2013. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Distrito Federal, México.

De la Vega E., S., Y. Tellez V. & J. López R. 2012. Índice de marginación por localidad 2010. Consejo Nacional de Población, México, D.F. pp. 342.

Eastman, R. 2002. IDRISI Version 4.0 User's Guide. Clark University Graduate School of Geography, Worcester, MA.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2008. What is ArcGIS 9.3? ESRI, California, Estados Unidos.

Gerencia de Energías No Convencionales. 2010. Mapas de Irradiación Solar. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos. Disponible en línea: <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/default.aspx>. Accesada el 27 de septiembre de 2013.

Gómez D., M. & J. I. Barredo C. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2ª Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. México, D.F.

Jordan, F.L., R. Seaman, J.J. Riley & M.R. Yoklic. 2008. Effective removal of microbial contamination from harvested rainwater using a simple point of use filtration and UV-disinfection device. *Urban Water J.* 5 (3): 209-218.

Naciones Unidas (ONU). 2014. Objetivos de Desarrollo del Milenio: Informe de 2014. Nueva York. Pp. 56.

Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. New York. USA. 269 p.

Servicio Meteorológico Nacional. 2012. Climatología: Normales Climatológicas del periodo 1981-2010 y Estadística Descriptiva por estación. Disponible en línea: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:queretaro&catid=14&Itemid=2. Accesada el 30 de octubre del 2013.

Solarte, Y., M. L. Salas, B. Sommer, C. Dierolf & M. Wegelin. 1997. Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso. *Colombia Médica* 28 (003): 123-129.

Villalazo Peña, P, J. P. Corona Medina & S. García Mora. 2002. Urbano – Rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. Notas, Revista de Información y Análisis. INEGI, México D. F. 20: 17 – 24.

METODOLOGÍA PARA LA PROPUESTA DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN FUNCIÓN DE RESTRICCIONES AMBIENTALES Y DE GESTIÓN

ECOLOGICAL FLOW METHODOLOGY BASED ON ENVIRONMENTAL AND MANAGEMENT RESTRICTIONS

Soares, Laura¹; Santos, Hersília¹; Martínez-Capel, Francisco²; Callisto, Marcos^{3,4}; Tupinambás, Taynan³; Castro, Diego^{3,4}; França, Juliana^{3,4}; Pompeu, Paulo⁵; Sampaio, Francisco⁵; Gandini, Cíntia⁵; Lopes, João Victor¹; Alves, Carlos⁴

RESUMEN

La operación de numerosas presas se realiza con el propósito de regular el caudal de los ríos a escala temporal diaria y estacional, para poder aportar energía tanto en picos de consumo como en épocas de bajo caudal o de sequías. Dicha regulación cambia las características del agua y de los ecosistemas acuáticos, alterando la dinámica de materia y energía, la disponibilidad de hábitat físico, y en conjunto la integridad de los ecosistemas. Este estudio propuso un régimen ecológico de caudales para mejorar el estado ecológico del Río Grande bajo la central hidroeléctrica de Itutinga (Minas Gerais, Brasil). En el diseño del régimen ecológico de caudales se combinaron las siguientes herramientas: i) Series temporales de caudales medios diarios; ii) análisis de la respuesta biológica de las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos ante un experimento de manipulación de los picos de caudales, aguas abajo de la misma central; iii) análisis del régimen actual de caudales mediante Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA). La representación del régimen ecológico anual, con un rango de variabilidad, fue construido a partir de un modelo autorregresivo cuyas restricciones fueron obtenidas mediante análisis de cinco componentes fundamentales del régimen hidrológico (magnitud, frecuencia, duración, temporalidad y tasas de cambio) del período anterior (1934-1954) y posterior a la construcción de la presa (1990-2011). Además de los IHA, para la magnitud del caudal se consideró la respuesta biológica de las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos, así como algunos límites de operación de la central indicados por la empresa hidroeléctrica. El método desarrollado aporta una perspectiva novedosa para los caudales ecológicos en América Latina, debido a su enfoque multidisciplinar, ya que integra información hidrológica, biológica, y datos sobre la operación de presas.

Palabras clave: alteración hidrológica; respuesta biológica; peces tropicales; ríos tropicales; operación de presas; hydropeaking.

ABSTRACT

Many rules of dam operation aims at regulating the river flow on a seasonal and daily scale in order to supply energy in the demands peaks as well as in the dry season. This regulation changes the water characteristics and the aquatic ecosystems, producing alterations in matter and energy cycle, habitat availability, and in the integrity of the ecosystems. This study proposed an environmental flow regime in order to improve the ecological status of the Rio Grande downstream of the Itutinga Hydropower Plant (Minas Gerais, Brasil). The development of the environmental flow regime was based on different techniques; i) time series analysis of mean daily discharge; ii) biological response of fish and macroinvertebrates to several experiments of flow releases downstream of the hydropower plant; iii) analysis of the actual flow regime with Indicators of Hydrological Alteration (IHA). The annual hydrograph of monthly flows, with an interval of variability, for the environmental flow regime was built with an autoregressive model, whose restrictions were obtained by analyses of the main five flow components (magnitude, frequency, duration, seasonality and rate of change) of the period pre-dam (1934-1954) and post-dam construction (1990-2011). Besides the IHA, the magnitude of monthly flows was proposed considering the biological responses of fish and macroinvertebrates; additionally, the hydropower company reported some operational limits to be considered. The process presented here showed a new approach for environmental flows in Latin America, based on multidisciplinary analyses which integrate hydrological, biological and real data of dam operation.

Key words: hydrological alteration; biological responses; tropical fish; tropical rivers; dam operation; hydropeaking.

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Brasil) – hsantos@civil.cefetmg.br

² Universitat Politècnica de València (España)

³ Laboratório Ecologia de Bentos, Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil)

⁴ Nuvelhas/ Projeto Manuelzão (Brasil)

⁵ Laboratório Ictiologia, Universidade Federal de Lavras (Brasil)

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía hidroeléctrica está relacionada con la construcción de presas, muchas de las cuales regulan el caudal del río mediante la formación de un embalse, provocando cambios físicos, químicos y biológicos en el cauce del río. Las reglas de operación de las presas determinan las variaciones de caudal bajo ellas, de acuerdo a las demandas de energía. La regulación del caudal se realiza a escala diaria, aumentando en horarios de consumo máximo, y a escala estacional, acumulando agua durante la estación de lluvias para garantizar su disponibilidad en la época seca (Jones 2014). De esa manera, el régimen de caudales está regulado, reduciendo las inundaciones y mitigando las sequías. La regulación de caudales en Brasil para la generación de energía es un tema de capital importancia en Brasil, donde aproximadamente el 70,6% de la energía eléctrica procede de centrales hidroeléctricas (EPE, 2014).

Los sucesivos impulsos o picos de caudales a escala diaria, derivados de la operación de las presas, pueden perjudicar a los ecosistemas acuáticos río abajo, debido a rápidas modificaciones de la profundidad del agua, velocidad, erosión, transporte de sedimentos y calidad del agua (Agostinho et al. 2007). En general las alteraciones en el régimen de caudales influyen en la dinámica de materia y energía, disposición de hábitats y en la eficiencia de interacciones bióticas, alterando la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos (Poff et al. 1997; Bunn & Arthington 2002). Las consecuencias pueden ser la pérdida de hábitats, pérdida de fertilidad de suelos inundados, retención de sedimentos, bloqueo de rutas migratorias, o extinción de especies nativas e introducción de especies exóticas (Craig 2000).

Distintas medidas de mitigación para estos impactos pueden ser propuestas sobre la base de estudios detallados de las comunidades acuáticas (Castro et al. 2013 a; Tupinambás et al. 2013). Entre dichas medidas, el presente trabajo se dedica a la determinación de caudales ecológicos. Se entiende por régimen de caudales ecológicos, aquellos que en cantidad, tiempo y calidad, se requieren para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas ribereños y estuarios, así como también comunidades humanas que dependen de estos ecosistemas, garantizando los servicios ecosistémicos para las poblaciones humanas (Poff et al. 2006).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar una metodología para la creación de un régimen ecológico de caudales (dinámica temporal de caudales ecológicos, a escala diaria), a partir de la cuantificación de la alteración hidrológica producida por la operación de una central de energía hidroeléctrica y de bioindicadores de las comunidades de peces y macroinvertebrados bentónicos, bajo la central hidroeléctrica de Itutinga (localizada en la región sureste de Brasil).

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudio

El área de estudio fue el tramo de río bajo la central Hidroeléctrica de Itutinga (Brasil) en la cuenca hidrográfica del Río Grande (21°21'50"S, 44°37'00"O) (Fig. 1), en una región de clima tropical con veranos húmedos e inviernos secos (Eidt 1968). El tramo está localizado a una altitud de 787 m, tiene 60 metros de ancho, 2 km de longitud y un caudal medio de 124,45 m³/s; su área de drenaje es de 6365 km². La longitud del tramo fue determinada por criterio de experto destinado a los diversos muestreos de peces y macroinvertebrados; para ello los expertos en ecología fluvial clasificaron los hábitats más representativos en un amplio tramo bajo la presa; el tramo de estudio bajo la presa incluyó los distintos tipos de hábitats observados en el tramo de río. La central pertenece a un grupo de 10 centrales hidroeléctricas en cascada (CBH 2013), constituyendo la segunda central a partir de la cabecera. La temperatura media anual es de 19°C y la precipitación varía de 1200 mm a 1500 mm anuales (CBH 2013). La estación lluviosa comprende los meses de octubre a marzo, cuando ocurre cerca del 89% del total de precipitaciones sobre la cuenca; la estación seca ocurre entre abril y septiembre. El área de estudio está afectada por el evento climático de "El Niño" (ENSO), asociado con lluvias y temperaturas anormales que constituyen la fuente principal de variaciones inter anuales en gran parte de América Latina (Garreaud et al. 2009). En 2010 tuvo lugar El Niño, con una intensidad débil de vientos; sin embargo eventos como La Niña no ocurrieron en el periodo de estudio (CPTEC 2014).

2.2 Manipulación experimental de caudales bajo la presa.

La información ecológica, relativa al hábitat (calidad del agua, sedimentos) y comunidades acuáticas (macroinvertebrados y peces) se obtuvo en ocho campañas de muestreos, aguas abajo de la presa; cuatro campañas durante la estación seca y cuatro durante la húmeda. Durante dicho tiempo los caudales liberados por la presa fueron manipulados para obtener dos escenarios hidrológicos (Tabla 1): i) caudales constantes durante 30 días consecutivos sin muestreo y durante 4 días más con muestreo diario de los componentes ambientales indicados más abajo (en total 34 días de caudal constante); ii) caudales con picos diarios (*hydropeaking*) realizados entre las 17:00 y 23:00 horas, con el máximo a las 18:30 h, durante 4 días, en los cuales se realizó un muestreo diario. En cada uno de los muestreos se aplicaron los métodos descritos a continuación.

La temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (S/cm) y sólidos disueltos totales (mg/L) fueron medidos con una sonda multiparámetro Yellow Spring. Durante el periodo de 24 horas el oxígeno

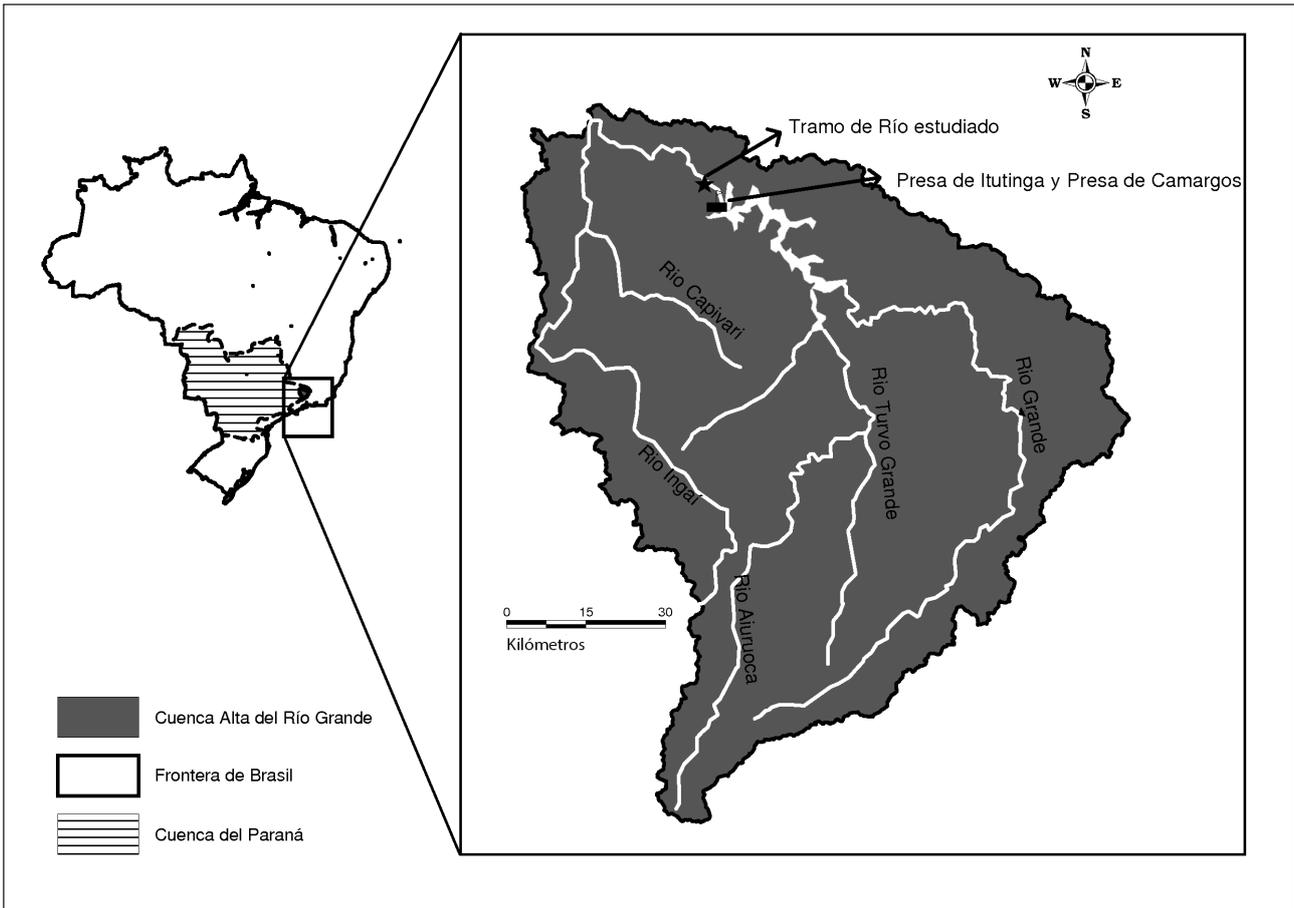


Figura 1. Localización de la cuenca del río Paraná en Brasil, detallándose la cuenca alta del río grande y su tramo de estudio bajo la central Hidroeléctrica de Itutinga.

Tabla 1. Datos de los experimentos de caudales bajo la presa y central hidroeléctrica de Itutinga (mediante caudal constante y caudal fluctuante). Para cada fecha (mes-año), se indican los caudales liberados.

Estación lluviosa	Caudal Constante				Caudal Fluctuante
	Ene/10	Mar/10	Mar/11	Nov/11	Feb/10
	327 m ³ /s	96 m ³ /s	222 m ³ /s	110 m ³ /s	380-480 m ³ /s
Estación seca	Jul/10	Oct/10	Jun/11	Ago/11	Ago/10
	108 m ³ /s	76 m ³ /s	109 m ³ /s	65 m ³ /s	110-170 m ³ /s

disuelto se determinó (método de Winkler) y la alcalinidad total (titulación con H₂SO₄ 0,01 N y pH 4,5). Se recogieron y se congelaron las muestras de agua (500 ml) para su posterior análisis. En el laboratorio de nitrógeno total (N) se determinó por el método de Kjeldahl, mientras que el fósforo total (P) se determinó por el método del ácido ascórbico (APHA, 2005). Los macroinvertebrados bentónicos fueron recolectados en el sedimento, así como de la deriva (*drift*), utilizándose respectivamente una draga tipo Petersen (0,0375 m²) (Tupinambás et al. 2013) y redes de drift (0,16 m² de área, luz de malla 0,250 mm) (Castro et al. 2013 a). La granulometría del sedimento fue analizada en los hábitats donde los macroinvertebrados fueron recolectados. Posteriormente los organismos fueron lavados y conservados en alcohol al 70%; fueron clasificados en laboratorio a nivel de familia (Pérez 1988; Merritt &

Cummins 1998; Mugnai et al. 2010) y posteriormente depositados en la colección de referencia del Instituto de Ciencias Biológicas de la Universidade Federal de Minas Gerais. La respuesta de las comunidades de macroinvertebrados frente a la manipulación de caudales fueron evaluadas mediante estos índices: diversidad de Shannon-Wiener, Equidad de Pielou, densidad de los organismos, abundancia relativa y riqueza taxonómica (Tupinambás et al. 2013; Castro et al. 2013 a).

Los peces fueron capturados mediante trasmallos, atarrayas, tamices, redes de arrastre y nasas (revisándose todas las artes de pesca cada 12 horas). Cada pez fue identificado, medido y pesado. La comunidad piscícola fue evaluada mediante estos índices: abundancia relativa de cada especie, capturas por unidad de esfuerzo (CPUE), biomasa por unidad de esfuerzo (BPUE), e índice de diversidad

de Shannon-Wiener. Los peces fueron capturados en los mismos hábitats que los macroinvertebrados.

2.3 Criterios ecológicos e hidrológicos para el régimen ecológico de caudales

Basándonos en información ecológica e hidrológica, se establecieron diversos criterios para establecer un régimen ecológico de caudales. Estos criterios se aplicaron para establecer límites con respecto a: 1) la magnitud de los caudales, 2) la variabilidad de los caudales.

Los criterios respecto a la **magnitud de los caudales** en el régimen ecológico se basaron en los resultados ecológicos tras los experimentos de caudales bajo la presa, como se explica a continuación. Los parámetros físico-químicos del agua, macroinvertebrados bentónicos y peces fueron evaluados en los experimentos de caudal constante. Para los parámetros físico-químicos, se evaluó si cumplían o no con la normativa de calidad del agua en cada caso (CONAMA n° 422/2010); en caso de no cumplir, se considera el valor de caudales como “caudal desfavorable”. Respecto a los índices relativos a invertebrados bentónicos y peces, sus valores fue comparados entre los distintos experimentos de caudal constante; en dicha comparación se utilizó una prueba de varianza simple (one-way ANOVA, $p = 0,05$) y el test de Duncan para comparación de medias, mediante el software Statistica® (Statsoft Inc., 2015). Para cada índice biológico, el valor positivo más elevado entre los cuatro casos de caudal constante (en época seca y época lluviosa, independientemente) fue considerado como el valor de referencia o “favorable”. Puesto que no existen registros a medio o largo plazo sobre estas variables, que puedan conformar una base de datos de referencia en régimen natural (baseline), el valor del índice más alto fue la única referencia disponible en el Río Grande.

A continuación, los valores de caudales para cada índice que no tenía diferencias significativas con el valor de referencia (según test de Duncan), fueron clasificados como “favorables” para ese índice, y el resto de caudales como “desfavorables”. En cada una de las estaciones, lluviosa o seca, independientemente, los valores de caudales (entre los cuatro caudales experimentados) que fueron desfavorables tanto para peces como para invertebrados fueron considerados como caudales no deseados, por lo tanto fueron impuestos como restricciones en la modelación hidrológica estocástica del régimen ecológico de caudales en el futuro.

Los criterios respecto a la **variabilidad de los caudales** en el régimen ecológico se basaron en un análisis hidrológico, siguiendo los índices de alteración hidrológica (IHA) y la metodología del Rango de Variabilidad (Richter et al. 1998; Mathews & Richter, 2007) para cuantificar la alteración hidrológica. Para ello se contó con dos escenarios:

régimen natural de caudales (1934 – 1954) antes de la construcción de la presa y central hidroeléctrica, y régimen regulado (1991 – 2011) cuando la central hidroeléctrica ya estaba funcionando, ambos basados en los datos históricos disponibles (caudal medio diario). A partir de dichos datos diarios, mediante el software Indicators of Hydrologic Alteration 7.1 se obtuvieron los 33 indicadores de alteración hidrológica y los 34 parámetros de componente de caudal ecológico (Mathews & Richter, 2007). Estos parámetros se basan en cinco características fundamentales del régimen hidrológico: magnitud, periodo de ocurrencia (temporalidad), frecuencia, duración y tasa de variación de caudales.

A partir de los parámetros obtenidos, aquellos que presentaban una mayor alteración fueron considerados como restricciones en la modelación del régimen ecológico de caudales, tomando valores que estuvieran entre los percentiles 25 y 75 % de cada parámetro obtenidos en régimen natural (análisis de IHA no paramétrico). Los análisis fueron empleados separadamente en relación a la estación lluviosa y seca. Además, con respecto a la frecuencia de caudales punta, se establecieron restricciones basadas en el análisis de la deriva de macroinvertebrados (drift), debido a la fuerte influencia de las fluctuaciones diarias de caudal sobre los macroinvertebrados.

Para poder cumplir con las demandas impuestas por la ocupación humana del entorno en los tramos aguas abajo, algunas restricciones y recomendaciones de las compañías de saneamiento locales y del Operador Nacional del Sistema Eléctrico Brasileño (ONS) fueron también impuestas en el modelo hidrológico. El caudal máximo de 1000 m³/s era restrictivo, para evitar la inundación de la entrada de acceso a la Central Hidroeléctrica, así como daños en bombas o laboratorios de la piscifactoría del municipio. Además, fue necesario imponer la restricción máxima de 800 m³/s para no ocasionar el aprisionamiento de peces contra las estructuras y los paneles de las compuertas. Caudales inferiores a 50 m³ / s comprometerían el funcionamiento del sistema de abastecimiento de la ciudad situada aguas abajo de la central de Itutinga (Lavras). Por lo tanto, se adoptó dicho umbral como mínimo y un límite máximo de 800 m³/s. También se impuso una restricción sobre las tasas de reducción y de aumento de caudal efluente, vertido o turbinado, según la tasa máxima de variación recomendada para evitar daños en el cauce del río.

2.4 Modelación hidrológica estocástica del régimen de caudal bajo la presa

Con el objetivo de modelar caudales futuros, bajo condiciones similares a las actuales de gestión de la presa, se realizó un modelo hidrológico en el tramo de río aguas abajo de la Central Hidroeléctrica. Debido a la escasez de procesos determinísticos en el ciclo

hidrológico (Naghetini & Pinto 2007), el modelo presentó un carácter estocástico, a fin de establecer las posibles conexiones secuenciales en tiempo y/o espacio entre los eventos. La modelación, basada en preservar las características estadísticas de las series históricas, asume que el valor actual de una variable dada es la suma de un término determinístico (que depende de los valores verificados en el pasado) y de una variable aleatoria independiente del tiempo denominada ruido (Brandão 2004).

Los datos de entrada se construyeron en base a dos series históricas correspondientes a las estaciones húmeda y seca, y el tratamiento estadístico fue independiente para cada serie. Se empleó el paso de cálculo diario debido a la relevancia de las fluctuaciones existentes entre días consecutivos, desde el punto de vista biológico. Los análisis fueron realizados en R (R Core Team 2015), considerándose significativos con P inferior al 5%. Se realizó una prueba estadística Mann-Kendall para verificar la existencia de tendencias en las series de estudio. La identificación del modelo más apropiado se basó en el comportamiento de las funciones de autocorrelación total y autocorrelación parcial. Por tanto fueron analizados los correlogramas de cada serie temporal. El orden del modelo fue definido por el correlograma parcial de cada serie temporal. Los coeficientes del modelo fueron obtenidos a partir de las ecuaciones de Yule-Walker.

El último paso fue modelar el régimen ecológico de caudales (una serie de 20 años), con un paso diario, a partir de los mejores modelos obtenidos en el paso anterior (desde el 1 de octubre de 2011). Sobre dichos modelos, se impusieron las restricciones o criterios ecológicos e hidrológicos explicados anteriormente. Los modelos fueron utilizados independientemente para la estación lluviosa y la seca. Entonces, la mediana y los percentiles 75% y 25% fueron calculados, generando un hidrograma anual con las medianas mensuales y un intervalo de variabilidad (rango intercuartil) para un año; esta serie de 20 años contempla una serie larga y robusta que incluye la variabilidad registrada en años medios, secos y húmedos. Este hidrograma indicó un rango de valores mensuales que debería ser mantenido, ya que con un criterio práctico la empresa hidroeléctrica solicitó rangos de funcionamiento, alegando que es muy difícil manejar los caudales si se indica un único valor mensual.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterios ecológicos e hidrológicos para el régimen ecológico de caudales

Las variables abióticas presentaron valores típicos de tramos de río regulados aguas abajo de presas: pH próximo al neutro y bajo valores de turbidez, sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo. Los valores observados no sobrepasaron los límites establecidos por la normativa de la CONAMA respecto a calidad de aguas.

Se encontraron 38 taxones de macroinvertebrados bentónicos, comprendiendo 33 artrópodos, 2 anélidos y 1 molusco. La familia dominante fue *Chironomidae* (Diptera; >80 %) en todos los muestreos. Los mayores valores de riqueza taxonómica y diversidad de Shannon de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos se obtuvieron en época lluviosa (327 m³/s); no hubo diferencias importantes en estos índices para otros caudales en periodo lluvioso o en otros caudales. Por el contrario, la densidad de dichos organismos fue mayor en la estación seca. El aumento de estos indicadores, así como sus variaciones en respuesta a los diferentes valores de caudales, indican la importancia de las fluctuaciones extremas de caudales en cuencas hidrográficas para la manutención de la composición, estructura y función de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos (Castro et al. 2013 a, b.; Tupinambás et al. 2013). Estos valores también pueden estar muy influidos por las variaciones en la heterogeneidad de hábitats disponibles –determinados por el caudal– lo que determina las condiciones para el refugio, alimentación y reproducción de los macroinvertebrados. En la estación, las variaciones no fueron tan relevantes, probablemente por la menor amplitud de los caudales.

A la luz de los resultados obtenidos, los expertos en macroinvertebrados adoptaron dos valores de caudal ecológico mínimo de 76 m³/s, en época seca, que posteriormente se consideró para modelar el régimen ecológico de caudales (Tabla 2). Para el período húmedo, ellos sugirieron 96 m³/s como caudal mínimo.

Los resultados de deriva de invertebrados proceden de la comparación entre los periodos con fluctuación de caudal y con caudales fijos (Castro et al. 2013 a, b). Fueron colectados 31924 organismos distribuidos en 46 taxones. Durante el periodo de picos de caudales (hydropeaking), la densidad total en la deriva fue mayor en la estación de lluvia (rango de caudales 380-480 m³/s) y menor en estación seca (rango de caudales 110-170 m³/s). La riqueza no cambió significativamente entre los periodos de caudal fijo y fluctuante, ni en la estación lluviosa ni en la seca, indicando que las fluctuaciones de caudal no tuvieron influencia sobre los números de taxones encontrados a la deriva; sin embargo, si se observaron diferencias significativas en la composición taxonómica entre los periodos de caudal fijo y fluctuante en ambas estaciones.

En cuanto a la ictiofauna, fueron capturados un total de 19555 individuos pertenecientes a 48 especies. Comparando los muestreos en la estación seca y lluviosa, se observaron diferencias en capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) y biomasa por unidad de esfuerzo (BPUE) en las especies migratorias, con mayores valores en la estación lluviosa. Estas diferencias resultan lógicas a la luz de los conocimientos previos sobre las especies de peces tropicales, pues muchas de ellas migran aguas

Tabla 2- Resultados de los experimentos de caudal (mediante caudal constante y caudal fluctuante) sobre la comunidad de macroinvertebrados. Separando los experimentos en estación lluviosa y seca, se indican las fechas (mes-año), los caudales liberados por la central y los resultados de los 5 parámetros estimados para la comunidad. Las celdas en gris claro corresponden a caudales favorables y en gris oscuro a caudales desfavorables.

	Experimentos con Caudal Constante				Experimentos con Caudal Fluctuante (hydropeaking)
Estación Lluviosa	ene-10	mar-10	mar-11	nov-11	feb-10
Caudales	327 m ³ /s	96 m ³ /s	222 m ³ /s	110 m ³ /s	380-480 m ³ /s
Densidad	364.24	535.42	216.49	634.55	13,97
Diversidad Shannon	0.59	0.32	0.34	0.32	
Equitabilidad	0.46	0.26	0.30	0.25	
Riqueza	3.36	2.51	1.86	2.77	35
Total de individuos	29	43	17	51	
Estación seca	jul-10	oct-10	jun-11	ago-11	jul-10
Caudales	108 m ³ /s	76 m ³ /s	109 m ³ /s	65 m ³ /s	110-170 m ³ /s
Densidad	956.59	1004.44	730.56	811.63	18,54
Diversidad Shannon	0.30	0.39	0.27	0.20	
Equitabilidad	0.25	0.33	0.20	0.18	
Riqueza	3.15	3.39	2.43	2.17	28
Total de individuos	77	84	58	65	

arriba al comenzar las lluvias y las crecidas para reproducirse (ver por ejemplo, Agostinho et al., 1993; Gomes y Agostinho, 1997; Bonetto et al., 1981); por tanto, es lógico detectar mayor abundancia en este tramo en época lluviosa, pues los peces no pueden remontar la presa.

Respecto a los experimentos con caudal constante, solo durante la época lluviosa la comunidad de peces mostró diferencias significativas entre los distintos caudales (Tabla 3). La tendencia observada no indicó que el valor de los caudales fuese relevante de modo independiente del tiempo, sino que, por el contrario, los primeros tres experimentos (enero 2010, marzo 2010, marzo 2011), con diversos caudales (327, 96 y 222 m³/s, respectivamente) mostraron valores más elevados en densidad de peces migratorios, así como densidad y biomasa de peces reófilos, con respecto al último experimento en noviembre de 2011 (con 110 m³/s). Por otro lado, no se observó ninguna tendencia monótona en estos grupos de peces a lo largo del tiempo, desde enero de 2010 hasta noviembre de 2011, ni en el total de capturas o biomasa, ni en la estación lluviosa ni la seca. La mayor cantidad de capturas se realizó en marzo de 2010 durante la época lluviosa, cuando ya los caudales son elevados; cabe esperar que en dicha época los peces de migraciones longitudinales ya hubiesen realizado la migración reproductiva y se concentrasen en zonas relativamente cercanas a la presa, como es el tramo de estudio.

Los experimentos de fluctuación de caudales afectaron a la abundancia de peces migratorios y

reófilos, pero de modo diferente según la estación (Tabla 3). Durante la época lluviosa, en casi todos los casos la CPUE y BPUE aumentó durante el experimento, con respecto al periodo previo de caudal mantenido. Por el contrario, los peces fueron más sensibles a la fluctuación diaria de caudal en el periodo seco, en el cual las oscilaciones produjeron reducciones de CPUE y BPUE; esto que puede estar relacionado al arrastre de organismos (Corrarino & Brusven 1983; García de Jalón et al. 1988; Gore 1977; Perry & Perry 1986), produciéndose en una época en la cual los peces no están adaptados a cambios bruscos de caudal. A la luz de los resultados obtenidos, los expertos en fauna piscícola no adoptaron un valor de restricción mínimo de caudal ecológico para la estación seca. Para el período húmedo, ellos sugirieron 96 m³/s como caudal mínimo (Tabla 3).

Los análisis hidrológicos mediante IHA reflejaron la regularización del régimen hidrológico después de la construcción y operación de la central hidroeléctrica, con una reducción de los valores máximos de inundaciones y el aumento de los caudales en el periodo seco. Diez parámetros presentaron una muy elevada alteración, superior al 70 % (Tabla 4). La alteración hidrológica se ha indicado en tanto por ciento, donde los valores más próximos a -100 % indican alteraciones más significativas; el signo negativo indica una reducción de la frecuencia de registros (para una cierta variable) dentro de la franja de variabilidad que se define en régimen natural (pre-impacto). El umbral de pulsos de caudales bajos considerado fue 71 m³/s; el umbral

Tabla 3- Resultados de los experimentos de caudal (mediante caudal constante y caudal fluctuante) sobre la comunidad piscícola, en términos de capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) y biomasa por unidad de esfuerzo (BPUE), especificados para los grupos de peces migratorios (migración longitudinal), "mig", y reófilos, "reof". Las celdas en gris claro corresponden a caudales favorables y en gris oscuro a caudales desfavorables.

Estación lluviosa	Experimentos con Caudal Constante				Experimentos con Caudal Fluctuante (hydropeaking)
	ene-10	mar-10	mar-11	nov-11	feb-10
Caudales	327 m³/s	96 m³/s	222 m³/s	110 m³/s	380-480 m³/s
CPUE_mig	13.40	9.10	15.10	3.50	20.20
BPUE_mig	3.76	2.13	2.62	0.61	3.45
CPUE_reof	49.00	89.90	43.40	40.10	83.30
BPUE_reof	4.49	4.26	3.84	1.71	5.96
Estación seca	jul-10	oct-10	jun-11	ago-11	jul-10
Caudales	108 m³/s	76 m³/s	109 m³/s	65 m³/s	110-170 m³/s
CPUE_mig	3.50	4.20	8.00	3.70	2.30
BPUE_mig	0.50	1.10	2.40	0.32	0.49
CPUE_reof	39.60	88.30	57.80	59.00	24.00
BPUE_reof	1.55	3.60	3.71	1.86	0.95

Tabla 4. Parámetros hidrológicos del programa IHA bajo la presa de Itutinga (antes y después de su funcionamiento), indicando la mediana y coeficiente de dispersión, la franja de variabilidad (régimen pre-impacto) e índices de Alteración Hidrológica (porcentaje; según análisis no paramétrico). Solo se muestran los parámetros con Alteración Hidrológica mayor del 50 %.

	Periodo Pre-impacto 1934-1954 (21 años)		Periodo Post-impacto 1990-2011 (22 años)		Franja de Variabilidad RVA	Límite Alto (Perc. 67%)	Alteración Hidrológica (%)
	Mediana	Coef. de Dispersión	Mediana	Coef. de Dispersión	Límite Bajo (Perc. 33%)		
Parámetros Grupo 1: Magnitud de Caudales Mensuales							
Octubre	68.00	0.30	89.00	0.31	62.00	74.48	-89.4%
Abril	129.00	0.22	91.75	0.52	119.60	144.90	-59.1%
Julio	75.00	0.13	85.50	0.22	70.52	78.74	-59.1%
Agosto	64.00	0.16	83.00	0.42	64.00	67.48	-88.1%
Septiembre	60.00	0.20	83.75	0.61	57.00	63.87	-88.1%
Parámetros Grupo 2: Magnitud y Duración de condiciones hidrológicas extremas							
1-día mínimo	50.00	0.16	45.00	0.34	47.00	53.74	-57.6%
30-día mínimo	56.37	0.15	62.75	0.35	54.88	60.56	-59.1%
90-día mínimo	67.08	0.10	77.93	0.16	65.83	68.78	-100.0%
3-día máximo	486.30	0.24	372.80	0.82	425.20	494.10	-59.1%
7-día máximo	432.30	0.20	324.40	0.91	395.50	455.90	-72.7%
30-día máximo	303.50	0.36	233.70	0.84	281.90	358.10	-59.1%
Índice de Caudal Base	0.39	0.20	0.47	0.40	0.38	0.42	-72.7%
Parámetros Grupo 3: Temporalidad de los eventos anuales extremos							
Fecha del mínimo	274	0.1	215	0.4	272	282	-88.1%
Parámetros Grupo 4: Frecuencia y Duración de pulsos altos y bajos							
Conteo de Pulsos bajos	4	0.9	11	0.9	3	5	-90.5%
Duración de Pulsos bajos	7	2.3	2	1.0	6	17	-88.1%
Duración de Pulsos altos	4	0.6	5	0.9	3	5	-52.3%
Parámetros Grupo 5: Tasa de cambio y frecuencia de cambio en la tendencia (ascendente/descendente)							
Tasa de ascenso	10.50	0.74	4.50	0.67	8.00	12.74	-52.3%
Número de inversiones de tendencia (ascenso/descenso)	82	0.12	187	0.10	79	86	-100.0%

de pulsos de caudales altos fue 154 m³/s. Para ilustrar mejor los cambios producidos, se presenta la figura 2 comparativa del régimen natural (medias y desviación estándar, mínimo y máximo mensuales) en comparación con el régimen post-impacto (medias mensuales).

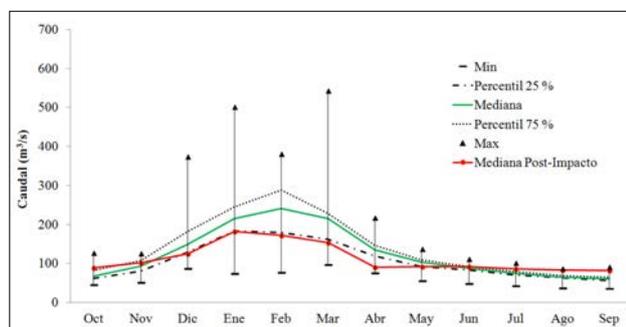


Figura 2. Comparativa del régimen natural, antes de la construcción de la presa (medianas en verde, percentiles 25 % y 75 %, mínimo y máximo mensuales) con el régimen post-impacto (medianas mensuales, en rojo) debido al funcionamiento de la central hidroeléctrica de Itutinga.

La alteración de los caudales medios mensuales se observó sobre todo en los meses de agosto, septiembre y octubre (época seca) en que las medianas aumentaron, mientras en abril y julio (época lluviosa) disminuyeron. La frecuencia y duración de pulsos altos y bajos presentó dos parámetros con muy elevada alteración: número y duración de pulsos bajos. Para el régimen ecológico se propuso periodos mayores de caudales reducidos, evitando las variaciones bruscas en periodos cortos de tiempo. Además, la fecha del caudal mínimo anual cambió de modo importante, ocurriendo en diferentes meses del año, inclusive en el periodo de inundación. Por ello se recomendó que el mínimo se produjera en el mes de septiembre, en el que ocurría predominantemente durante el régimen natural. Igualmente también es necesario que los cambios de caudal entre días sean menores, para reducir las tasas de cambio, que se elevaron fuertemente en régimen alterado (post-impacto) debido a la operación de la central. En resumen, los criterios de los IHA impuestos al régimen ecológico de caudales en la práctica son descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros hidrológicos (según programa IHA) por grupos (según Tabla 4) que presentaban una mayor alteración bajo la central de Itutinga y que fueron considerados para diseñar el hidrograma ecológico, según las restricciones indicadas en la última columna.

Grupo	Parámetro	Régimen Natural	Régimen Regulado	Restricciones
Grupo 1	Diciembre			Peces= 96 m ³ /s Macroinv. = 96 m ³ /s
	Abril Julio Agosto Septiembre			Peces= no había ninguna restricción Macroinv. = 76 m ³ /s
Grupo 3	Día del mínimo anual	En septiembre	No hay estándar	Asegurar de que el caudal mínimo anual se produce en septiembre
Grupo 4	Conteo de Pulsos bajos	4	11	Reducir el conteo de pulsos bajos.**
	Duración de Pulsos bajos	7 días	2 días	Aumentar el tiempo de pulsos bajos.**
Grupo 5	Número de inversiones de tendencia (ascenso/descenso)	82	187	Reducir el número de inversiones.***

* La magnitud de los flujos se basó en los escenarios favorables y desfavorables.

** En el hidrograma ecológico final (fig. 4a) se obtuvieron 7 pulsos de caudal bajo, con duración media de 7 días.

** En el hidrograma ecológico final (fig. 4a) se obtuvieron 115 inversiones.

3.1 Modelación hidrológica estocástica del régimen de caudal bajo la presa

El modelo autorregresivo fue escogido para la simulación de las series temporales, debido al comportamiento del correlograma total, con una

tendencia decreciente asociada al correlograma parcial, presentando picos con desfase 1, 2,...p y posterior truncamiento. La prueba Mann-Kendall indicó una tendencia decreciente para el período seco y estacionario para la estación lluviosa. Se adoptó este modelo autorregresivo (Salas 1993):

$$\gamma_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (\gamma_{t-j} - \mu) + \varepsilon_t \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde:

- γ_t = variable aleatoria modelada;
- μ = parámetro estimado por la media de la serie;
- p = orden del modelo;
- ϕ = parámetro estimado por las ecuaciones de Yule-Walker;
- ε_t = variable aleatoria.

El correlograma parcial referido a la estación seca presentó valores significativos, no nulos, hasta el modelo con desfase cinco, indicando modelo de orden cinco; el correlograma parcial para la estación lluviosa presentó tres picos significativos, indicando un modelo de orden tres (Fig. 3).

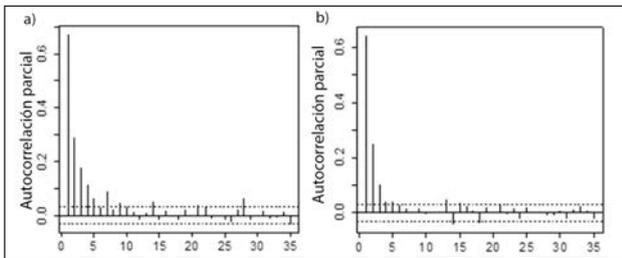


Figura 3. Gráficos de autocorrelación parcial de los modelos de caudal obtenidos, en función del número de días considerados (entre 1 y 35 días) para: a) Estación seca; b) Estación lluviosa.

Se obtuvieron dos series sintéticas, es decir para la estación lluviosa y la seca. Los caudales de restricción ya operados por el ONS, así como los caudales desfavorables para peces o macroinvertebrados, fueron introducidos como restricciones en el modelo hidrológico. Mediante los criterios explicados anteriormente, se obtuvo una franja de valores hidrológicos que el modelo debía cumplir. El régimen ecológico resultante se muestra en la Figura 4a y ello presenta un mayor rango de variabilidad durante la estación lluviosa, de modo que en dicha época aparecen los picos de las crecidas. La magnitud de los caudales varía entre 76 m³/s y 253 m³/s, ofreciendo durante el periodo de inundaciones una cierta variabilidad de caudales y hábitats para las comunidades acuáticas. En la estación seca, la variabilidad era reducida debido al pequeño intervalo de caudales observados en la serie histórica y al requerimiento de caudal mínimo ecológico, el cual limitó inferiormente el rango de caudales. La Figura 4b muestra los cuartiles mensuales de caudales obtenidos con el régimen ecológico, donde se observa un patrón de caudales más ajustado al natural, con caudales mínimos en agosto y septiembre y crecidas en diciembre, enero y febrero.

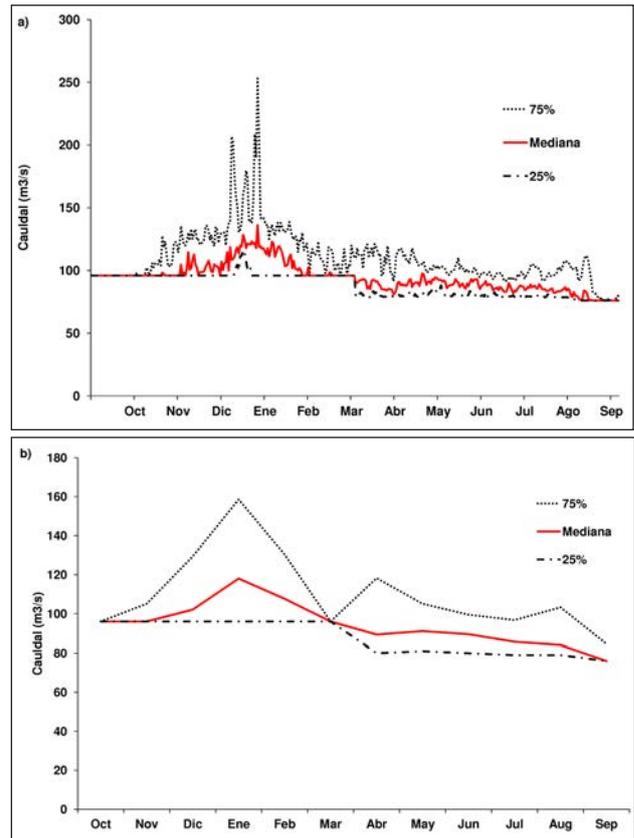


Figura 4. (a) - Régimen ecológico modelado (considerando la gestión de la presa) para el periodo de tiempo desde el 1 de octubre de 2011 hasta el 30 de septiembre de 2012. La línea continua representa el caudal medio diario (en rojo), las líneas discontinuas representan una vez la desviación estándar de dicha media, por encima y por debajo de la media diaria. **(b)** Gráfico anual de los cuartiles de los caudales mensuales (percentiles 25, 50, 75 %) obtenidos para el régimen ecológico de caudales modelado que se representa en la figura A (superior).

El sistema eléctrico brasileño opera de forma integrada y coordinada, lo que posibilita el intercambio de energía entre regiones, facilitando el aprovechamiento hidroeléctrico en distintas regiones y regimenes hidrológicos (ANEEL 2008). De esta forma, la operación de una determinada central hidroeléctrica depende de los caudales liberados río arriba por otras centrales, y su operación afecta a las centrales que operan aguas abajo. Esta metodología aporta la posibilidad de modelar caudales con criterios prácticos y realistas, con herramientas conocidas y aceptadas por los gestores del agua y los responsables de la planificación hidrológica. Sin embargo, esta metodología presenta la limitación de contemplar, en este caso de estudio concreto, una sola central, limitación que puede ser superada mediante la modelación con herramientas de gestión de recursos hídricos a escala de cuenca vertiente, que ha sido empleada para tal fin en España y en

distintos países de América Latina (Andreu et al., 1996; Paredes-Arquiola et al., 2013, 2014). Además, sería conveniente evaluar los efectos de operación de centrales sobre las comunidades acuáticas con estudios simultáneos en distintos ríos y presas con características similares, así como en varias presas consecutivas, con el fin de discernir entre los aspectos locales y posibles tendencias o patrones más generales que puedan ser aplicados a distintos proyectos de presas y centrales hidroeléctricas en ríos tropicales.

Las comunidades de peces y macroinvertebrados reflejaron los efectos producidos por la manipulación de caudales bajo la central hidroeléctrica (Tupinambás et al. 2013). Este estudio ha aportado algunos resultados sobre la respuesta biológica de dichas comunidades, sobre varios eventos y en dos estaciones distintas, con un monitoreo intensivo, tanto en experimentos de caudal estable como experimentos de picos diarios. Sin embargo, el estudio de los cambios en una población de peces, cuando se plantea un cambio en el régimen de caudales, requiere más que un monitoreo antes y después de la alteración, pues existen amplias dificultades para distinguir los efectos de factores ambientales que operan continuamente (por ejemplo clima, morfología, calidad del agua, hidrología) de aquellos efectos específicos del experimento o del cambio de escenario hidrológico (Souchon et al., 2008).

Por ejemplo, un amplio estudio de aumento del caudal mínimo ecológico (en 5 ríos de Francia) indicó que 4 años de seguimiento no eran suficientes para observar cambios positivos en las poblaciones de peces (Sabaton et al., 2004, 2008). Es muy importante considerar el tiempo de vida de las especies, por ejemplo las especies con ciclos de vida cortos con mucho reclutamiento pueden ser más adecuadas para medir respuestas a corto plazo, y otras especies para las respuestas a largo plazo (Souchon et al., 2008). Por lo tanto, en el futuro sería recomendable continuar este tipo de experimentos como el de Itutinga, detallando las especies o gremios a estudiar según el plazo temporal y con un plazo de monitorización más amplio del que pudo aplicarse en este estudio. El periodo de monitoreo antes del experimento debería comprender las fluctuaciones interanuales naturales de la abundancia de peces, y el periodo durante y después debería comprender dichas fluctuaciones y el tiempo necesario para observar los cambios asociados al cambio de caudales (Souchon et al., 2008).

Por estas razones, una planificación detallada del diseño de estudio y la selección de los test estadísticos adecuados, realizados por un equipo multidisciplinar, son necesarios para estos estudios (Souchon et al., 2008). Además, la elaboración de un esquema conceptual o de un modelo conceptual sobre las interrelaciones entre los procesos físicos y los procesos ecológicos en las comunidades es

muy recomendable, para poder formular hipótesis concretas sobre los efectos de un cambio de régimen de caudales sobre los procesos biológicos y las comunidades acuáticas (Souchon et al., 2008). Esta idea ha sido planteada en estudios de caudales ecológicos (Arthington et al., 2003; King et al., 2008) y el uso de un esquema conceptual en combinación con la metodología de IHA también ha sido realizada previamente en ríos tropicales (Martínez-Capel et al., en revisión).

4. CONCLUSIONES

Los experimentos de manipulación de caudales bajo la central hidroeléctrica indicaron que la magnitud del caudal (mantenido) bajo centrales es importante para las comunidades de peces y macroinvertebrados. La oscilación de caudales o picos diarios (hydropeaking) también afectaron a las comunidades, especialmente cuando la oscilación es muy fuerte por la diferencia entre caudal base y caudal punta (en estación seca). Debido a la localización de diversas presas sucesivas o en cascada, y a la escasez de datos en ríos de referencia no alterados, estos estudios ecológicos deberían ampliarse a distintos ríos con similares características ecológicas, tanto en ríos inalterados de referencia con un estado ecológico óptimo como en tramos bajo presas hidroeléctricas, para realizar una adecuada comparación de las condiciones del hábitat y de las comunidades presentes, en un plazo de tiempo más amplio. Es muy importante implementar estudios a largo plazo en tramos de ríos de referencia no alterados, para poder comprender y comparar mejor la dinámica de los invertebrados en ríos naturales y ríos alterados (Castro et al., 2013 a), así como de los peces.

La modelación del régimen ecológico de caudales constituye una herramienta útil para la aplicación práctica de criterios ecológicos de gestión del agua. Permite modelar con anticipación y también estimar los rangos de caudales a ser mantenidos en cada mes, a fin de atender la demanda energética y la conservación de las comunidades acuáticas. Con el objetivo de obtener los beneficios ecológicos implicados, determinar su efectividad y realizar ajustes con un enfoque adaptativo, el régimen ecológico debe ser aplicado en la práctica; junto a ello se necesita un programa de monitoreo adecuado a medio y largo plazo, para evaluar los cambios sobre las comunidades acuáticas y ribereñas.

La metodología adoptada representa un avance para los estudios de caudales ecológicos en América Latina, debido a su alcance multidisciplinar, que integró informaciones biológicas, hidrológicas y datos sobre la operación de la presa. Se utilizaron numerosos datos históricos y se realizó una modelación a plazo de 1 año. Entre otras propuestas futuras, en este trabajo se ha recomendado aplicar la metodología en otros ríos y presas, así como en presas consecutivas, con el fin de discernir entre

los aspectos locales y posibles tendencias más generales, que puedan ser aplicados a distintos proyectos de presas y centrales hidroeléctricas en ríos tropicales. Igualmente importante sería la modelación del caudal y de regímenes ecológicos con herramientas de gestión de recursos hídricos a escala de cuenca vertiente, como por ejemplo se ha aplicado en cuencas hidrográficas en España.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dan las gracias a la empresa Hidroeléctrica CEMIG (Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais) que financió este estudio y a Marcelo de Deus por la coordinación del proyecto. Los autores agradecen también al Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais que financió la beca de iniciación científica de la primera autora, Laura Soares.

BIBLIOGRAFÍA

Agostinho, A. A., L. C. Gomes & F. M. Pelicice. 2007. Ecología e Manejo de Recurso Pesqueiro em Reservatórios no Brasil. Eduem, Maringá, Brasil, 501p.

Agostinho, A. A., A. E. A. de M. Vazzoler, L. C. Gomes & E. K. Okada. 1993. Estratificación espacial y comportamiento de *Prochilodus scrofa* en distintas fases del ciclo de vida, en la planicie de inundación del alto río Paraná y embalse de Itaipu, Paraná, Brasil. *Reviews Hydrobiologia Tropicales* 26: 79-90.

Andreu, J., J. Capilla & E. Sanchis. 1996. AQUATOOL: a generalized decision support-system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177, 269–291.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. 2008. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3. ed., Brasília, Brasil, 236 p.

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Arthington, A.H., J. L. Rall, M. J. Kennard & B. J. Pusey. 2003. Environmental flow requirements of fish in Lesotho rivers using the DRIFT methodology. *River Research and Applications* 19: 641-666.

Bonetto A.A., M. Canon Verón & D. Roldán. 1981. Nuevos aportes al conocimiento de las migraciones de peces en el río Paraná. *Ecossurellance* 8: 29-49.

Brandão, J. L. B. 2004. Modelo para Operação de Sistemas de Reservatórios com Usos Múltiplos. Tesis de doctorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 160 p.

Bunn, S. E. & A. H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4):492-507.

Castro, D. M. P., R. M. Hughes & M. Callisto. 2013 a. Influence of peak flow changes on the macroinvertebrate drift downstream of a Brazilian hydroelectric dam. *Brazilian Journal of Biology* 73(4): 775-782.

Castro, D. M. P., R. M. Hughes & M. Callisto. 2013 b. Effects of flow fluctuations on the daily and seasonal drift of invertebrates in a tropical river. *Annales de Limnologie* 49: 169-177.

CBH - Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, 14/12/2014. <http://www.saofrancisco.cbh.gov.br/arquivos.aspx#plano>.

CONAMA. Resolução nº 422/2010 (Ações e Projetos de Educação Ambiental), 13/12/2014. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=622>.

Corrarino, C.A. & M. A. Brusven. 1983. The effects of reduced stream discharge on insect drift and stranding of near shore insects. *Freshwater Invertebrate Biology*, 2:88-98.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Ocorrência de El Niño. 14/01/2014. <http://enos.cptec.inpe.br>.

Craig, J. F. 2000. Large dams and freshwater fish biodiversity. In: Berkamp, G.; McCartney, M.; Dugan, P.; McNeely, J. & Acreman, M. eds. *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration*. 22/01/2015. <http://intranet.iucn.org/webfiles/doc/archive/2001/IUCN913.pdf>.

Eidt, R. C. 1968. The climatology of South America. p.54-81. En Fittkau E.J., J. Illies, H. Klinge, G.H. Schwabe & H. Sioli (eds.), *Biogeography and Ecology in South America v.1* W. Junk Pub., The Hague, Holanda.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética -Brasil)- 2014. Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013 EPE, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 285 p.

García de Jalón, D., C. Montes, E. Barcelo, C. Casado & F. Menes. 1988. Effects of hydroelectric scheme on fluvial ecosystems within the Spanish Pyrenees. *Regulated Rivers: Research and Management* 2: 479-491.

Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci, & J. Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 180-195.

Gomes, L.C., A.A. Agostinho. 1997. Influence of the flooding regime on the nutritional state and juvenile recruitment of the curimba, *Prochilodus scrofa*, Steindachner, in upper Parana River, Brazil. *Fisheries Management and Ecology* 4: 263–274.

Gore, J. A. 1977. Reservoir manipulations and benthic macroinvertebrates in a prairie river. *Hydrobiologia* 55:113-123.

- Jones, N.E. 2014. The dual nature of hydropeaking rivers: is ecopeaking possible? *River Research and Applications*, 30(4): 521-526.
- King, J.M., R. E. Tharme & M. S. de Villiers (eds.). 2008. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. WRC Report TT 354/08. Water Research Commission. Pretoria. Sudáfrica.
- Martínez-Capel, F., García-López, L. & Beyer, M. *In review*. Integrating hydrological modelling and ecosystem functioning for environmental flows in climate change scenarios in the Zambezi River (Caprivi Region, Namibia).
- Mathews, R. & B. D. Richter. 2007. Application of the indicators of hydrological alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American Water Resources Association* 43: 1400-1413.
- Merritt R.W. & K.W. Cummins. 1998. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall, Hunt Iowa, EUA, 750p.
- Mugnai, R., J. L. Nessimian & D. F. Baptista. 2010. *Manual de Identificação de Macroinvertebrados Aquáticos do Estado do Rio de Janeiro*. Technical Books Editora Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 174p.
- Naghattini, M. & E. J. Pinto. 2007. *A Hidrologia Estatística, CPRM Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte*. 561p.
- Paredes-Arquiola, J., F. Martinez-Capel, A. Solera & V. Aguilera. 2013. Implementing environmental flows in complex water resources systems—case study: the Duero river basin, Spain. *River Research and Applications* 29(4): 451-468.
- Paredes-Arquiola, J., A. Solera, F. Martinez-Capel, A. Momblanch & J. Andreu. 2014. Integrating water management, habitat modelling and water quality at the basin scale and environmental flow assessment: case study of the Tormes River, Spain. *Hydrological Sciences Journal* 59 (3-4): 878-889.
- Pérez, G.R. 1988. *Guía para el Estudio de los Macroinvertebrados Acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo Fen Colombia, Bogotá, Colômbia, 217p.
- Perry, S. A. & W. B Perry. 1986. Effects of experimental flow regulation on invertebrate drift and stranding in the Flathead and Kootenai Rivers, Montana, USA. *Hydrobiologia*, 134:171-182.
- Poff, N.L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks & J. C. Stromberg. 1997. The natural flow regime. *BioScience* 47:769-784.
- Poff, N. L. , J. D. Olden, D. M. Pepin & B. P Bledsoe. 2006. Placing global stream flow variability in geographic and geomorphic contexts. *River Research and Applications* 22(2): 149-166.
- R Core Team. 2015. *A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 22/01/2015. <http://www.R-project.org> .
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell & D. P. Braun. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10:1163–1174.
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, D. P. Braun & J. Powell. 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14:329-340.
- Salas, J. D. 1993. Analysis and modeling of hydrologic time series, p. 1-72. *En: Maidment, D.R. (ed.). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill. New York, EUA.
- Statsoft Inc. 2015. *Statistica*. Tulsa, Estados Unidos. 22/01/2015. <http://www.statsoft.com/> .
- Souchon, Y., C. Sabaton, R. Deibel, D. Reiser, J. Kershner, M. Gard, C. Katopodis, P. Leonard, N. L. Poff, W. J. Miller & B. L. Lamb. 2008. Detecting biological responses to flow management: missed opportunities; future directions. *River Research and Applications* 24(5): 506-518.
- Tupinambás, T. H., R. M. V. Cortes, S. G. Varandas, S. J. Hughes & J. França; M. Callisto. 2013. Taxonomy, metrics or traits? Assessing macroinvertebrate community responses to daily flow peaking in a highly regulated Brazilian river system. *Ecohydrology* 1: 25-32.

CUENCA DEL RIO SÃO FRANCISCO: ¿CONFLICTO DE INTERESES?

SÃO FRANCISCO RIVER BASIN: CONFLICT OF INTEREST?

Gonçalves de Souza, Reginaldo¹; Hernández-Bernal, Norma Angélica²

RESUMEN

Los conflictos por agua, generalmente se expresan como problemas de tipo social, económico, cultural e inclusive étnico. Los conflictos pueden ser localizados pero siempre tienen un contexto mucho más amplio que involucra estabilidad social y económica y por lo tanto deriva en un asunto de justicia, paz y seguridad social. Sin embargo, en muchos casos no es la falta de agua lo que crea conflictos, sino la falta de infraestructura para abastecer agua, problemas de política o institucionales, tales como corrupción, desigualdad en la toma de decisión, falta de transparencia y de democracia en la gestión del agua, pero principalmente en la desigualdad social y económica que define las decisiones en cuanto al acceso y distribución del agua. En América Latina los conflictos por agua están fuertemente relacionados con tenencia de la tierra y los arreglos económicos espaciales. Los usos productivos de la tierra necesitan de agua y en regiones áridas o semiárida el agua disponible limita la producción agrícola más que la tierra. En estos casos, las decisiones relacionadas con el uso y asignación de agua tendrán una repercusión en las decisiones de la tierra. Por esto es importante considerar el régimen de tenencia de la tierra y los grupos que se ven afectados por decisiones que tienen que ver con la asignación de agua entre cuencas aledañas y como esto afecta los derechos de agua de los diferentes tipos de usuarios. En Brasil, el caso del Río São Francisco, se distingue porque no se ha considerado este elemento fundamental que interfiere con políticas y reformas legales ya que puede ser elemento detonante en el surgimiento de conflictos en cuencas intra-nacionales.

Palabras clave: Conflictos por agua, Río São Francisco, tenencia de la tierra

ABSTRACT

Water conflicts are, most of the times, expressed as social, economic, cultural and even ethnic problems. Conflicts can be localized, but they always have a broader context that involves social and economic stability and therefore it implies a matter of social stability, peace and justice. However, in many cases it is not water scarcity what triggers conflict, but the lack of infrastructure to supply water, institutional and policy problems, such as corruption, inequity in water decision, lack of transparency and of democracy in water management, but above all it is social and economic inequity that define the decisions related to water access and its distribution. In Latin America, water conflicts are related with land tenure and with the spatial economic arrangements. The productive uses of the land need water to produce and in arid or semiarid regions, available water limits agriculture more than the soil itself. In these cases, water allocation and water use decisions will have an impact over the decisions taken on land use. Therefore, it is important to consider the land tenure system or land property rights as well as the groups that are affected by the decisions taken in relation with water allocation between neighboring basins and how this affects water rights of the different stakeholders. In Brazil, the case of the São Francisco River is highlighted because land tenure system, which interferes with legal policies and reforms, has not been considered and it can be a triggering element in the outbreak of conflicts among intra-national basins.

Key words: Water conflicts, São Francisco River, land tenure

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son espacios naturales en las cuales el ciclo hidrológico tiene su expresión más clara. Son espacios de captación, flujo e infiltración y donde el agua constituye un elemento fundamental para el desarrollo social, cultural y económico de las sociedades y, al mismo tiempo, base de la dinámica y procesos ecológicos del medio ambiente. Las cuencas son la unidad espacial en donde el agua sufre variaciones de volumen y calidad de manera natural, pero también por los impactos generados por las actividades humanas: abastecimiento de agua potable, descargas de aguas residuales, agricultura, generación de energía, recreación,

transporte, etc. Las aguas superficiales son usadas de manera más intensa y frecuentemente están bajo presión. El incremento en la demanda de bienes de consumo, además de satisfacer las necesidades básicas de la población así como de los diferentes sectores de la economía ha provocado un aumento en el uso y consumo de agua en el mundo. Este aumento de la demanda del agua puede colocar en riesgo la disponibilidad de la misma en regiones con variabilidad climática significativa. Brasil no escapa a esa situación a pesar de poseer el 43% de los recursos hídricos superficiales de la región Sudamericana (FAO, 2003). La presión por la

¹ Profesor SMEB (Sistema Municipal de Ensino Básico de Belo Horizonte, Minas Gerais. Brasil.) Investigador independiente, Belo Horizonte, MG-Brasil, reginaldo.pemux@gmail.com

² Consultor / Investigador independiente, México

diversidad en el uso del agua está aumentando y en regiones donde no hay un equilibrio de las variables sociales, económicas y ambientales, el uso del agua de manera sustentable rebasó sus límites.

Sin embargo, a pesar de que la demanda y presión sobre el agua esté en aumento, globalmente, no parece haber crisis de agua, aunque la irregularidad y distribución de la precipitación alrededor del mundo y especialmente en las latitudes medias genera condiciones de escasez de recursos hídricos de manera crónica y afectará el desarrollo económico, político y social de estas regiones durante los próximos años (Bigas, 2012; *World Water Organization*, 2014).

En América Latina los conflictos por agua están fuertemente relacionados con tenencia de la tierra y los arreglos económicos espaciales, pero la atención se ha centrado en los aspectos de la tierra sin vínculo con el agua disponible en la misma (Castro, 2006). Los usos productivos de la tierra necesitan de agua y en regiones áridas o semiáridas el agua disponible limita la producción agrícola más que la tierra. En estos casos, las decisiones relacionadas con el uso y asignación de agua repercutirán en la estructura de la propiedad, en la distribución y en los usos de la tierra creando conflictos entre los usuarios dentro de las cuencas.

Este artículo forma parte de un estudio que analiza la situación de conflicto por uso de agua en varios países de América Latina. Se está realizando una amplia investigación bibliográfica y hemerográfica sobre los conflictos en la cuenca del río São Francisco, entre otros, y al mismo tiempo se han obtenido datos hidrológicos, a través del sistema de consulta de las instituciones brasileñas de información geográfica e hidrológica de las condiciones ambientales y socioeconómicas en las diferentes sub-regiones del São Francisco así como de la región semiárida del noreste brasileño. Se ha consultado diversos artículos sobre la instalación del Comité de Cuenca del São Francisco, sobre el proyecto de trasvase del mismo y también sobre la diversidad de opiniones y decisiones tomadas al interior y fuera del Comité de Cuenca del río São Francisco.

2. EL AGUA Y LOS RECURSOS NATURALES: UNA PERSPECTIVA TEÓRICA

Si consideramos el artículo que Garrett Hardin publicó en 1968, *The tragedy of the commons*, para contextualizar el problema de acceso a tierra y agua, se puede decir que la racionalidad individual puede conducir a una irracionalidad colectiva. La parábola que Hardin re-creó, cuenta como en un campo abierto de pastoreo en el cual algunos rebaños se alimentaban, las constantes guerras tribales, los predadores naturales y algunas enfermedades se encargaban de eliminar constantemente un número variable de animales cada año, lo cual mantenía las cosas en un nivel estable.

De esta manera existía una relación equilibrada entre rebaños y pastizales. La estabilidad era evidente

para los pastores y como los pastos eran “de todos”, pensaron que no estaría mal aumentar el número de animales de su propiedad. Cada uno de ellos trataría de hacerlo cuanto antes ya que los otros también incrementarían sus rebaños. En consecuencia, los rebaños crecieron tanto que sobrepasaron la capacidad de recomposición de los pastizales y, finalmente, todos se ven frente a una tragedia. Hardin subrayó que una sociedad en la cual los individuos persiguen racionalmente únicamente sus propios intereses estará inevitablemente destinada a la ruina. En esencia, los hombres tienden a emplear todo su ingenio y energía en la satisfacción de sus propios anhelos y si todos lo hicieran así, habría una lucha de todos contra todos y la tragedia sería inevitable.

Hardin llega entonces a conclusiones y a prescripciones muy semejantes a aquellas hechas por Aristóteles en el siglo IV a.C.: aquello que es común a la mayoría de los individuos, probablemente no será cuidado por ninguno de ellos o, si algunos individuos pueden obtener un beneficio de algo que pertenece o que fue obtenido con el esfuerzo colectivo sin tener que contribuir para que ese algo sea mantenido, entonces los otros individuos tendrán el impulso de actuar de la misma manera y llegará un momento en que no habrá nada más para usufructo de ninguno de ellos (Ostrom, 1990).

Todos estos esquemas para pensar el acceso a bienes comunes tienen, potencialmente, una extraordinaria capacidad para el escrutinio de diversos problemas en diversos campos del conocimiento. La cuestión estaría centrada en el peligro de extrapolación que toda metáfora encierra, comprimiendo el mundo real y todas sus infinitas particularidades en un arquetipo. A partir de una revisión teórica y del estudio de un expresivo número de casos empíricos de acciones colectivas auto organizadas (el gobierno de los comunes), Ostrom rechaza la inevitabilidad de la tragedia dejando la puerta abierta a la posibilidad de evitar conflictos a partir de cooperación, a partir de la participación directa de los involucrados y el alcance de acuerdos en común (Ibidem).

3. EL DILEMA DE LA PROPIEDAD VS. EL USUFRUCTO DE LOS RECURSOS NATURALES

La apropiación de un determinado espacio, considerando la utilización de sus recursos para el mantenimiento de la vida y, en algún momento, para el establecimiento de relaciones económicas con otros grupos es un hecho inherente a los grupos sociales humanos más primitivos. Más allá del hecho de que la superficie de la tierra es finita – que en sí ya es capaz de generar escasez o expectativa de escasez –, los puntos de esta superficie que tienen algún recurso natural que pueda aprovecharse para facilitar el trabajo social productivo o reproductivo, siempre han sido objeto de propiedad (privada o colectiva).

De esta manera, el suelo y su fertilidad; la localización estratégica; la abundancia de peces; los

manantiales; combustibles (carbón, gas, petróleo, hidroelectricidad); los productos de los bosques (madera, caza, recursos biológicos); los minerales metálicos (preciosos o no) y los no metálicos, la navegabilidad de un río, etc. son recursos naturales no ubicuos que, en virtud de proporcionar alguna facilidad de producción/ reproducción a los lugares en los cuales se encuentran, son estratégicamente apropiados y su necesario valor de uso no podrá ser aprovechado sin que se les dé una contrapartida a sus propietarios.

Es importante subrayar que el régimen de propiedad sobre un determinado bien y cuyo uso de importancia colectiva puede variar considerablemente en el espacio-tiempo, yendo del derecho particular de uso al comunal y del derecho de uso irrestricto (libre) al estatal (UN-Interagency FT, 2012). La gran variación de regímenes de propiedad y de los respectivos derechos de propiedad le otorgan a la cuestión de la tierra y de los recursos naturales una gran complejidad, en especial al agua, por ser un recurso fugaz pero al mismo tiempo estar intrínsecamente relacionado a la tierra.

Con este contexto como base, exploramos algunos aspectos que son detonantes de conflictos por el agua y algunas diferencias de enfoque social y económico. Las diferencias de enfoque en la gestión y manejo de los recursos naturales, fundados en modelos culturales, sociales y económicos antagónicos y que se presentan en un espacio geográfico, que a su vez integra “otros” espacios que son ocupados por diversos actores, en diferentes momentos, tornando la variable tiempo-espacio y la interacción entre

visiones diferentes, básicas para entender las luchas por el agua.

4. CUENCA DEL RÍO SÃO FRANCISCO

El río São Francisco es considerado uno de los ríos más importantes de Brasil, ya que constituye el 70% del agua superficial disponible para la región Noreste del país que es la más árida y pobre del territorio Brasileño (ANA 2004). El São Francisco es conocido como el Río de la Integración Nacional ya que su cuenca abarca partes de siete estados, con un área de drenaje de 634.781 km² correspondiente a 8% del territorio nacional. Históricamente, su curso determinó la ocupación al interior del territorio Brasileño y el desarrollo económico a lo largo de su canal principal conectando el Norte y Noreste con el Sur del país y diferenciando los espacios geográficos y territoriales de manera determinante.

Su curso se divide en cuatro partes: Alto São Francisco, desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Jequitaiá, en el Estado de Minas Gerais; el Medio São Francisco, donde empieza la parte navegable hasta la presa Sobradinho, en el Estado de Bahía; el Sub-medio y Bajo São Francisco, entre Sobradinho y la desembocadura (ANA, 2004). La región norte del estado de Minas Gerais es una zona de transición semiárida entre la zona climática húmeda y la árida del Noreste de Brasil, conocida como Polígono de las Sequías (*Polígono das Secas*). Es la región denominada como “Sertão”, ya que la población se caracteriza por estar dispersa en función de su actividad económica a base de agricultura y pecuaria de subsistencia (Figura 1).

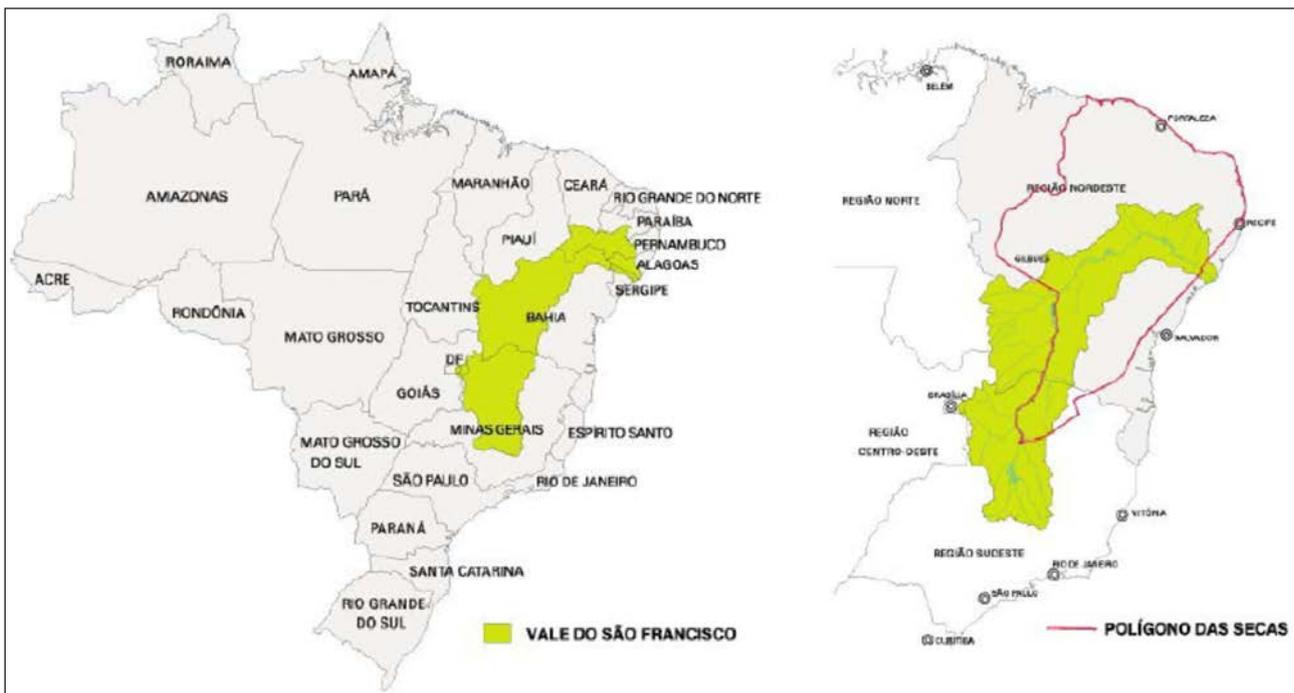


Figura 1. Localización de la Cuenca del São Francisco y *Polígono das Secas* (Fuente: Tucci, 2005)

El río São Francisco ha sufrido una serie de intervenciones, principalmente durante el siglo pasado, con la construcción de infraestructura hidráulica para proveer de servicios de abastecimiento de agua potable y energía eléctrica a la población. A lo largo de su curso se han construido ocho de las 16 plantas hidroeléctricas de esta región. Entre estas, cuatro grandes embalses que fueron construidos durante la última mitad del siglo pasado: Três Marias, Itaparica, Xingó y Sobradinho, este último con un espejo de agua de 4,214 km² y capacidad de almacenaje de 34.2 billones de metros cúbicos (Pereira & Braz, 1993; Pereira et al., 2009). Para 1990, debido a la expansión agrícola, urbana e industrial, la cuenca había perdido 66% de la vegetación original y la producción pesquera en el Bajo São Francisco se redujo en 90% debido a la alteración del caudal por los embalses en el río (MMA, 2006).

5. LLEVAR AGUA AL “SERTÃO”

Con el objetivo de llevar un modelo de modernización económica a través de la producción agrícola intensiva y apoyo a la agroindustria, en 2003, el gobierno federal propuso el proyecto de trasvase de 3.5% del caudal del río para cuatro estados, de los cuales tres están localizados fuera del área de la cuenca del São Francisco. Además de proporcionar agua a la población nordestina se pretendía incentivar la economía regional.

El proyecto de trasvase del río São Francisco se ha intentado realizar varias veces a lo largo de la historia del Brasil – por primera vez en 1820, durante el reinado de Don João VI, pasando por varios periodos históricos, hasta el último proyecto presentado y aprobado en 2000. Después de la elaboración del *Relatório de Impacto Ambiental* para el proyecto (MIN, 2004), se iniciaron obras en 2007 y su conclusión estaba programada para 2012. La idea que se ha manejado siempre ha sido la de mantener la seguridad hídrica para la población que habita la región semiárida nordestina de aproximadamente 12 millones de habitantes. Con el trasvase del agua del São Francisco se aportará agua a los cauces de ríos en los estados de Río Grande do Norte, Ceará, Paraíba y Pernambuco. Debido a esto, el gobierno de Brasil le ha otorgado al proyecto el nombre de “Proyecto de Integración de la Cuenca del São Francisco a las Cuencas del Noreste Septentrional”. En 1982, 1994 y 2000 se presentaron tres versiones del proyecto de ingeniería para asignar recursos hídricos del río São Francisco a la región árida del Noreste de Brasil (Sarmiento, 2008).

Con un costo de aproximadamente US\$3.6 billones¹, el proyecto se ha presentado como la manera de aumentar la producción agrícola por medio de

irrigación de tierras al norte del cauce principal del río por medio de 720 kilómetros de canales artificiales por donde el agua será impulsada por bombas para abastecer regiones de los estados de Ceará, Paraíba, Río Grande do Norte y Pernambuco. De acuerdo a documentos presentados por grupos opositores al proyecto se ha manifestado que 70% del agua asignada será destinada para agroindustrias y empresas trasnacionales, 2.6% para uso urbano-industrial y 4% para consumo humano en dicha región (Andrade, 2002; Heringer, 2007). En contraposición, el Ministerio de Integración Nacional (2001) establece que el principal objetivo del trasvase del Río São Francisco es el de hacer accesible el agua a la población urbana y rural (dispersa) de la región árida del noreste brasileño para satisfacer sus necesidades más básicas, así como para que la población pueda trabajar y obtener un ingreso que le permita tener un patrón de vida digno.

Históricamente, el noreste de Brasil ha sido un área de expulsión de población que emigra a grandes centros urbanos, ya que el mismo clima impone dificultad para cualquier tipo de actividad económica, inclusive para la sobrevivencia humana (Tucci, 2005). Es por esto que debido a la migración de la población y concentración de ésta en áreas urbanas se generó, a lo largo del tiempo, otro tipo de demanda de agua. La dinámica demográfica y el cambio de perfil de la población, de rural a urbana genera actualmente una problemática difícil de solucionar para los planificadores urbanos: construir infraestructura de servicios básicos de abastecimiento de agua y saneamiento a las áreas periurbanas y cinturones de miseria para evitar brotes de cólera u otro tipo de enfermedades relacionadas con el agua que se presentan frecuentemente en lugares de hacinamiento. La diversidad de uso de agua y la demanda han aumentado desde finales del siglo pasado lo cual aumenta elementos que generan fricción entre los usuarios a lo largo de la cuenca.

Además de esto, la variabilidad climática dentro de la cuenca la condiciona a periodos de sequías en épocas y regiones diferentes, ya sea por atraso de la estación húmeda o a largos periodos de estiaje, a veces de más de 15 días que se conocen como *veranicos*. Este último, es el fenómeno más frecuente, ocurre generalmente en medio del periodo de lluvias y es más común en la parte alta y media del São Francisco. En la región semiárida, la sequía genera grandes daños por la vulnerabilidad de la región. Las sequías son cíclicas y por esto se ha fomentado la búsqueda de medios para poder sobrellevar la “convivencia” con esta condición, utilizando racionalmente sus recursos naturales o con el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas, como es la captación de agua de lluvia – Programa 1Millón de Cisternas y el P1+2 – (Abner, 2007; Hernández-Bernal, 2007). La parte media y baja de la cuenca del São Francisco están dentro de la región semiárida con limitada disponibilidad de recursos hídricos, ya que los

1 En los últimos años esta cifra se ha triplicado en función de un conjunto de factores que involucran cambios en la economía brasileña, corrupción y falta de transparencia.

afuentes del São Francisco son, en su mayoría, de regímenes intermitentes (Figura 2). Esta parte de la cuenca sufre de periodos prolongados de sequía y presenta una amplia variabilidad espacial y temporal de las lluvias, concentrándose en cuatro meses del año y los 8 restantes prácticamente sin precipitación. Otro factor que acentúa la aridez de la región es la baja capacidad de los suelos para retener agua que además tiene un alto índice de evaporación.

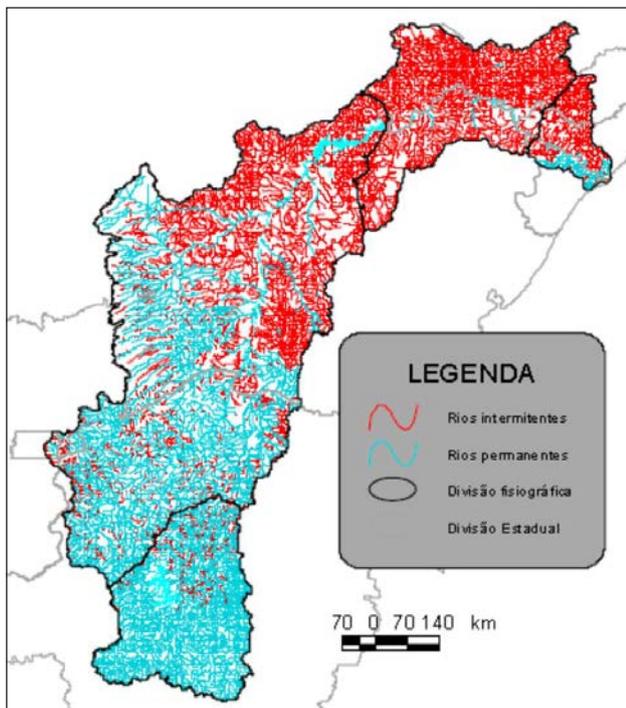


Figura 2. Ríos permanentes e intermitentes en la cuenca del río São Francisco (Fuente: ANA, 2004)

La mayor demanda de agua en la cuenca se localiza en porción media y sub-media del São Francisco para satisfacer la demanda del recurso en irrigación y para producción de energía. Aguas abajo, el resto de la cuenca se encuentra en la región semiárida y, exceptuando el canal principal y una faja adyacente de aproximadamente 3 km, el de resto de la cuenca presenta los mismos problemas de falta agua que en el Noreste Brasileño (ANA, 2004).

En 2004, la Agencia Nacional del Agua (ANA) publicó el Plan Decenal de Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco – (PBHSF, por sus siglas en portugués). Allí ya se presentaban dentro de la cuenca conflictos instalados y puntos con situación de conflicto potencial (Figura 3). El PBHSF establece que la mayoría de los conflictos son incipientes. Sin embargo, todos ellos involucran conflictos por los volúmenes de agua utilizados por actividades agrícolas, generación de energía y abastecimiento a grandes centros urbanos, además de problemas por la emisión de efluentes contaminantes industriales y de actividades mineras.

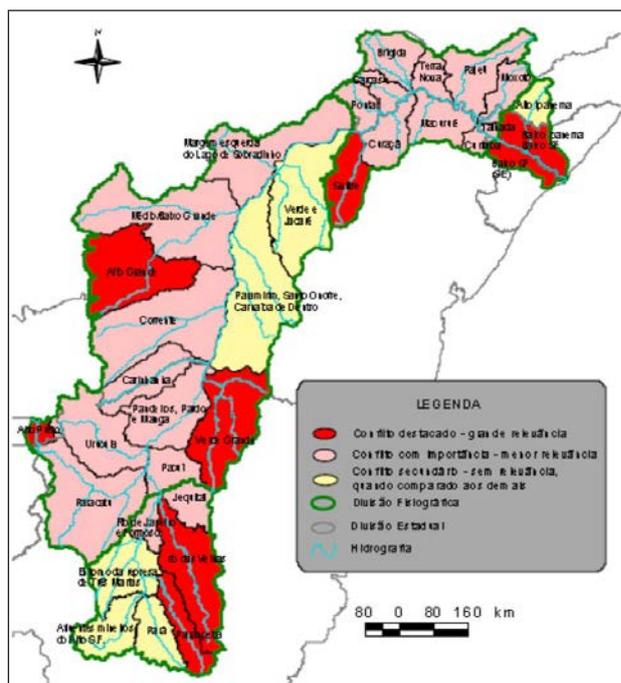


Figura 3. Niveles de conflicto por el uso diferenciado del agua (Fuente: ANA, 2004)

Uno de los principales problemas para ejercer una gestión que garantice agua suficiente para todos los usuarios, es el desconocimiento de las demandas reales sectoriales y regionales presentes y a futuro, lo que se pretende subsanar con el Plan Decenal de Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco. También representa un problema la falta de información sobre el uso de agroquímicos y su impacto en la calidad del agua superficial y subterránea lo cual dificulta aún más determinar la asignación de volúmenes de agua reales a los diferentes usos para los diferentes sectores económicos y para cubrir las necesidades de la población en y fuera de la cuenca (MMA,2006). La asignación de volúmenes de agua para diferentes sectores ya implica un problema, pero también lo es la distribución del recurso entre los estados que se beneficiaran con la transposición y los estados que están dentro del área de la cuenca. El estado de Pernambuco es el estado con mayor déficit de agua de la región NE y tiene el 70% de su territorio dentro de la cuenca. Sin embargo, junto con los estados de Paraíba y Bahía, obtendrían 20% del agua de trasvase mientras que Ceará y Rio Grande do Norte, que se localizan fuera de la cuenca recibirán 80% del agua asignada para beneficiar industrias urbanas y al sector agroindustrial (Martins & Mendonça, 2007).

La cuenca es un mosaico de contrastes de desarrollo económico, social y cultural. En Brasil, como en casi toda América Latina, las relaciones de poder están directamente vinculadas al acceso a la tierra, principalmente en áreas rurales. La concentración de la tierra ha sido un factor fundamental para determinar las diferencias de poder y al mismo tiempo el acceso al agua.

La región semiárida del noreste brasileño se caracteriza por tener estructuras de poder local que se derivan del proceso histórico de ocupación territorial basadas en el intercambio de favores políticos y en la exclusión social. La vida en esta región ha estado estrechamente relacionada a la utilización del río y la población se concentra a lo largo del mismo. Lo mismo se refleja en la ocupación de la región semiárida al norte de la cuenca. Por esta razón, durante mucho tiempo, antes que el caudal fuera regulado, las variaciones del nivel del río en períodos de baja precipitación daba la oportunidad de realizar agricultura en la planicie de inundación, actividad que se complementaba con pesca y pecuaria en pequeña escala.

Aunque en 1964 se instituyó la primera Ley de Reforma Agraria, conocida como Estatuto de la Tierra (Brasil, 1964), no hubo un cambio significativo en el reparto de tierras ya que se favoreció el aspecto económico sobre el social, y por lo tanto a las grandes propiedades por tener más recursos y facilidad de modernización y acceso a créditos agrícolas (Fonte & Filho, 2009). En 1967, se creó la Superintendencia del Valle del São Francisco, la cual propuso hacer cambios en relación a la tenencia de la tierra en la cuenca, sin embargo la Superintendencia tuvo poca duración y no se pudo concretar el cambio en la estructura de ocupación territorial.

Aun en la década de los años 70 predominaban los grandes propietarios y dentro de las haciendas los campesinos podían trabajar una pequeña porción de terreno, cedido por el propietario, para su supervivencia. Estos campesinos y miembros de sus familias podían trabajar para el dueño de las tierras, pudiendo o no recibir una compensación y en sus días libres trabajar por cuenta propia. También podía existir la renta de terreno por una determinada cantidad de dinero o a cambio de la mitad o un tercio de su producción. Generalmente estos acuerdos se realizaban de manera oral sin garantía para el campesino (Olalde, et al. 2007).

Con la creación de la Compañía de Desarrollo del Valle del São Francisco (CODEVASF), en junio de 1974, se dio prioridad a la implementación de grandes proyectos agrícolas, principalmente de fruticultura en la región del Sub-medio São Francisco. Se implantaron sistemas de incentivos fiscales y de crédito favoreciendo a los grandes propietarios rurales y a empresarios o grupos económicos de fuera de la región. Se introdujo nueva tecnología de riego lo que permitió un acceso diferenciado al agua según las distintas actividades productivas. La agricultura se desarrolló a tal grado que impulsó al Valle del São Francisco en los mercados internacionales. Esto marcó **aún** más las relaciones económicas y de poder dentro de la región y obstaculizó un cambio en relación a la tenencia de la tierra. A pesar de las iniciativas de movimientos sociales y algunos programas gubernamentales de proporcionar acceso a la tierra a grupos de agricultores sin tierra y

del reconocimiento legal de formas comunitarias de propiedad de la tierra, el acceso de los campesinos a la tierra no se realizó en ninguna de las etapas de desarrollo de esta cuenca (Filho, 2005; Olalde et al., 2007). Actualmente, sigue siendo limitado el acceso a la tierra a lo largo del río y aún **más en la región norte de la cuenca**

6. RECURSOS HÍDRICOS Y TIERRA: DOS CARAS DE UNA SOLA CUESTIÓN

En Brasil, la Comisión Pastoral de la Tierra (CPT nacional) – órgano vinculado a la iglesia – es quien realiza desde la década de 1970 el registro, la sistematización y la publicación de los diversos conflictos que acontecen en el campo.²

A través de sus cuadernos anuales, la CPT es, probablemente, la única institución nacional que colecta y divulga de manera sistemática, datos relacionados a los conflictos que suceden en zonas rurales (conflictos laborales, conflictos por la tierra, conflictos en zonas de extracción mineral, conflictos por el agua, etc.) ya que los grupos mediáticos tienen sus propios intereses y a las Instituciones de gobierno no les conviene divulgar este tipo de información – en general, humana o ambientalmente brutales.

Se pueden establecer dos claras razones para esto: o estas instituciones gubernamentales son agentes directamente involucrados en los conflictos por la acción de determinadas empresas públicas (principalmente hidroeléctricas); o están representadas por las fuerzas de seguridad, cuya función primordial es la de garantizar el cumplimiento de la ley – en estos casos, órdenes judiciales – de reintegro de tenencia y otros – que no siempre son justos a los ojos de las comunidades.

Los datos sobre los conflictos por el agua comenzaron a ser recolectados a partir del año 2002. En función de esto, establecemos el mismo recorte temporal para las Tablas 1 y 2 que se presentan a continuación, aunque, como ya se dijo, los conflictos por la tierra han sido publicados desde 1985.

Si extraemos las medias anuales del número de conflictos y de familias afectadas por los conflictos por la tierra y por el agua, verificamos que hay un elevado y prevalente número de conflictos en el campo motivados por la tierra (media de 763 conflictos/año que afectan, en media a 83,333 familias/año) con un aumento significativo del número de conflictos causados por el agua (una media de 59 conflictos/

2 Para la CPT (2010), conflictos “*son las acciones de resistencia y enfrentamiento que suceden en los diferentes contextos sociales del ámbito rural que involucran a la lucha por la tierra, al agua, al derecho a los medios de trabajo o producción. Estos conflictos acontecen entre clases sociales, entre los trabajadores o por falta o por la mala gestión de políticas públicas*”. (Traducido por los autores)

Aquí, para el propósito de nuestro análisis, los conflictos por la tierra registrados se consideraron en su totalidad y no por categorías.

año afectando a cerca de 25,358 familias todos los años).

Tabla 1. Brasil: conflictos por la Tierra

2013	763	61,136
2011	805	65,742
2009*	854	415,290
2007	615	66,943
2005	777	89,110
2003	929	171,633
Total	9156	1,633,585

Tabla 2. Brasil: conflictos por el agua

2013	93	26,697
2011	68	28,057
2009*	45	40,335
2007	87	32,747
2005	71	32,463
2003	20	9,601
Total	709	304,300

Sin embargo, como lo advierte la misma Comisión Pastoral, los registros son apenas "...una pálida imagen de la realidad brasileña donde los números, ciertamente, son mayores y más dramáticos." (CPT, 1985, p.3).

En cualquier momento o lugar, la tierra es, objetivamente, el medio de producción por excelencia, así como de reproducción de la existencia. Cuando esto se da (la apropiación y uso de una determinada fracción de territorio por un determinado grupo social), esta ya no es tan solo tierra. De acuerdo con Milton Santos (1986), ésta pasa a ser aquello que los geógrafos conceptúan como *espacio*, o sea, una zona de intersección entre el medio y sus potencialidades (recursos) y la cultura producida por ese grupo social. Es a partir de ahí que las fuerzas productivas son organizadas históricamente de este o aquel modo para que, del medio ambiente y de sus recursos se pueda extraer subsistencia y excedentes para las diferentes sociedades.

Hay dos factores culturales fuertemente entrelazados y que son fundamentales: la forma de organización de esta fuerza productiva y el tipo de propiedad que es ejercido sobre la tierra y sus recursos.

El objetivo principal del proyecto de trasvase del río es asegurar la oferta de agua para la población de una región en donde se sufre de escasez de este recurso. Sin embargo no se ha alcanzado los puntos centrales del problema y la disponibilidad y distribución del agua estarán condicionadas a los intereses que "impulsarán" el desarrollo económico de la región sin tener en cuenta esta distribución desigual. Es evidente que al mediano y largo plazo se generará un impulso en la economía regional por

el aumento de la oferta de agua para irrigación y abastecimiento de agua potable para áreas urbanas y que probablemente se disminuirá la vulnerabilidad de la población urbana a eventos de sequía, propiciando el arraigo de la población en la región. Por otro lado, existen estudios que prevén un fuerte impacto ambiental y la pérdida de 430 hectáreas de vegetación nativa y como consecuencia pérdida de biodiversidad florística y animal (MIN, 2004). Al mismo tiempo, y debido a las expropiaciones de aproximadamente 25 mil hectáreas de terrenos rurales (MIN, 2005), se generará pérdida (temporal) de empleos y por lo tanto la movilización de una parte importante de la población que tendrá que adaptarse a nuevas condiciones de producción y nuevas relaciones económicas, emigrando a las zonas urbanas o a otros Estados, repitiendo el esquema que se ha venido dando a lo largo de los años.

Sin considerar el gasto energético y económico que generará llevar agua fuera de la cuenca, el proyecto de trasvase no ha tomado en cuenta el abastecimiento de agua ni de servicios de saneamiento a la parte de la población que más lo necesita, que es la población rural, la cual se encuentra dispersa en lo que se considera la región semiárida más poblada del mundo. El simple hecho de estar dispersa dificulta el atendimento social efectivo. Asignar el agua del trasvase para actividades de agricultura irrigada implica más que la inversión, ya que se ven involucradas la especulación y valorización de las tierras. Esto puede generar conflictos entre los terratenientes y los campesinos que rentan un lote dentro de las grandes propiedades, marcando aún más la necesidad de una reforma agraria socialmente justa y al mismo tiempo acceso al agua, que aunque de manera temporal, existe en los ríos intermitentes del semiárido brasileño.

7. CONCLUSIONES

Es sabido que la desigualdad es una marca fundamental de la formación social brasileña y esto se revela también en los procesos de ocupación del territorio. Es así, que los datos que conforman la estructura de la propiedad rural del país se mantienen en niveles históricos muy semejantes, expresando una distribución desigual de la tierra y, en consecuencia, de los otros recursos naturales.

Los datos de los últimos Censos Agropecuarios de Brasil (IBGE, 1985, 1996 y 2006), por ejemplo, validan esta afirmación al hacer evidente esta desigualdad cuando las parcelas de hasta 10 hectáreas y que ocupan 2.7% del área total ocupada, representan el 47% de las propiedades rurales, mientras que las parcelas de 1000 ha. o **más, representan tan solo el 1% de propiedades rurales y ocupan más del 43% del área total.** Los estratos intermedios no reflejaron cambios durante esos años (IBGE, Censos 2007).

Es notorio que inclusive frente a estos hechos, tanto el proyecto gubernamental de transposición (y todos los

discursos relacionados que pregonan la realización de la obra) como el voluminoso discurso crítico técnico-científico o político-ideológico que destaca sus ineficiencias, equivocaciones u omisiones, casi nunca se refieren a los factores relacionados a la distribución de la tenencia de la tierra.

Se sabe que los argumentos que presentan el abastecimiento de agua domiciliar para una población de aproximadamente 12 millones de nordestinos como la principal justificativa para la ejecución de las obras, no son verdaderos. Hay evidencias técnicas en el proyecto de la transposición que contradicen esta justificación (ANA, 2003; Abner, 2007; Manuelzao Project, 2007). Entre ellas podemos citar el enorme volumen de agua que será trasvasado por el sistema aún frente a problemas significativos; la inexistencia de algún sistema de distribución capilar que hiciera que el agua de los canales estuviera realmente disponible para la población (bastante dispersa); no considerar los elevados índices de evapotranspiración registradas en la región (Feijó & Torggler, 2007).

Frente a esto, no es muy difícil percibir que el real objetivo de “integración de las cuencas” no es exactamente llevar agua a la población del semiárido brasileño, sino proporcionar abastecimiento subsidiado a los proyectos de inversión en agricultura irrigada (principalmente fruticultura) y en la cría de camarones de la región. Esto no necesariamente es malo. El error está en omitir el objetivo de abastecer a la población que más lo necesita porque hace al proyecto más costoso económica, social y ambientalmente.

El agua y la tierra no deben ser pensadas de manera desasociada. Por esto, llevar el agua sobre una estructura de propiedad rural desigual y excesivamente concentrada, como la brasileña, sin pensar la democratización de acceso a la tierra, puede ser contraproducente. Es muy probable que el trasvase no solucione el problema de sequías (para la mayoría de la población) y que a la vez amplíe los niveles de concentración de tierra verificados en la región.

BIBLIOGRAFÍA

ABNER, J. 2007. Reforma hídrica do Nordeste como alternativa à transposição do Rio São Francisco. Cadernos do Centro de Estudos e Ação Social, n. 227, p. 107-117.

ANA – Agencia Nacional de Águas, 2003. Integrated Management of Land Based activities in the São Francisco River Basin Project. Preliminary Report. Global Environment Facility– GEF, United Nations Environment Program– UNEP, Organization of American States – OAS, Brasília, D.F Brasília, D.F.

ANA – Agencia Nacional de Águas. 2004. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013) –

Resumo Executivo. Fundo Mundial para o Meio Ambiente – GEF, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA e Organização dos Estados Americanos – OEA, Brasília, D.F.

ANDRADE, R. 2002. “Águas para a vida!” **Assim gritam as vozes que vivem na bacia do velho chico**. Fórum permanente de defesa do São Francisco / International rivers network / Coalizão Rios Vivos. Salvador de Bahia, Brasil.

BIGAS, H. (Ed.) 2012. The Global Water Crisis: Addressing an Urgent Security Issue. Papers for the InterAction Council, 2011-2012. UNU-INWEH, Hamilton, Canada.

BRASIL- Presidência da República. 1964. LEI Nº 4.504, de 30 de Novembro de 1964. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, D.F.

CPT- Comissão Pastoral da Terra. 1985. Conflitos no Campo Brasil, Gôiania, Brasil.

CPT- Comissão Pastoral da Terra. 2002-2013. Conflitos no Campo Brasil, Gôiania, Brasil.

CPT- Comissão Pastoral da Terra. 2010. Disponible en <http://www.cptnacional.org.br/index.php/publicacoes/noticias/conflitos-no-campo/21-acompanhamento-dos-conflitos-no-campo>.

CASTRO, José Esteban. 2006. Water, power, and citizenship: social struggle in the Basin of Mexico. (St. Antony’s series) Revision of the author’s thesis (doctoral)—Oxford, United Kingdom.

FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003. Review of world water resources by country. Water Reports, no.23, Rome.

FEIJÓ, R. & TORGLER, S., 2007. Alternativas mais eficientes para a transposição do São Francisco. Cadernos do Centro de Estudos e Ação Social, n. 227, p. 125-150. Brasil.

FILHO, J. 2005. A dinâmica política, econômica e social do rio São Francisco e do seu vale. Revista do Departamento de Geografia, no. 17. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.

FONTE, J. & FILHO, R. 2009. A formação da propriedade e a concentração de terras no Brasil. Revista de História Econômica & Economia Regional Aplicada – Vol. 4 Nº 7 Jul-Dez.

HARDIN, G. 1968. The Tragedy of the Commons. Science, New Series, Vol. 162, No. 3859. (Dec. 13, 1968), pp. 1243-1248. Washington, D.C.

HERINGER, A. 2007. A Caravana em defesa do São Francisco e do Semi -árido contra a Transposição. Disponible en http://www.manuelzao.ufmg.br/assets/files/Biblioteca_Virtual/A-Caravana-em-defesa-do-Sao-Francisco-e-do-Semi.pdf .

HERNÁNDEZ-BERNAL, N. 2007. Avaliação de técnicas de captação de água de chuva para recuperação ambiental na região semi-árida do Vale

- do Jequitinhonha. Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, SMARH. Belo Horizonte. Minas Gerais, Brasil.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1985. Censo Agropecuário 1985. Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1996. Censo Agropecuário 1995-1996. Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. Censo Agropecuário 2005-2006, Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Censos 2007. Censo Agropecuário 2007. Rio de Janeiro, Brasil.
- MANUELZAO PROJECT. 2004. The São Francisco Caravan Project. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- MARTINS, M & MENDONÇA, M. 2007 Caravana em defesa do São Francisco passa pelo Nordeste. Rede Social de Justiça e Direitos Humanos. Disponible en: <http://www.social.org.br/artigos/artigo041.htm>.
- MIN – Ministério da Integração Nacional. 2001. Da transposição do rio São Francisco. Estudos de inserção regional. VBA Consultores. Brasília, D.F.
- MIN – Ministério da Integração Nacional. 2004. Relatório de Impacto Ambiental. Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, Brasília, D.F.
- MIN – Ministério da Integração Nacional. 2005. Programa de Indenização de Terras e Benfeitorias, Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, Brasília, D.F.
- MMA –Ministério do Meio Ambiente. 2006. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco, Brasília, D.F.
- OLALDE, A., OLIVEIRA, G. & GERMANI, I. 2007. A terra e desenvolvimento territorial no médio São Francisco. XLV CONGRESSO DA SOBER. “Conhecimentos para Agricultura do Futuro”- Londrina, Paraná, Brasil.
- OSTROM, E. 1990. Governing the Commons. New York: Cambridge University Press.
- PEREIRA, A & BRAZ, E. 1993. Reservatório de Sobradinho deplecionamento e consequências. IBGE. Anais do VII SBSR, Salvador- Bahia, Brasil.
- PEREIRA, S., PRUSKI, F., SILVA, D. & RAMOS, M. 2009. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- SANTOS, M. 1986. A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção. Edusp: São Paulo.
- SARMENTO, F. 2008. Otimização de custos de adução na transposição do rio São Francisco. ABRH IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador-Bahia, Brasil.
- TUCCI, C. 2005. “Integrated management of land-based activities in the São Francisco river basin”. Terminal evaluation report of GEF project no GF/1100-99-14, s.l.
- UN - INTERAGENCY FRAMEWORK TEAM FOR PREVENTIVE ACTION. 2012 *Land and Conflict*. v.13, n.3. Paris, France.
- World Water Organization. Water Facts disponible en internet: http://www.theworldwater.org/water_facts.php, en febrero de 2014.

INFLUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES EN LA GARANTÍA DE ENTREGA DE AGUA ANUAL

INFLUENCE OF EXTREME RAINFALL IN THE ANNUAL WATER SUPPLY

Eduardo O. Planos Gutiérrez¹

Resumen

Las grandes precipitaciones tienen una influencia relevante en el valor de la lámina de precipitación anual, y por tanto también en el escurrimiento anual. Habitualmente estas precipitaciones son analizadas por su peso en los desastres hídricos; sin embargo, pocas veces se trata la manera de cómo considerarlas en el análisis de los valores promedios y sus aplicaciones. En la literatura relacionada con el tema, no existen artículos relevantes que realicen este análisis. Considerando que las grandes precipitaciones tienen una rara frecuencia y una influencia relevante en los promedios hidrológicos, este artículo expone la relación entre las grandes precipitaciones y la garantía de entrega anual de agua.

Palabras claves: grandes precipitaciones, series mezcladas, garantía de suministro de agua

Abstract

The heavy rainfall have a significant influence on the value of annual rainfall, and therefore also in the annual runoff. Usually these precipitations are analyzed by their weight in water disasters; however, their role in the mean values is rarely considered, for practical purposes. In the relevant papers about this matter is not present that kind of analysis. Whereas the extreme rainfall has a rare frequency and a major influence on hydrological averages, this article describes the relationship between heavy rainfall and annual plan of water delivery.

Keywords: heavy rainfall, mixed series, guarantee water supply

1. INTRODUCCIÓN

La lámina anual promedio de precipitación, es una magnitud que incluye los aportes pluviales de varios fenómenos hidrometeorológicos (precipitaciones convectivas locales, frentes fríos, huracanes, entre otros), cada uno de ellos con características propias, fundamentalmente en cuanto a frecuencia y capacidad pluvial. En el caso de Cuba, donde la única fuente importante de agua es la precipitación, esta magnitud está formada por aportes de lluvia de fenómenos extratropicales, tropicales no ciclónicos y ciclónicos. Los fenómenos ciclónicos, a diferencia del resto de los mencionados, son los de mayor capacidad pluvial, con facilidad rebasan los 400 mm en menos de 10 horas. En una lámina anual de precipitación promedio de muchos años, el peso de los registros ciclónicos puede representar más del 15% del valor total. Sin embargo, los ciclones no afectan a un mismo territorio todos los años; lo que ocasiona que, a pesar de su significativo peso en el valor promedio anual, el agua que éstos generan no esté garantizada anualmente. Lo anterior puede ser analizado con un enfoque similar al de poblaciones mezcladas.

Este es un tema complejo, que no ha sido frecuente en la literatura y práctica hidrológica relacionada con el dimensionamiento de la capacidad de los embalses

y la administración del agua almacenada en ellos. Por tanto, este artículo expone el tema, presentando el impacto que tienen las grandes precipitaciones en la lámina anual y el promedio hiperanual de esta variable, y en el escurrimiento, con una propuesta preliminar de cómo tratar este asunto; reconociendo que aún hay mucho que profundizar.

Los resultados expuestos en este artículo corresponden a un estudio de caso desarrollado para la provincia de Pinar del Río en el occidente de Cuba.

2. MARCO CONCEPTUAL

La definición de grandes precipitaciones es todavía un concepto empírico. La calificación de una lámina de lluvia como tal es descrita de dos maneras fundamentales, por un lado se refiere los registros máximo-absolutos de 24 horas, que suelen agruparse en una serie cronológica y, en un sentido más amplio, esta denominación comprende a todos los eventos que en 24 horas o menos igualen o superen la lámina de 100mm. Con más rigor científico, los climatólogos cubanos refieren como grandes precipitaciones "... aquellas en que se acumulan 100 mm o más de lluvia en una localidad durante 24 horas o menos.

¹ Instituto de Meteorología, Cuba. Loma de Casablanca S/N. Municipio Regla. Habana. Cuba CP 11700. eduardo.planos@insmet.cu

Su ocurrencia está fuertemente determinada por la combinación que se produce entre las circulaciones atmosféricas, a diferentes escalas espaciales, y los factores físico-geográficos de la región, por lo que, generalmente, se asocian a la aparición de determinados patrones de circulación sobre Cuba...”, (Alfonso et al, 1997). Mientras que, desde la óptica hidrológica de los eventos máximos relacionados con los grandes procesos fluviales extremos, este concepto se limita a los eventos pluviales que mantienen una intensidad elevada y sostenida durante intervalos de tiempo superiores al de concentración promedio de las cuencas enclavadas en un área y que provocan simultáneamente en una región crecidas notables (Planos et al, 2012). Otro elemento que se ha sido tenido en cuenta para la conceptualización y caracterización de las grandes precipitaciones, es el peso que éstas tienen el acumulado total de lluvia de un intervalo determinado de tiempo, que muchas veces determina la clasificación de la pluviosidad de un período, en cuanto a su denominación como seco, medio o húmedo; lo cual, si no es debidamente analizado, puede conducir a errores en la interpretación del comportamiento de la precipitación (Planos et al, 2012). Pero aún no existe una argumentación científica, debidamente fundamentada, que incluya en la definición de grandes precipitaciones elementos físicos que justifiquen el umbral de 100 mm utilizado en Cuba para clasificar este fenómeno.

En la práctica es reconocido el papel de estos eventos pluviales en el balance hidrológico de una región; en Cuba, por ejemplo, frecuentemente se hace alusión a la necesidad del paso de depresiones tropicales o ciclones, sobre todo cuando los embalses y acuíferos están muy deprimidos por el impacto de un proceso de sequía prolongado e intenso; un sistema meteorológico de esta naturaleza puede ser capaz de satisfacer, en unos días, la carencia de agua almacenada. No obstante lo anterior, como podrá apreciarse en la breve revisión bibliográfica que sigue a continuación, los trabajos realizados sobre este tema apenas abordan la influencia de las grandes precipitaciones en el balance hídrico, y, en opinión de este autor, la práctica ingeniera relacionada con el planeamiento hidráulico y la administración del agua, no dispone herramientas que considere adecuadamente esta influencia.

Planos et al (2012), presentaron una exhaustiva revisión bibliográfica que resume los trabajos realizados en Cuba hasta el año 2012, y de obras importantes de la literatura internacional; éstas últimas seleccionadas por haber marcado un hito en esta temática. A continuación se presenta, resumidamente, una selección de obras relevantes relacionadas con las grandes precipitaciones, que fueron incluidas en la revisión bibliográfica antes mencionada. Estos conocimientos constituyen el marco teórico antecedente del análisis que se presenta en este artículo, sin llegar a ser una evaluación del estado del arte en este tema.

2.1 Síntesis de algunos trabajos realizados en Cuba

En Cuba, el primer trabajo conocido publicado fue “*La lluvia en la Habana*” (Millás, 1943), donde se realiza un estudio descriptivo detallado de la intensidad de las precipitaciones por intervalos de tiempo, basado en 33 años de información del antiguo Observatorio Nacional y acompañado de una cronología de las lluvias con intensidades iguales y mayores de 0.5 mm.min⁻¹. En este resultado se señala como máxima intensidad un registro de 3.3 mm.min⁻¹, se resalta la baja frecuencia de intensidades mayores de 2 mm.min⁻¹ y se plantea que intensidades entre 1.5 y 2 mm.min⁻¹ han llegado a durar hasta dos horas. Este autor, basado en el análisis de una serie de 83 años (1859 - 1941) determina dos períodos con diferencias notables entre sus medias (1859-1898 y 1899-1941), y según refiere, el primero más homogéneo y el segundo más variable, con una oscilación entre los totales anuales máximos y mínimos de casi el doble del primer período, y la ocurrencia de muchos años con totales anuales inferiores a 1000 mm, varios de ellos consecutivos.

En el año 1958 se publicó en trabajo “*Intensidad de la lluvia en La Habana*” (Martínez, 1958), que aborda el tema de la intensidad de las precipitaciones con un enfoque ingenieril. Martínez utilizó en su análisis un método gráfico-analítico, aplicado a las series de registros de dos pluviógrafos instalados en la ciudad de la Habana, y comparó los valores obtenidos con otros correspondientes a dos regiones de los E.E.U.U (zona de Galveston, New Orleans, Jacksonville y zona de New York, Philadelphia, Washington y Atlanta). Desde el punto de vista geográfico, las regiones de E.E.U.U escogidas por Martínez no fueron apropiadas para compararlas con el comportamiento de la precipitación en Cuba; pero comparando los resultados obtenidos por el ingeniero cubano con los valores estimados para el sur de los E.E.U.U., se comprueba que las conclusiones de este estudio no difieren mucho entre sí.

El trabajo de Martínez resultó un gran aporte al estudio de las intensidades de las lluvias de diferentes duraciones y probabilidades en el país, y hay que mencionar que fue el único que existió por mucho tiempo para el cálculo de las intensidades de las lluvias para pequeños intervalos de tiempo (de hasta 2 horas). Por otra parte, este trabajo refleja un estadio temprano en las investigaciones sobre los extremos hidrológicos, donde debido a la disponibilidad de datos y la longitud de las series, era imposible hacer estudios precisos o regionales, que permitieran comparar los cálculos, por lo que la ingeniería de entonces se basaba en estimaciones locales y en el buen juicio de los especialistas.

En 1967, en la publicación “*Las Precipitaciones en la Isla de Cuba*” (Trusov, 1967) se hace un detallado análisis del comportamiento de la lluvia en el país. La red disponible para esta investigación tenía equipos

con largos registros pero con una distribución espacial insuficiente. Se elaboraron mapas de láminas de lluvias del 1, 5 y 10% de probabilidades. No obstante las limitaciones de la red, Trusov elaboró un conjunto de importantes conclusiones sobre el comportamiento de las grandes precipitaciones, que conservan validez, las cuales se resumen a continuación: las grandes precipitaciones en Cuba pueden ocurrir en cualquier época del año; la distribución espacial de la lluvia anual y del período húmedo siguen el patrón de distribución de las grandes precipitaciones; y existen áreas del país donde la frecuencia de este tipo de lluvia es baja, como en el norte de la parte central de la Isla de Cuba.

Berdo Koshiasvili (1972), con su trabajo *“Las lluvias torrenciales en Cuba”* hizo un aporte importantísimo al estudio de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas. Los objetivos principales del trabajo de Koshiasvili fueron: (a) hacer una caracterización de estas lluvias, (b) elaborar un mapa isoyético de la lámina de lluvia del 1% de probabilidad, (c) difundir en Cuba la metodología del cálculo de la intensidad de la lluvia por intervalos de tiempo característicos (5, 10, 20, 40, 60, 90, 150, 300, 720, 1440 y 2880 min.) y (d) lograr un documento de carácter metodológico para hacer estudios similares, que pudiera ser actualizado periódicamente. Para esto contó con una red de estaciones pluviométricas bien distribuida y con series de observación prolongadas. En 1972 se construyeron las primeras curvas de *Intensidad-Duración-Frecuencia* de la lluvia (IDF), para equipos aislados en diferentes localidades de Cuba.

Koshiasvili logra establecer diferencias en el comportamiento de las grandes precipitaciones dependiendo de los sistemas meteorológicos que las producen, fundamentalmente entre las de origen convectivo local y las ciclónicas. Estas diferencias conciernen a la duración de los aguaceros, la intensidad y la distribución horaria de la lámina de lluvia.

En la obra *“El escurrimiento medio y formas de las avenidas”* (Matakiev, 1973), es notable la claridad conceptual del autor sobre el papel que desempeña en la Hidrología y más específicamente en la formación y tratamiento de las series cronológicas de eventos máximos, la génesis pluvial del fenómeno. Este autor formula los criterios siguientes: (a) *“... la probabilidad de ocurrencia de una avenida, al igual que de un fenómeno cualquiera, no debe fundamentarse solamente en los registros locales de observación, sino también en su origen y posibilidad”*; (b) *“...Los puntos empíricos que definen la marcha principal de la curva teórica son producto de avenidas provocadas por lluvias intensas, pero éstas no tiene origen común”*; (c) *“...la confusión en el origen de los fenómenos disminuye la representatividad de los datos de una serie, ya que un pronóstico derivado de esa forma a través de la curva teórica de probabilidad correspondiente, resulta dudoso.Aquí se habrá*

supuesto que la serie sea representativa, lo cual no será rigurosamente cierto cuando se trate de series cortas de avenidas producidas por lluvias intensas de origen heterogéneo”; y (d) *“...teóricamente, las grandes avenidas de baja probabilidad, son fenómenos extraordinarios que no se pueden observar al mismo tiempo en muchos ríos de la misma región. Sin embargo, tal ocurrencia es alterna y frecuente, por lo que estos casos dejan de ser extraordinarios desde el punto de vista climático”*.

En 1988, Lapinel, basado en una serie histórica de 10 años (1971-1980), aporta su obra *“La circulación atmosférica y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba”*, donde describe nueve situaciones sinópticas que influyen predominantemente sobre el país y, de hecho, en el comportamiento de la lluvia, a saber: (1) Influencia muy cercana del Anticiclón del Atlántico, (2) Flujo anticiclónico extendido, (3) Débil gradiente barométrico, (4) Ciclón tropical, (5) Zonas de convergencia en el flujo, (6) Baja extratropical, (7) Zonas frontales, (8) Anticiclón típico continental migratorio y (9) Situaciones indeterminadas. Además de caracterizar climatológicamente las situaciones sinópticas, este autor establece la participación general que tiene cada una de ellas en el comportamiento de la lluvia, siendo útil a los objetivos de este artículo, la determinación del peso que tiene la lluvia debida a cada una de estas situaciones en la lámina promedio anual que se acumula en el occidente y oriente del país.

En Planos (1991, 1999, 2000) y Planos et al (2005, 2012), se estudia profundamente las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas según su origen meteorológico. En estos trabajos se realiza un detallado análisis de los métodos empleados comúnmente en el estudio de estas precipitaciones; y se caracterizan según su origen, determinando diferencias físicas en su comportamiento, desde el punto de vista de su distribución espacio temporal, la magnitud de los parámetros que las caracterizan (media, coeficiente de variación); se construyen relaciones típicas (intensidad por intervalos determinados, curvas IDF, curvas de masa); se estudia la variabilidad de estas láminas extremas en series de más de 100 años de longitud y se determina y regionaliza el peligro y riesgo por precipitaciones intensas. Particularmente, en la obra del año 2012 se aborda por primera vez el tema que del que es objeto este artículo, la influencia de las grandes precipitaciones en la gestión del agua.

Un trabajo de particular importancia es el denominado *“Sistema de reconocimiento de patrones² de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba”* (Arencibia, 2009). Aquí se admite la importancia de conocer los patrones atmosféricos que provocan este tipo de precipitaciones. El autor fundamenta su estudio en la hipótesis de que a partir de la

2 Configuraciones sinópticas bien determinadas

identificación de los patrones sinópticos que producen eventos de lluvias intensas, es posible diseñar un sistema que permita su reconocimiento, a corto y mediano plazo, cuestión esencial para las aplicaciones prácticas que pretendan vincular el quehacer meteorológico con el hidrológico, además de profundizar en el conocimiento de las causas de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas.

Se determinaron patrones de eventos de lluvias intensas en el período lluvioso y en el período poco; dejando claramente establecido que la mayor cantidad de eventos de lluvias intensas estuvo asociada a patrones de ciclones tropicales, no obstante el mayor número de días con lluvias localmente intensas estuvo asociado a patrones frecuentes de la circulación atmosférica. Utilizando técnicas analógicas, se elaboró una metodología para identificar o reconocer los patrones que generan eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba, que fue validada satisfactoriamente.

2.2 Síntesis de trabajos realizado por autores internacionales

En la bibliografía internacional esta temática ha sido ampliamente tratada, y en ella también se refleja que el conocimiento de este fenómeno y de los métodos de análisis han estado principalmente determinadas por prácticas ingenieras, principalmente las relacionadas con el diseño hidráulico y, en menor medida, con pronósticos meteorológicos, utilizando métodos estadísticos y dinámicos. Hasta finales de los años setenta las discusiones se dirigían a determinar cuáles eran las funciones de distribución más adecuadas para el procesamiento de las series cronológicas y a la obtención de curvas de relaciones entre variables y de envolventes que representan el comportamiento espacio-temporal de los fenómenos hidrológicos máximos; aunque el foco ha estado siempre puesto en las predicciones probabilísticas de los valores extremos. La lista de autores que han abordado esta materia es inmensa; por ello, como representativo de lo realizado en una época, de la situación actual y de las tendencias en el desarrollo del conocimiento sobre este tema, se ha seleccionado un grupo limitado de obras, sin pretender que estas sean las cumbres de las investigaciones realizadas en el mundo; tan solo han sido escogidas porque recorren con objetividad y acierto, la historia y futuro de los trabajos sobre los extremos hidrológicos máximos. Concorde con lo anterior, a continuación se comentan los trabajos de B. Sevruk y H. Geiger (1981) y Cunnane (1989), sobre el modelado estadístico de las series cronológicas de eventos máximos, en las cuales se hace un resumen del estado del conocimiento sobre este tópico hasta finales de la década del ochenta; y el trabajo de Madsen H. y Rosbjerg D. (1997) que expone los avances en esta práctica.

Selection of distribution types for extremes of precipitation. (B. Sevruk y H. Geiger, 1981)

Los autores examinan los métodos históricamente utilizados en la selección de los tipos de distribución para el análisis de los valores extremos; resaltando la particular importancia que, para esta elección, tiene considerar las características climáticas regionales y de los eventos pluviales. Estos autores recorren conceptual y metodológicamente los aspectos que deben ser considerados para elegir una función de distribución, demostrando que esto no debe ser un criterio matemático basado exclusivamente en un buen ajuste, sino que debe considerar todos los elementos que deciden las características de las series de valores máximos y los elementos físico-geográficos que influyen en la ocurrencia de los extremos hidrológicos; elemento sumamente importante, porque debido al papel que tiene la estadística matemática en los métodos de análisis climatológicos e hidrológicos, muchas veces se ha caído en el error de matematizar el problema por encima del sentido físico. Para realizar este trabajo Sevruk y Geiger revisaron una extensa bibliografía, y como nota curiosa, puede referirse que el artículo más antiguo tenido en cuenta por ellos, es: "*Criterion for de rejection of doubtful observations*", publicado por Pierce en la *Astronomical Journal* del 1852; el tema de este antiguo artículo es aún muy debatido y no bien resuelto en la literatura contemporánea.

En la composición de las series consideran imprescindible atender a los elementos siguientes: determinación de la influencia de los errores sistemáticos en la observación; el estudio de la consistencia, la homogeneidad y aleatoriedad de las series; la influencia en los cálculos de la longitud de las series y el papel de los valores anómalos. Y en cuanto a los métodos de análisis de frecuencia de los valores extremos, indican que existen tres fundamentales: (a) análisis de frecuencia de series compuestas por el valor máximo absoluto anual; (b) el modelado de las series temporales con modelos estadísticos complejos y (c) el estudio de series de duración parcial. Concretándose a los métodos referidos como (a) y (c), concluyen que es imprescindible seleccionar la distribución adecuada, teniendo en cuenta la influencia que sobre el modelado de frecuencia puede tener el clima, los factores físico geográficos y la duración de la precipitación; y una vez elegida la función de distribución, es importante prestar atención a la forma como se determinan los parámetros del ajuste, a la comprobación de la bondad del ajuste dentro de intervalos de confianza correctamente determinados y a la posición de ploteo si se utilizan métodos gráfico analíticos.

En sus conclusiones Sevruk y Geiger reflejan con claridad el estado del conocimiento mundial en esta temática hasta 1981:

“El análisis de la frecuencia de los valores extremos de precipitación es generalmente aplicado a las series de valores máximos anuales. La precisión del análisis depende de la validez de ciertas suposiciones que deben ser demostradas con el propio estudio estadístico. El error debido a la insuficiente longitud de las series varía entre el 30 y 50 por ciento, en el rango de extrapolación, y el error debido a una incorrecta elección del tipo de distribución de frecuencia puede ser mayor; mientras que la diferencia entre los estimados obtenidos con una misma distribución en una serie de datos, pero ajustando los parámetros con métodos distintos, puede llegar hasta el 20%.

Las distribuciones más frecuentemente utilizadas en la práctica internacional son las denominadas Extrema de Tipo I y la Log-Normal. Algunas distribuciones pueden ser mejores que otras bajo determinadas condiciones estacionales o físico-geográficas, pero no existe un criterio de aplicabilidad para las diferentes distribuciones y métodos de ajuste de sus parámetros, que no sean las pruebas estadísticas de calidad del ajuste y la comparación de los valores observados con los modelados usando las distribuciones teóricas.

Entre todos los métodos existentes para el ajuste de los parámetros de las funciones de distribución, el de Máxima Verosimilitud se considera el más eficiente, pero es a su vez el más complicado de trabajar numéricamente; contrariamente, el Método de los Momentos es menos preciso pero más fácil de trabajar. Una ventaja de ambos métodos es que no requieren del uso de fórmulas de posición, que aún son controversiales.”

Statistical distributions for Flood frequency analysis. (C. Cunnane, 1989)

Esta es una de las revisiones más importantes realizadas sobre las técnicas de ajuste de funciones de distribución de frecuencias a series de máximos anuales (MA) y de duración Parcial (DP). En el trabajo se definen y comparan los modelos MA y DP y se desarrolla la relación entre el período de retorno T y la función de distribución de las magnitudes de las crecidas en cada serie, lo que conduce a la relación $Q-T$; se reseñan, además, las propiedades estadísticas generales de las series observadas, considerando los problemas hallados en la modelación probabilística. Entre los aspectos más relevantes resultantes de este trabajo figuran los siguientes:

1. Se exponen los métodos para estimar los cuantiles de la distribución, utilizando por separado y juntos los datos regionales y los obtenidos *in situ*, utilizando métodos basados en los Momentos ponderados de probabilidades regionalmente promediadas, los métodos bayesianos y el modelo TCEV estimado regionalmente; también se

estudia la homogeneidad regional y la estimación de los cuantiles en zonas áridas.

2. Se discuten los métodos para elegir entre distintas distribuciones estadísticas, señalando que las pruebas estadísticas convencionales para determinar la calidad del ajuste tienen escaso valor en los estudios regionales.
3. Demuestra que las distribuciones Wakeby y del valor extremo general (GEV), utilizadas regionalmente con parámetros calculados por los momentos ponderados de probabilidad, son menos sensibles a los cambios de la distribución original desconocida que se estima con la modelación.

Recent advances in modelling of extreme hydrologic events. (H. Madsen y D. Rosbjerg, 1997)

Según este trabajo, y coincidiendo con la caracterización de décadas anteriores, en la actualidad prevalecen dos métodos para el análisis de los valores extremos: las series de valores máximos anuales (AMS) y las series de duración parcial (PDS). La diferencia fundamental entre estos métodos es la definición de la región de valor extremo; el método de PDS incluye todas las excedencias sobre un umbral predeterminado y el método de AMS considera sólo el máximo anual de cada año que compone la serie.

Para la estimación de eventos extremos, en ambos métodos la precisión está afectada por la cantidad de datos disponibles en el sitio de interés y una manera de suplir esta insuficiencia es utilizando información regional, combinando datos de sitios diferentes en una región que puede asumirse que tiene un comportamiento hidrológico similar; método que ha sido conocido como de Estación-Año. El uso de información regional reduce la incertidumbre y, además, facilita la selección de la distribución de frecuencia; del mismo modo este procedimiento facilita las estimaciones en lugares particulares sin datos, de una región donde existan otras localidades con observaciones. Las investigaciones a lo largo de la historia hasta el presente se han basado más en el método AMS, y poco se ha hecho en la utilización de las PDS.

En este artículo se presentan los avances logrados en la década de los años 90 en el caso específico del método PDS; específicamente, un esquema de estimación regional desarrollado para este modelo. El procedimiento incluye el concepto del índice-inundación y el método de *L-momentos*, para la estimación de parámetros regionales, la delineación de regiones homogéneas y la determinación de distribuciones regionales. Para una valoración más general de homogeneidad regional y la descripción de parámetros regionales, se introdujo un método de regresión basado en los mínimos cuadrados generalizados (GLS). El método de PDS proporciona una definición más apropiada de los valores extremos en una a región.

Proyecto FRIEND (Flow Regimen from International Experimental Network of Database) del Programa Hidrológico Internacional la UNESCO

Este proyecto comenzó en el año 1985, produciendo un vuelco en las investigaciones sobre la regionalización hidrológica de los eventos extremos. Los esfuerzos se centraron en el empleo de funciones de distribución de dos componentes, como la *SRQT-ETmax* o la *Gumbel doble*, el análisis regional y en el mejoramiento de la estimación de los parámetros estadísticos de las series, a través de un minucioso rescate de datos históricos y el desarrollo de bancos de datos regionales (Lang, 1997). En el marco de las numerosas investigaciones realizadas bajo la sombrilla del Proyecto FRIEND, y por ser uno de sus objetivos la generalización regional, se destaca la regionalización de los parámetros estadísticos asociados a las grandes precipitaciones.

Otros aspectos de interés en los trabajos que hoy se realizan fuera de Cuba son el empleo de modelos estocásticos con fines de prevención hidrológica, el empleo del radar meteorológico y los satélites para el estudio, la medición y el pronóstico del comportamiento de las grandes precipitaciones, el empleo de Sistemas de Información Geográfica y el conocimiento hidrometeorológico de las grandes precipitaciones según su origen, con particular atención a la influencia de la orografía (Llasat, 1997)

Esta síntesis de conocimientos, basada en obras seleccionadas, muestra la evolución conceptual habida en esta materia. Sin embargo, el análisis probabilístico de las series de variables hidrológicas máximas continua moviéndose en torno a la aplicación de las funciones de distribución tradicionalmente utilizadas para modelar series de muestras unipoblacionales, sin abordar, con la fuerza y el grado de generalización requeridos, las técnicas de modelado de dos componentes, ni de modelos de lluvia - escurrimiento como el *GRADEX*, ni la modelación matemática determinística; del mismo modo que las metodologías utilizadas son predominantemente estadísticas, sin tener un sustento físico apoyado en estudios de la física y la circulación de la atmósfera.

Otros elementos que han incidido desfavorablemente en este tipo de estudio han sido:

- La corta extensión de las series cronológicas utilizadas,
- la distribución espacial de los equipos seleccionados para los análisis no concordante con el patrón que caracteriza a cada tipo de evento generador de las precipitaciones,
- el uso inadecuado del concepto de analogía y la transposición de tormentas y
- la carencia de una base regional de referencia para el análisis del fenómeno.

Finalmente, como se nota en esta breve descripción del estado del conocimiento sobre este tema, no se han encontrado trabajos que traten el rol de las grandes precipitaciones en la disponibilidad de agua anual, lo cual es el objeto principal de la propuesta que se hace en el presente artículo.

3. INFLUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES

La cantidad de registros iguales y superiores a 100 mm en 24 horas es numéricamente muy elevado, en Cuba se registraron 32199 eventos de este tipo en los años comprendidos entre 1961-1990; sin embargo, las estadísticas de estos 30 años demuestran que este fenómeno representa solo el 1% del total de días con lluvias de un año, lo cual hace más relevante su influencia en los valores promedios de precipitación. Localmente, las grandes precipitaciones llegan a tener un peso notable en la precipitación anual (figura 1), existiendo zonas de Cuba donde la influencia es superior al 15% del valor promedio de 30 años, y años particulares donde la influencia es inmensa, como fueron los años 1979 y 1982 en la provincia de Pinar del Río al occidente de Cuba, debido al influjo de los ciclones Frederick y Alberto (tabla 1).

Tabla1. % que representaron las grandes precipitaciones (≥ 100 mm) en la lámina de anual de la provincia de Pinar del Río. Occidente de Cuba. Período 1961-1990

Año	%	Año	%
1961	15	1979	21
1962	4	1975	4
1963	3	1976	6
1964	8	1977	5
1965	4	1980	9
1966	7	1981	5
1967	13	1982	28
1968	7	1983	7
1969	14	1984	3
1970	14	1985	3
1971	13	1986	3
1972	12	1987	5
1973	3	1988	9
1974	3	1989	5
1978	6	1990	3

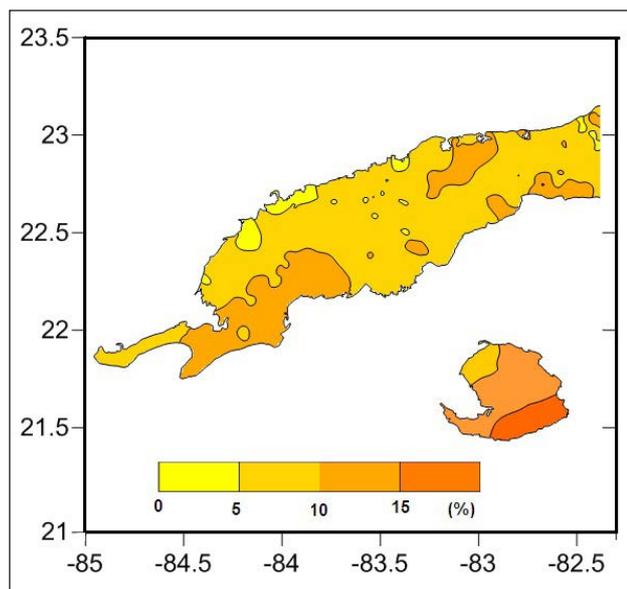


Figura 1. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor promedio anual del período 1961 – 1990, expresada en %. Provincia Pinar del Río, Occidente de Cuba.

La influencia de estas precipitaciones en los acumulados anuales es significativa, no así en la tendencia de la marcha anual de esta variable. La figura 2 y tabla 2 demuestran que estas precipitaciones representan aproximadamente el 8% del valor medio y de la mediana del período 1961 – 1990, mientras que la tendencia de la serie no cambia al sustraerle al valor anual los acumulados producidos por las grandes precipitaciones. Lo anterior sugiere la prevalencia de patrones de fondo en la circulación atmosférica que favorecen la ocurrencia de las precipitaciones, no asociados a las situaciones meteorológicas que provocan las lluvias extremas que se observan en 24 horas (Aveledo, 2010).

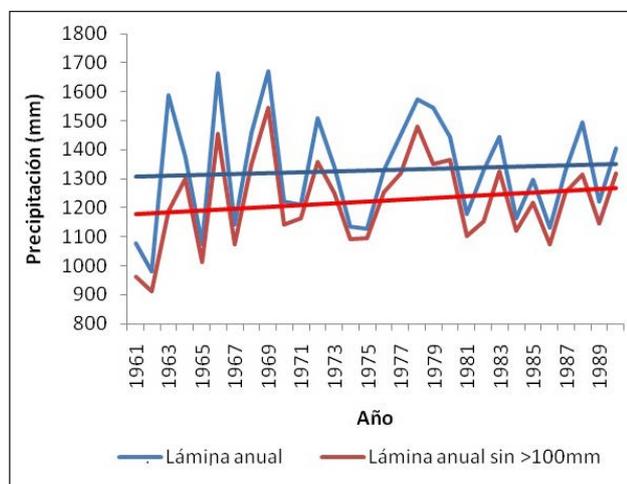


Figura 2. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor promedio de la precipitación anual. Período 1961-1990

Tabla 2. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor medio y mediana de la precipitación anual. Período 1961-1990

Estadísticos	Anual	Anual sin >=100 mm	Dif (mm)	%
Promedio anual (mm)	1330	1223	-107	8
Desviación estándar	184	150		
CV	0,14	0,12		
Mediana (mm)	1330	1234	-96	7

Lo hasta aquí descrito tiene apreciable repercusión en la calificación del nivel de pluviosidad de un año y, como consecuencia, en las acciones ingenieriles aplicadas al manejo y la utilización del agua. Los datos antes presentados, considerados conjuntamente con la frecuencia anual de estos fenómenos extremos, se puede afirmar que en el valor promedio anual e hiperanual de precipitaciones se enmascara un volumen de lluvia muy variable anualmente, en ocasiones de rara ocurrencia, que distorsiona las predicciones probabilísticas que se realizan con fines diversos, así como la interpretación de la pluviosidad de un año.

4. FRECUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES

La frecuencia en Cuba de las precipitaciones iguales o mayores de 100mm es baja. La figura 3 muestra el número de casos promedio anual en la provincia de Pinar del Río, basado en la serie 1961-1990. Para analizar esta figura téngase en cuenta que el número promedio de días con lluvia en este territorio es 120.

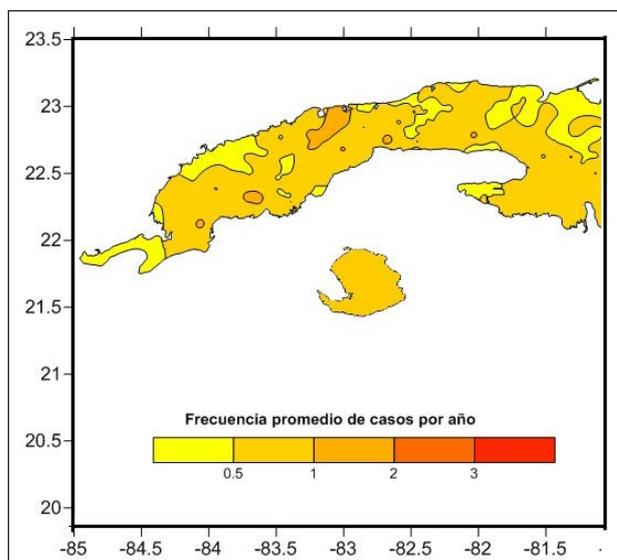


Figura 3. Número promedio de casos de eventos pluviales iguales o superiores a 100 mm en 24 horas. Provincia de Pinar del Río. Serie 1961-1990

El hecho de que los grandes eventos pluviales tienen una frecuencia diferente al resto de los fenómenos que producen lluvias, permite introducir el concepto de mezcla de poblaciones en el análisis de los valores promedio, para conocer la influencia de las grandes precipitaciones en el promedio anual, así como razonar y obtener conclusiones sobre problemas prácticos relacionados con el manejo del agua. Utilizando el concepto de mezcla de poblaciones desarrollado para el análisis de los extremos hidrológicos máximos absolutos, puede definirse que existe una lámina de lluvia anual promedio garantizada anualmente, que puede expresarse de la manera siguiente $P_g = P_a * p + P_{GP} * q$ (1); donde P_g es la precipitación promedio anual garantizada; P_a la precipitación promedio anual excluyendo los registros $\Rightarrow > 100$ mm; P_{GP} es la lámina promedio de las grandes precipitaciones (registros $\Rightarrow > 100$ mm); p es la frecuencia de las precipitaciones inferiores a 100 mm y q la frecuencia de las precipitaciones $\Rightarrow > 100$ mm (Campos Aranda, 1987). La tabla 3 expone la comparación de los resultados del análisis probabilístico de la serie anual de precipitaciones en la provincia de Pinar del Río con poblaciones simples y mezcladas; apreciándose claramente la diferencia entre ambos resultados.

Tabla 3. Resultado de ajuste de función de probabilidad para poblaciones simples y mezcladas a los valores anuales de precipitación en la provincia de Pinar del Río en el occidente de Cuba

T	P_a	P_{GP}	Ajuste con poblaciones mezcladas	Ajuste con población simple
1000	2444	887	2330	3132
100	1994	489	1884	2410
50	1866	397	1758	2213
10	1575	220	1476	1783
5	1449	157	1354	1604
4	1406	138	1313	1546
2	1264	82	1177	1355

T: período de retorno,

P_a : serie de láminas anuales inferiores a 100 mm y

P_{GP} : serie de láminas anuales superiores a 100 mm

4.1 Lámina de precipitación anual garantizada

La lámina de precipitación promedio anual del período 1961-1990 en la provincia de Pinar del Río, calculada por promedio aritmético para los propósitos de este ejercicio, es 1330mm. Utilizando la ecuación (1), se descompone la lámina promedio anual en la producida por los eventos inferiores a 100mm, $P_a=1184$ mm, y producida por la grandes precipitaciones, $P_{GP}=146$ mm; la frecuencia de las láminas inferiores a 100 mm es $p=0,99$ y de las iguales o superiores $q=0,1$; de manera que la lámina

de precipitación promedio garantizada cada año sería 1171mm. El mismo ejercicio fue realizado para una selección de pluviómetros de esta provincia. El mapa de la figura 4 muestra la lámina de precipitación promedio anual no garantizada anualmente (1961-1990).

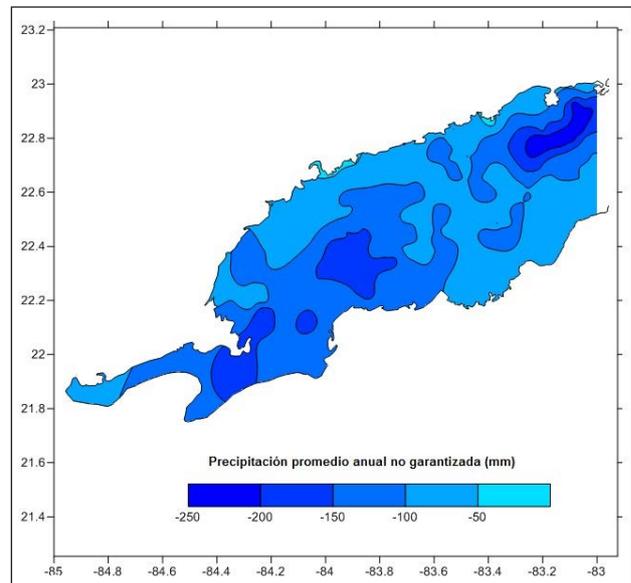


Figura 4. Distribución de la lámina no garantizada anualmente P_{GP} . Provincia de Pinar del Río. Período 1961 – 1990.

4.2 Influencia en el escurrimiento

Para tener una aproximación de cómo las grandes precipitaciones pueden repercutir en la disponibilidad promedio de agua de un territorio, se utiliza el módulo de escurrimiento obtenido para las regiones hidrológicas de Cuba a partir de la relación precipitación caudal (Batista, 1990). Al respecto, el mencionado autor indica que “es conocido que las relaciones lluvia – escurrimiento generalmente son complicadas y están determinadas en lo fundamental por la cantidad, la intensidad, y la distribución de la lluvia en las cuencas; así como por otra serie de factores como las condiciones de humedad antecedente, la alimentación subterránea y las extracciones de agua que contribuyen a indefiniciones no explicables”. No obstante, en la literatura y la práctica hidrológicas está comprobada la utilidad y precisión de la relación precipitación-escurrimiento; de manera que basado en observaciones de la red de estaciones de caudal que existe en el país se construyeron ecuaciones que permiten calcular el módulo de escurrimiento en función de la relación comentada. Para la Región occidental la relación lluvia escurrimiento quedó definida como $M_o = 1.15 * P^{4.74} * 10^{-14}$ (2), donde M_o es el módulo de escurrimiento y P la precipitación anual. Por supuesto que el resultado sería más exacto si el análisis se hiciera directamente desagregando series de caudales en lugar de utilizar métodos indirectos como se presenta en este artículo a modo de aproximación al tema.

Considerando la lámina de lluvia promedio del período 1961-1990 estimada para este trabajo para la provincia de Pinar del Río en 1330mm, y utilizando la ecuación (2), que expresa la relación lluvia - escurrimiento en esa provincia, el módulo de escurrimiento promedio anual es 7,37l/s*km², lo que equivale aproximadamente a 2063,0 millones de m³ de agua promedio anual; estimando ahora el módulo de escurrimiento para la lámina garantizada como promedio cada año (1171 mm); el módulo de escurrimiento promedio anual es 4,0 l/s*km², equivalentes a 1133,0 millones de m³ de agua; lo que significaría que cada año como promedio existen 930 millones de m³ de agua no garantizados anualmente. Estas cifras no son exactas, pero dan una idea de cómo las grandes precipitaciones influyen en el valor promedio y pueden repercutir en todos los cálculos que a partir de él se hagan, fundamentalmente en el

dimensionamiento de las obras hidráulicas y en el manejo de agua represada.

Solamente para ilustrar como lo anteriormente descrito pudiera influir en la garantía de la entrega de agua de un embalse comprometido para la agricultura, a continuación se presenta un análisis del volumen de escurrimiento anual garantizado para un 75% en una cuenca seleccionada en la Provincia de Pinar del Río. La tabla 4 contiene la distribución por año de la precipitación y del volumen de escurrimiento en la cuenca, presentado en dos series cronológicas, la anual observada y la anual garantizada según se ha definido en este artículo. La figura 4 representa las veces de fallo del escurrimiento del 75% de probabilidad. Una simple inspección de los gráficos de la figura 4 demuestra la diferencia entre la cantidad de veces que la entrega anual falla con el análisis tradicional. Son obvias las implicaciones en la garantía de la entrega.

Tabla 4. Distribución anual de la precipitación y el volumen de escurrimiento (total y garantizado) en embalse hipotético ubicado en Pinar del Río (Período 1965-1990)

Año	P total (mm)	Mo (m ³ /s/km ²)	Wtotal (m ³ .10 ⁶)	P garantizada (mm)	Mo (m ³ /s/km ²)	Wgarantizado (m ³ .10 ⁶)
1965	1106	0,01	71,6	1032	0,01	62,1
1966	1514	0,02	155,3	1336	0,01	110,7
1967	1419	0,02	129,7	1116	0,01	72,8
1968	1451	0,02	137,9	1283	0,01	100,1
1969	1907	0,04	327,6	1470	0,02	142,9
1970	1305	0,01	104,4	987	0,01	57,1
1971	1205	0,01	86,3	945	0,01	52,7
1972	1660	0,03	205,0	1310	0,01	105,4
1973	1297	0,01	102,7	1231	0,01	90,7
1974	1066	0,01	66,3	1003	0,01	58,9
1975	1310	0,01	105,3	1220	0,01	88,8
1976	1564	0,02	170,6	1388	0,02	122,3
1977	1521	0,02	157,2	1381	0,02	120,6
1978	1695	0,03	219,2	1533	0,02	160,9
1979	1849	0,04	293,2	1218	0,01	88,5
1980	1535	0,02	161,5	1288	0,01	101,0
1981	1159	0,01	79,1	1055	0,01	65,0
1982	1863	0,04	301,5	1036	0,01	62,6
1983	1773	0,03	254,1	1570	0,02	172,8
1984	1160	0,01	79,3	1102	0,01	70,9
1985	1194	0,01	84,6	1122	0,01	73,7
1986	1178	0,01	82,0	1118	0,01	73,1
1987	1258	0,01	95,4	1145	0,01	77,0
1988	1445	0,02	136,3	1227	0,01	90,0
1989	1257	0,01	95,2	1150	0,01	77,8
1990	1085	0,01	68,7	1020	0,01	60,8
Promedio	1415	0,02	145,0	1203	0,01	86,0

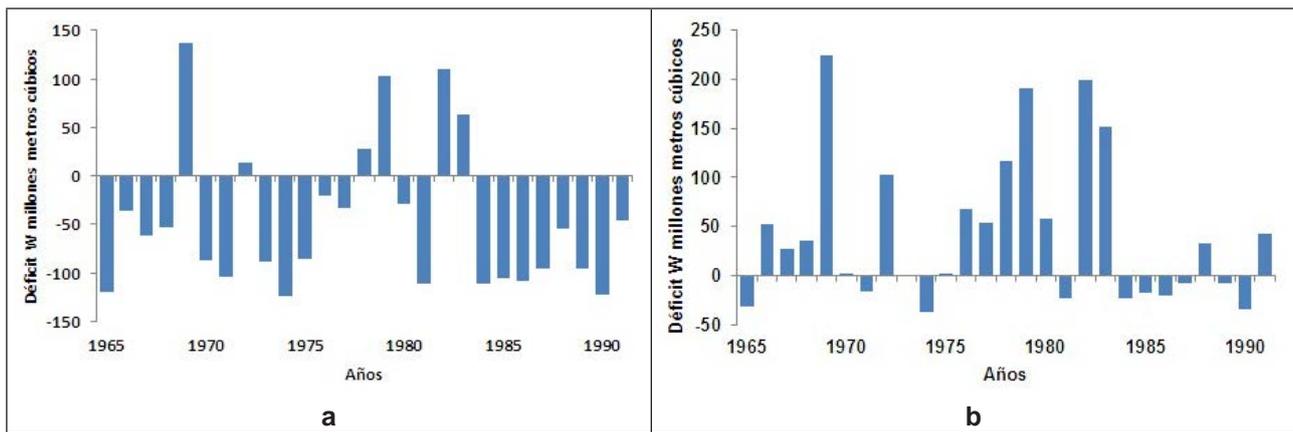


Figura 4. (a) Años y magnitud de fallo del volumen de escurrimiento con garantía del 75% de probabilidad estimado con serie de valores sin análisis mezclado; (b) Años y magnitud de fallo del volumen de escurrimiento con garantía del 75% de probabilidad estimado con serie de valores con análisis mezclado

5. CONCLUSIONES

El análisis de los extremos hidrológicos tiene aún muchas aristas que abordar; sobre todo en lo relacionado con su influencia en los valores promedio y la manera como estos pueden interpretarse según sea el objetivo de un estudio. Los valores promedio de precipitación y escurrimiento, en particular su modelado probabilístico, suelen utilizarse como punto de partida para el dimensionamiento de un embalse y también para decidir la entrega de agua con una garantía dada. Muchas veces la entrega de agua falla, y se atribuye a la variabilidad climática; sin embargo, como demuestra este artículo, la no satisfacción de la garantía de entrega pudiera deberse a una valoración inadecuada del papel de los extremos hidrológicos, en este caso los máximos, en el régimen de una cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, A., B. Lapinel y L. Naranjo. 1997. Tormentas locales severas, grandes precipitaciones y sequías. Variaciones y cambios del clima en Cuba. Capítulo 4, Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, pag. 35-44.
- Arencibia, G, 2009. Sistema de reconocimiento de patrones de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas, pag. 100
- Aveledo, 2010. Caracterización de las situaciones climáticas y sinópticas que favorecen la permanencia en la región occidental de Cuba de períodos estacionales consecutivos con abundantes acumulados de precipitaciones entre 1961 y 2000. Trabajo de diploma Licenciatura en Meteorología. Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas. La Habana. Cuba, pag. 100.
- Batista, J. L. 1990. Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. Instituto de Hidroeconomía. La Habana. Cuba, pag. 64.
- Campos Aranda, D.F. 1987. Análisis probabilístico de avenidas máximas con poblaciones mezcladas. Ingeniería Hidráulica en México, septiembre-diciembre 1987.
- Cunnane, C.: 1989. Statistical distributions for flood frequency analysis, WMO 718, Operational Hydrology Report No 33.
- FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 5 - Heavy rains. UNESCO. Cemagref Editions, p. 277-283.
- Koshiasvili, B. 1972. Las lluvias torrenciales en Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba.
- Lapinel, B. 1988. La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las precipitaciones en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba.
- Lang, M. 1997. New development with AGREGEE, a statistical model using hydrometeorological information. FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 4 - Flood. UNESCO. Cemagref Editions, p. 181-191.
- Llasat, M.C. 1997. Heavy rains. FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 5 - Heavy rains. UNESCO. Cemagref Editions.
- Madsen H. y Rosbjerg D. 1997. Recent advances in modelling of extreme hydrologic events. Hydroinformatics 98, Balkema, Vol. 2, 1129 - 1136.
- Martínez, S., 1958. Intensidad de la lluvia en La Habana Martínez, S., 1958. Archivos del Instituto de Hidroeconomía. Cuba.

14. Matakiev D. 1973. El escurrimiento medio y formas de las avenidas. Grupo Hidráulico Nacional.
15. Millás, J.C., 1943. La lluvia en la Habana, Observatorio Nacional de Cuba, pag. 43
16. Planos Gutiérrez E. 1991 Características Hidrológicas de las Lluvias Torrenciales
17. Planos, E., 2000: Análisis Hidrológico de las grandes precipitaciones: Distritos físico-geográficos Pinar del Río, Habana-Matanzas y Centro, Tesis en opción el grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas, Ministerio de Educación Superior, La Habana.
18. Planos, E. M. Limia y R. Vega, 2005. Intensidad de las precipitaciones en Cuba Remenieras, G. 1968. Hidrología del ingeniero. Instituto Cubano del Libro, La Habana, Cuba.
19. Planos, E; M. Limia; R. Vega, M. Hernández, D. Boudet (2012). Las grandes precipitaciones en Cuba: causas y características. Instituto de Meteorología. Programa Científico Técnico Ramal "Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial. Agencia de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. La Habana. Cuba, pag. 242.
20. Sevruk B y H. Geiger, 1981. Selection of ditribution types for extremes of precipitation. WMO No. 560. World Meteorological organization. Geneva.
21. Trusov I.I, 1967. Mapas isoyéticos de la lámina de lluvia media máxima y del 1, 5 y 10% de probabilidades. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

PROYECTO MÁXIMOS HIDROLÓGICOS EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE.

MAXIMUM HYDROLOGICAL PROJECT IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN.

Eduardo O. Planos Gutiérrez¹; Alfonso Gutiérrez López²

Resumen

Este artículo es una relatoría de las actividades y resultados alcanzados por el proyecto Máximos Hidrológicos en Latinoamérica y el Caribe, que se desarrolla bajo la coordinación de los programas FRIEND³ e IFI⁴, con la participación de varios países de la región. El artículo demuestra la conveniencia del trabajo sinérgico entre las iniciativas regionales del PHI y los avances logrados en el estudio de la intensidad de las precipitaciones y los métodos de análisis que existen; el análisis probabilístico y la construcción de las curvas de Intensidad Duración Frecuencia. Este es un proyecto que se encuentra en ejecución, razón por la cual algunas de sus metas aún están en desarrollo.

Palabras claves: máximos hidrológicos, intensidad precipitaciones, probabilidades, curvas IDF, curvas envolventes, desastres, sinergia.

Abstract

This article is a rapporteur of the activities and results achieved by the Hydrological Maximum project in Latin America and the Caribbean, developed under the coordination of the FRIEND and IFI programs, with the participation of several countries in the region. The article demonstrates the suitability of the synergic work between regional IHP initiatives and progress in the study of the intensity of rainfall; probabilistic analysis and construction of the Intensity Duration Frequency. This project is running on, thus some goal already are in developed.

Keywords: Hidrological highs, Rainfall intensity, odds, IDF curves, envelope curves, disasters, synergy.

1. INTRODUCCIÓN

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO en Latinoamérica y el Caribe promueve la sinergia entre todas las actividades que desarrollan los proyectos y grupos de trabajo, centros y cátedras que funcionan en la Región. En este espíritu, el Proyecto FRIEND-AMIGO e IFI, trabajan conjuntamente, con la colaboración del Centro Internacional de Hidroinformática (CiH), en un proyecto regional que realiza el estudio de los máximos hidrológicos; con el objetivo de comparar metodologías de análisis de precipitaciones intensas, determinar curvas envolventes regionales de intensidad duración frecuencia, compartir datos e informaciones, fortalecer la capacitación de los profesionales de los países latinoamericanos y caribeños, y mejorar la formación de recursos humanos en las instituciones participantes en esta iniciativa. Este trabajo se inscribe dentro del Plan Estratégico para la Séptima Fase del PHI (PHI-VII, 2008-2013), para contribuir a la gestión adecuada de los peligros relacionados con el agua, como un factor esencial para el desarrollo humano y socioeconómico sostenible, y, en particular, para la atenuación de la pobreza. Por tanto, el estudio

de los fenómenos hidrológicos extremos en zonas sensibles, es sin duda uno de los temas prioritarios en el marco de la gestión de riesgos.

El objetivo general del proyecto es *“mostrar el comportamiento regional de los fenómenos hidrológicos extremos, a través de series de tiempo de valores máximos de precipitaciones y caudales; que sean representativos del comportamiento de estos fenómenos en la región LAC”*, para lo cual se propone:

- Identificar el origen de las precipitaciones máximas, describiendo sus principales características.
- Construir curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), con base en los registros de precipitaciones máximas de estaciones climatológicas seleccionadas y validadas en cada país participante en el proyecto.
- Actualizar la curva universal de lluvias máximas, incluyendo los eventos máximos de precipitación de la región.

¹ Coordinador FRIEND LAC

² Coordinador FRIEND LAC

³ Regímenes de Flujo Determinados a partir de Series de Datos Internacionales Experimentales y de Redes

⁴ Iniciativa Internacional sobre Inundaciones

- Conformar una base de datos regional de precipitaciones máximas (P-MAX-LAC-Data), con el objeto de fomentar la recolección, el acervo y la utilización regional de información de precipitación máxima en la Región.
- Desarrollar y mejorar herramientas computacionales para el análisis y tratamiento de series de tiempo de precipitación.
- Contribuir a la formación de profesionistas y desarrollar capacidades institucionales.

Adicionalmente, este proyecto prepara un grupo de fichas de registro de fenómenos máximos, confeccionadas por los expertos de IFI, que tienen el propósito de documentar detalladamente estos eventos. Estas fichas son una de las vías para obtener la información necesaria para construir las curvas regionales de precipitaciones y caudales máximos.

En este empeño se han realizado tres talleres en: Lima, Perú del 17 al 20 de mayo del 2010; Ciudad Guatemala, Guatemala, del 8 al 10 de junio del 2011 y en Ciudad Panamá, Panamá, del 28 al 30 de abril del 2014. En estas reuniones se realizaron discusiones técnicas sobre las metodologías de trabajo y los resultados logrados, y se establecieron compromisos para la continuidad del proyecto.

2. LAS INICIATIVAS REGIONALES RESPONSABLES DEL PROYECTO

Proyecto Regímenes de Flujo Determinados a partir de Series de Datos Internacionales Experimentales y de Redes (FRIEND)

Tiene como objetivo principal promover la integración y el fortalecimiento de los mecanismos de cooperación e investigación científica existente en la Región, trabajando en la comprensión y el análisis de datos hidrológicos, para el correcto manejo de los recursos hídricos. Es un proyecto transversal en la agenda científica del Programa Hidrológico Internacional, surgido en el año 1985, que tiene como objetivos de trabajo los siguientes:

- Mejorar la comprensión de la variabilidad espacial y temporal de régimen hidrológico a escala regional
- Compartir datos provenientes de redes de observación seleccionadas y de cuencas experimentales
- Compartir y mejorar las herramientas para el análisis hidrológico
- Detectar tendencias debidas a la variabilidad y el cambio climáticos
- Detectar el impacto humano sobre el régimen hidrológico

Este proyecto se estableció en la Región en 1999, bajo la coordinación del Dr. Eduardo Planos Gutiérrez, de Cuba.

Iniciativa Internacional sobre Inundaciones (IFI)

En numerosas conferencias internacionales se ha reiterado la importancia de elaborar medidas para la gestión de los riesgos relacionados con los desastres provocados por el agua, en especial los ocasionados por fenómenos extremos. Por ejemplo, en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS) celebrada en Johannesburgo, Sudáfrica, en 2002, se aprobaron planes de ejecución en que se destaca la necesidad de atenuar los efectos de las sequías y las inundaciones. En el Tercer Foro Mundial del Agua (WWF3), que tuvo lugar en 2003 en Kyoto, Shiga y Osaka (Japón), se celebraron debates sobre la manera en que deben establecerse las medidas para la gestión de riesgos a fin de prever los desastres relacionados con el agua. Se presentó también una declaración ministerial sobre la necesidad de una acción global para prevenir esas catástrofes.

En concordancia con lo anterior, el Plan Estratégico para la Sexta Fase del PHI (PHI-VI, 2002-2007), en el Subtema 2.1 define que “*Los fenómenos extremos y la gestión de los recursos terrestres e hídricos*” trata de la elaboración de un marco para reducir la vulnerabilidad ecológica y socioeconómica a los extremos hidrológicos (inundaciones, sequías, corrientes de fango, acumulación de hielo). Y, por otra parte, en el Plan Estratégico para la séptima fase del PHI (PHI-VII, 2008-2013), el Subtema 1.2 considera los “*Extremos hidrológicos en zonas sensibles y estresadas tanto hidroclimáticas como de biomasa*” abarcará las medidas para la gestión de los riesgos contra los acontecimientos hidrológicos extremos.

En la 15ª reunión del Consejo Intergubernamental del PHI (2002) se recomendó emprender una iniciativa internacional conjunta UNESCO-Organización Meteorológica Mundial (OMM) contra las inundaciones, con objeto de fortalecer la capacidad del sistema de las Naciones Unidas de contribuir a atenuar los daños causados por las inundaciones. La primera reunión preparatoria sobre la IFI fue se celebró en la ciudad de Tsukuba, Japón del 12 al 14 de julio de 2004; allí se produjo un documento conceptual que se sometió ulteriormente al Consejo Intergubernamental.

En la VII Reunión de Comités Nacionales y Puntos Focales del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO-PHI para América Latina y el Caribe, celebrada en la ciudad de Guatemala los días 12 y 13 de agosto de 2007, se aprobó el inicio de este proyecto, que quedó bajo la coordinación del Centro de Investigaciones del Agua de la Universidad Autónoma de Querétaro (CIAQ), en la persona del Dr. M. Alfonso Gutiérrez López.

El objetivo general de esta iniciativa es construir las capacidades necesarias para entender y responder de una manera eficiente ante las inundaciones, estimar la vulnerabilidad y potenciar los beneficios de la gestión de riesgos, en el ámbito de Latinoamérica y El Caribe. Sus objetivos específicos de trabajo son:

- Promover la investigación científica en materia de inundaciones fluviales, costeras, rurales y urbanas.
- Promover el desarrollo de herramientas computacionales para la modelación de cuencas y ríos.
- Realizar actividades eficaces de capacitación en círculos institucionales y profesionales para poner en marcha las acciones oportunas de sensibilización dirigidas, entre otros destinatarios, a la opinión pública.
- Crear y afianzar redes de intercambio de información de carácter científico, técnico y normativo entre instituciones y particulares.
- Organizar actividades de transmisión de conocimientos e información, en particular simposios y talleres internacionales.
- Elaborar publicaciones y material técnico relacionado con los objetivos y actividades de esta Iniciativa.
- Promover la comprensión de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo por inundación.

3. BREVE CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

La extensa Región de Latinoamérica y el Caribe se caracteriza por una variada naturaleza, que la hace poseedora de una invaluable riqueza ecosistémica, cultural, social, económica y política. La diversidad y riqueza de los ecosistemas costeros es relevante, y en estos existen extensas áreas de bosques de mangle que son claves para el desarrollo y reproducción de especies marinas y terrestres, anfibios, aves y arrecifes de coral; así como para la protección de los acuíferos costeros. La riqueza hídrica de la región es significativa. Por otra parte, el grado de insularidad es muy alto, y en las islas el régimen hídrico es más vulnerable por su dependencia, casi exclusiva, de la precipitación anual y por su relación dinámica de mucho de sus acuíferos con con el nivel del mar.

Esta es la segunda Región más húmeda del mundo, posee el 26% del agua dulce del globo terráqueo, y es la de mayor cantidad de agua per cápita, con aproximadamente el 6% de la población mundial (Fernández, 2000); aunque la distribución de esa riqueza hídrica es desigual, porque desde el punto de vista climático en la región se manifiestan todos los tipos de clima que existen en el planeta y, como consecuencia, ella sufre el azote de diversos procesos climáticos, guiados por factores de teleconexión como el ENSO y AENOS, procesos de sequías e intensos eventos meteorológicos como los huracanes; los cuales dejan su huella en el régimen hidrológico regional. Los humedales y lagos son una sus mayores riquezas hídricas y desempeñan un papel importante en el equilibrio hidrológico y en el funcionamiento de los ecosistemas de la región; por su parte el agua subterránea es un elemento

primordial en la región, tanto como sostén del equilibrio hidrológico y fuente de abasto de agua; muchos de los acuíferos son abiertos al mar.

Los extremos hidrológicos: sequías, grandes precipitaciones y las inundaciones, son responsables de numerosos desastres en los países que integran a este vasto territorio. Pero particularmente los grandes eventos pluviales también desempeñan un papel substancial en el balance hídrico, de manera tal, que en países como los caribeños, el aporte de agua de estos fenómenos meteorológicos representa aproximadamente el 20% del promedio anual de lluvia de un período de tiempo determinado (Planos, 2013). No obstante lo anterior, los desastres de origen hídrico son muy costosos y dejan una huella imborrable en los afectos de las personas perjudicadas. En este sentido, en el *Annual Disaster Review* del 2012 (Guha-Sapir et al, 2013) se informa que, en ese año, de los 79 desastres ocurridos en las Américas, el 32,9% fueron de tipo hidrológico y 44.3% meteorológico y las pérdidas ocasionadas fueron valoradas en 79.7 billones de dólares estadounidenses.

Los desastres de origen hídrico predominan en el entorno geográfico de esta Región, especialmente las inundaciones. Y estas situaciones hidrometeorológicas extremas suelen interactuar con otros riesgos relacionados con el agua, entre ellos, la contaminación y los vertidos químicos, el hundimiento de tierras, la salinización de tierras de cultivo, las inundaciones costeras y las enfermedades producidas por el agua (WWAP, 2012).

4. RESULTADOS DE LOS TALLERES

4.1 Taller de Inicio. Lima, Perú del 17 al 20 de mayo del 2010

En este taller participaron 31 expertos de seis países: Bolivia, Costa Rica, Cuba, Guatemala, México y Perú. En la sesión inaugural se dictaron tres conferencias magistrales relacionadas con los objetivos del proyecto:

- SENAMHI y los Eventos Extremos Hidrológicos en el Perú, a cargo del Sr. Julio Ordoñez Gálvez, Director General de Hidrología y recursos Hídricos del SENAMHI.
- Los Desastres, las Grandes e Intensas Precipitaciones y el Cambio Climático, a cargo del Sr. Eduardo Planos Gutiérrez. Coordinador Regional del Proyecto FRIEND AMIGO.
- Análisis de Tormentas Simultáneas en la Ciudad de Querétaro, a cargo de la Srta. Fabiola Arellano Lara, Universidad Autónoma de Querétaro y Experta del Proyecto IFI.

En este encuentro se impartió un seminario a cargo de la Srta. Fabiola Arellano Lara, de la Universidad Autónoma de Querétaro y experta del proyecto IFI. El curso consistió en la explicación teórica y la

ejercitación práctica de las técnicas de recolección y validación de datos e informaciones, para la elaboración de las fichas PMax-LAC-Data, las curvas IDF de máximos diarios seleccionados y las curvas envolventes de precipitaciones máximas de 24 horas.

Por otra parte se aprobó un cronograma de trabajo y se instó a los coordinadores de las iniciativas IFI y FRIEND a incrementar el número de países participantes.

4.2 Segundo Taller. Ciudad Guatemala, Guatemala del 8 al 10 de junio del 2011

Esta ocasión reunió a 27 expertos de siete países: Bolivia, Costa Rica, Cuba, España, Guatemala, México y Perú. El taller inició con tres conferencias magistrales:

- Peligro por Grandes Precipitaciones y Cambio Climático, a cargo del Sr. Eduardo Planos Gutiérrez, Coordinador Regional del Proyecto FRIEND/AMIGO para América Latina y el Caribe.
- Simulación Espacial de Eventos Extremos, a cargo del Sr. Alfonso Gutiérrez López, Coordinador Regional del Proyecto IFI.
- Curvas IDF y Fichas de Inundación en la Cuenca del Río Motagua, a cargo del Sr. Víctor M. Pérez, INSIVUMEH.

El objetivo de esta reunión fue la presentación de los resultados alcanzados en cumplimiento de los acuerdos del Primer Taller de Máximos Hidrológicos, efectuado en Lima. Como conclusión del debate realizado se definió que este es un estudio de tipo metodológico, que tiene como objetivo mostrar el comportamiento regional de los fenómenos hidrológicos extremos, a través de series de tiempo de valores máximos de precipitaciones; que sean representativos del comportamiento de estos fenómenos en la región LAC, utilizando para ello la función de distribución Gumbel y series de duración parcial para el estudio de los máximos valores de precipitación observados en 24 horas.

Por otra parte, el taller revisó el estado de los acuerdos tomados en Lima. Los principales acuerdos de esta reunión fueron:

- En los estudio de casos de los países (estaciones); los períodos de años seleccionados para construir las series de valores de precipitación, se mantendrán tal y como fueron trabajados en cada estación. Como parte del análisis regional que realizará IFI, los expertos de este programa del PHI, seleccionará un período común para todas las estaciones utilizadas en el desarrollo del trabajo.
- IFI realizará un análisis de los tipos de registros utilizados en cada estudio de caso (estación),

con el fin de determinar si los resultados obtenidos se basan en valores máximos absolutos de 24 horas o fueron sacados de la cartas pluviográficas (bandas); y sobre la base de este estudio hará las recomendaciones pertinentes.

- El estudio de los excedentes se basará en el criterio de Series de Duración Parcial, construidas con una longitud (número de términos), igual a la longitud del período de años seleccionado en cada estación y compuestas por los valores máximos del total de los registros diarios observados en todos los años, escogidos por su orden de magnitud descendente, sin importar que varios registros pertenezcan a un mismo año. Para el estudio de los excedentes cada país analizará como mínimo dos casos.
- La construcción de las curvas IDF se realizará en al menos 4 estaciones, seleccionadas de manera que quede debidamente reflejada la complejidad de este procedimiento según las características de los datos. Este trabajo se realizará con la Fórmula de Bernard, tanto para series compuestas por registros máximos de 24 h o procedentes de las cartas pluviográficas (bandas). Cada país elaborará un estudio comparativo especial en una estación, aplicando la Fórmula de Bernard al registro de 24h obtenido del pluviógrafo y así como a los registros obtenidos en la carta pluviográfica (bandas) correspondiente al valor de 24 h antes mencionado.
- El Programa IFI revisará las fichas FRIEND - IFI de máximos, con el objetivo de determinar los aportes realizados por los países a éstas, los vacíos por cubrir y hacer un análisis comparado de las fichas con el fin de lograr una información regional lo más completa y coherente posible. Este análisis se hará en consulta con los países participantes en el proyecto.
- IFI coordinará con el Centro Regional de Hidroinformática la puesta en uso de las herramientas computacionales de análisis de eventos extremos mostrados en la reunión.

4.3 Tercer Taller. Ciudad Panamá, Panamá, del 28 al 30 de abril del 2014

En esta oportunidad estuvieron presentes 23 expertos de trece países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Guatemala, México, Nicaragua, Panamá, Perú y República Dominicana. Esta vez las conferencias magistrales fueron:

- Análisis de precipitación del evento extremo La Purísima 2010, por Gerardo Leis del CoNaPhi Panamá.

- Influencia de la variabilidad climática y el cambio climático en el análisis probabilístico de máximos de precipitación por Eduardo Planos, FRIEND-LAC
- Nuevos enfoques en la puesta en marcha de un sistema de alerta a tiempo real por Alfonso Gutiérrez López, IFI-LAC.

Durante el taller los países presentaron sus resultados y contribuciones al proyecto y los principales acuerdos fueron:

- Solicitar a la Secretaría del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, que le pida a los CoNaPhis de los países participantes en el Proyecto FRIEND – IFI de Máximos Hidrológicos, la designación o ratificación de los representantes IFI en el proyecto.
- Solicitar a la Secretaría del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, que invite a los CoNaPhis de países que aún no están involucrados en el Proyecto FRIEND – IFI de Máximos Hidrológicos, que designen a un representante IFI.
- Proponer la preparación de un número especial de AQUALAC sobre las excedencias anuales y la forma de analizarlas, basado en los resultados de este proyecto.
- Presentar los resultados del proyecto en la *International Conference on Flood Management*, que tendrá lugar en la ciudad de Sao Paulo en el mes de Septiembre de este año.
- Presentar los resultados del proyecto en la sesión plenaria “*IFI Flagship Project*” en donde también participarán la UNESCO, la WMO, la UNU, la UNISDR y el centro ICHARM que es la sede internacional de la iniciativa IFI.
- Presentar los resultados del proyecto en la 7 Conferencia Internacional FRIEND, que tendrá lugar en Montpellier, Francia..
- Proponer el desarrollo de un seminario de capacitación sobre excedencias anuales y formas de analizarlas, y series no estacionarias e hidrología estocástica, en el marco de la próxima reunión de Presidentes de CoNaPhis.
- El Centro Internacional de Hidroinformática (CiH) y el IFI enviarán un resumen de los acuerdos adoptados entre ambas entidades relacionados con el desarrollo del Sistema Integrado de bases de datos del PHI LAC; lo que incluye el desarrollo de un servicio WEB para la preparación de las Fichas IFI de Máximos.
- Se tomó nota del interés del CEHICA para la realización de un curso de regionalización hidrológica en república Dominicana, a cargo de IFI.

5. FUNDAMENTO CIENTÍFICO DEL PROYECTO

5.1 Consideraciones sobre la intensidad de la precipitación y las curvas de intensidad-duración- frecuencia

Según la OMM (2006) “*en el ámbito de la hidrología, numerosos fenómenos extremos no pueden pronosticarse en base a una información determinística, con la suficiente destreza y tiempo de antelación, para poder tomar las decisiones pertinentes a su ocurrencia. En dichos casos, se requiere un enfoque probabilístico con el fin de incorporar los efectos de esos fenómenos en las decisiones. Si se puede suponer que las ocurrencias son temporalmente independientes, esto es, el tiempo y la magnitud de un evento no tiene relación con los eventos anteriores, entonces se puede usar el análisis de frecuencias para describir la probabilidad de cualquier evento o de una combinación de ellos, durante el intervalo de tiempo necesario para una decisión*”. Lo anterior es el fundamento conceptual del análisis de la intensidad y la frecuencia de los extremos hidrológicos.

Son innumerables los trabajos realizados y publicados sobre la intensidad de las precipitaciones, la construcción de las curvas IDF y sus aplicaciones. Todos los autores reconocidos, en esencia, comparten puntos de vistas similares sobre este tema; por esta razón, las consideraciones que a continuación siguen, solo tienen el propósito de reflejar algunos de los procedimientos más recomendados, como base para el desarrollo metodológico de este proyecto. Este acápite no es un estado del arte sobre esta importante temática.

5.2 Intensidad de las precipitaciones

La intensidad de la precipitación se refiere a la lámina de lluvia caída en un intervalo de tiempo determinado, expresada en mm.min⁻¹ o mm.h⁻¹. Los intervalos de tiempo más usuales en el quehacer ingeniero son: 5, 10, 20, 40, 60, 150, 720, 1440 y 2880 minutos. Matemáticamente, la intensidad de la precipitación se calcula con la siguiente expresión:

$$I = \frac{\Delta t}{\Delta P}$$

Dónde:

I = intensidad de precipitación (mm.min⁻¹ o mm.h⁻¹)

ΔP = diferencial de precipitación (mm)

Δt = diferencial de tiempo (mm.min⁻¹ o mm.h⁻¹).

El estudio de esta variable se asocia principalmente a la generación del escurrimiento máximo natural o regulado, el diseño de sistemas de drenaje pluvial, estudios de mecánica de suelo, entre otras aplicaciones; y también al propio análisis del peligro por intensas lluvias (Planos, 2013).

Según las normas internacionales de diseño de redes pluviométricas (OMM, 2006), el 10% de los

componentes de éstas deben de ser pluviógrafos convenientemente distribuidos, de manera que se puedan construir relaciones entre los pluviógrafos y los pluviómetros. Utilizando las lecturas pluviométricas de 24 horas y las curvas de masa obtenidas a partir de los pluviógrafos, es posible simular un pluviograma o determinar relaciones entre los registros para determinados intervalos de tiempo y la lluvia de 24 horas leída en los pluviómetros, y con esto obtener mayor información sobre la intensidad de la precipitación (Planos, 2013; OMM, 2006; Campos, 1998).

5.3 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia

Como se expresó anteriormente, las curvas de *Intensidad-Duración-Frecuencia* (IDF, Figura 1) son una herramienta indispensable en toda investigación hidrológica aplicada. Su calidad depende de tres elementos fundamentales: contar con una red de pluviógrafos y pluviómetros que represente adecuadamente las peculiaridades del campo de variación espacial y temporal de la precipitación, tener una muestra representativa del fenómeno para conformar las series cronológicas y hacer una adecuada selección de las funciones de distribución para el modelado de las series (OMM, 2006).

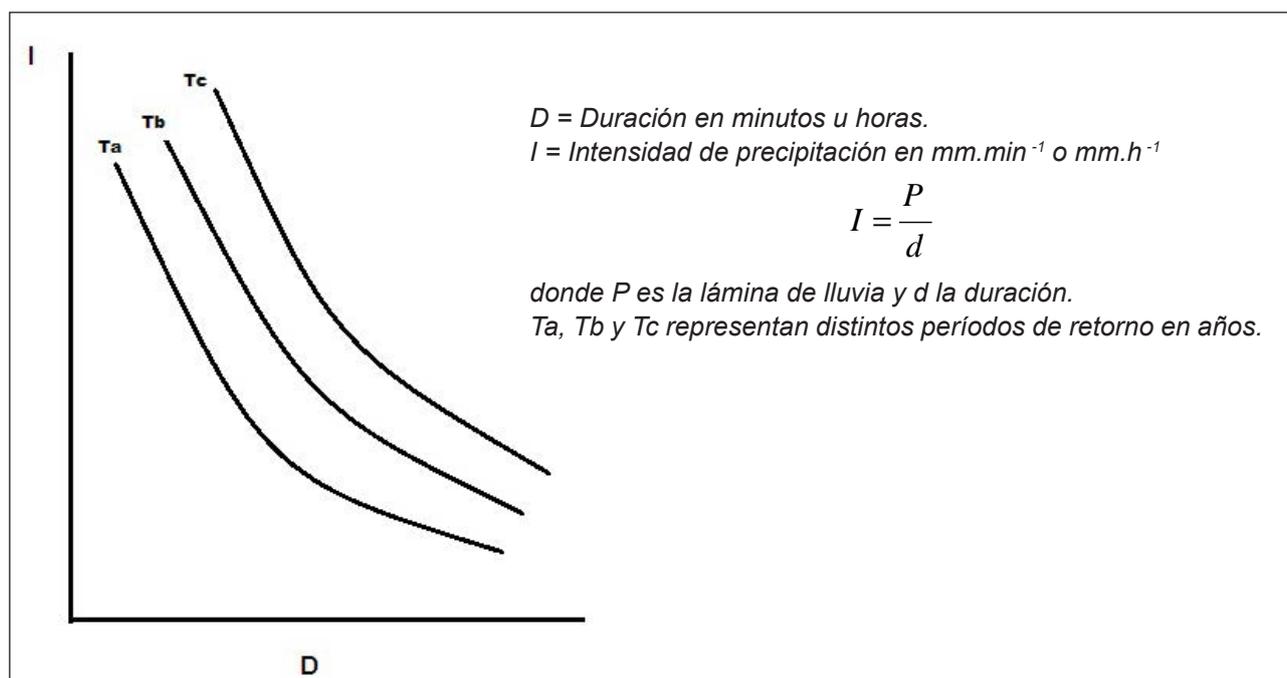


Figura 1. Esquema de curvas Intensidad Duración Frecuencia

Según Pizarro (2001) “La construcción de las curvas *Intensidad-Duración-Frecuencia* (IDF),, plantean distintas formas o métodos para su construcción. existen dos métodos; el primero, llamado de intensidad - período de retorno, relaciona estas dos variables para cada duración por separado, mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. El otro método relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno en una familia de curvas,

cuya ecuaciones $I = \frac{k * T^m}{(d + c)^n}$; donde k, m, n y c

son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, y en tanto que I y d corresponden a la intensidad de precipitación y la duración, respectivamente”.

Por su parte, Varas y Sánchez (1988), han propuesto otra metodología para el diseño de las curvas IDF. Dicho procedimiento plantea la siguiente expresión para estimar las intensidades máximas,

para distintos períodos de retorno y duraciones $P_{i,T} = k * P_{10,D} * C_{d,t} * C_{f,T}$ donde $P_{i,T}$, T = Lluvia con período de retorno de T años y duración t horas en (mm); K = Coeficiente para obtener la lluvia máxima absoluta en 24 horas en función del valor máximo diario ($k= 1,1$); $P_{10, D}$ = Lluvia Máxima diaria con 10 años de período de retorno; C_d, t = Coeficiente de duración para t horas y C_f, T = Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno. Entonces, la intensidad máxima de precipitación

queda dada por $I_{i,T} = \frac{P_{i,T}}{d}$.

En cuanto a la manera de trabajar con las curvas IDF, Chow et al (Tercera edición, 1994), plantean dos formas. La primera utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función *Gumbel*. El segundo método expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una

gráfica. Para esto Wenzel (1982), citado por Chow et al (Tercera edición, 1994), dedujo para algunas ciudades de los Estados Unidos, algunos coeficientes

para utilizarlos en una ecuación de la $I = \frac{c}{(Td^e + f)}$;

donde I es la intensidad de lluvia de diseño, y Td la duración, en tanto c , e y f son coeficientes que varían con el lugar y el período de retorno.

6. METODOLOGIA ADOPTADA PARA EL PROYECTO

La metodología seleccionada para este estudio es la propuesta por Campos Aranda (1998), para lo cual en el taller realizado en Perú (2010) se acordó proceder de la manera siguiente:

1. Seleccionar un período común de análisis con al menos 20 años de información (los últimos veinte años).
2. Elegir estaciones climatológicas representativas y extraer las series de lluvias máximas acumuladas.
3. Dividir las series en dos partes, una de excedentes y la otra con el resto de los datos (serie parcial). De cada serie se construirán las 2 curvas IDF.
4. Aplicar la metodología para la construcción de curvas hp-duración-t 24 hrs. transformada a curva IDF (Campos A, 1998).
5. Ajustar a las series la función de distribución de probabilidades (fdp) Gumbel y si el ajuste no es satisfactorio, se empleará la fdp de mejor ajuste.
6. Estimar los eventos para los periodos de retorno de 2,5,10,20,50,100,500,1000 años, los mismos con los que se crearán las curvas para la serie de excedentes y la de serie parcial.
7. Construir las curvas hp-duración-t 24 hrs. y transformarlas a IDF.
8. De cada región hidrológica se redactará una descripción general de sus características, la cual se enviará también, en formato de Word.
9. Si se cuenta con datos de pluviógrafos, construir las curvas IDF por regiones hidrológicas, con el procedimiento descrito en el taller; tomando en cuenta las consideraciones sobre la separación de series y las regiones hidrológicas.

7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA MODELACIÓN DEL RIESGO HIDROLÓGICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Entre los análisis realizados en el Tercer Taller del proyecto (Panamá, 2014) se valoró la utilización de un modelo estocástico para el estudio de la distribución de la precipitación y su regionalización tomando en cuenta su estacionalidad.

En síntesis el fundamento del modelo es el siguiente:

Considerando que el régimen de precipitación puede ser descrito mediante dos parámetros: la lámina de lluvia promedio por evento y el número medio de eventos durante un período dado de longitud T (parámetro aditivo); y que ambos parámetros son no estacionarios, es posible describir la evolución del régimen de precipitación a lo largo del año.

Se utiliza un Modelo de Poisson (White Noise Model), porque se supone que la distribución de los períodos de sequía y la precipitación en los períodos húmedos (o eventos de lluvia) se distribuyen exponencialmente:

$$f(R_T, \lambda_T, \beta) = e^{-\lambda_T - \frac{R_T}{\beta}} \frac{\lambda_T}{\beta} \frac{I_1 \left(2 \sqrt{\frac{\lambda_T R_T}{\beta}} \right)}{\sqrt{\frac{\lambda_T R_T}{\beta}}}$$

for all $R_T > 0$, donde:

donde I_1 la función modificada de Bessel de primer orden, β es la lámina media de lluvia de eventos y λT es la media del número de períodos húmedos (o eventos de lluvia) durante el período T . β es un parámetro de escala invariante en el tiempo.

Considerando el carácter estacional de la precipitación se analiza el comportamiento temporal y espacial de los parámetros λ_T y β ; utilizando el algoritmo de ventanas móviles propuesto por Le Barbé and Lebel (1997) y los resultados son mapeados como criterio de regionalización del riesgo.

Atendiendo a las recomendaciones del taller de Panamá, este procedimiento de modelado y regionalización del riesgo hidrológico fue presentado en la 7ma Conferencia Internacional FRIEND, que tuvo lugar en Montpellier, Francia, en noviembre del 2014 (Gutiérrez y Planos, 2014), y también fue presentado en la 6th International Conference on Flood Management (Sao Paulo, Brasil, 2014).

8. FICHAS DE REGISTRO DE FENÓMENOS MÁXIMOS

En estas fichas se resumen los datos e informaciones asociados a un evento máximo significativo por su valor científico e impacto socio económico (Figura 2). El proyecto IFI ha habilitado un vínculo para llenar las fichas directamente en un servidor WEB, <http://www.redciaq.uaq.mx/system/ficha/>.

El método de trabajo aprobado para la confección de esta ficha se expone a continuación

- Identificar los eventos extremos significativos del país, si fuera posible agruparlos por regiones pero no es condición excluyente. Tantos como sea posible.
- De estos eventos se buscará la mayor información posible con el fin de llenar la ficha

del Proyecto IFI que se encuentra en la página www.ifilac.org

- La mínima información requerida para los eventos extremos consiste en los datos de lámina total de lluvia, duración, fecha, daños en general, sinopsis del fenómeno extremo y, de ser posible, la intensidad de los fenómenos hidrológicos que ocasionó (precipitación y caudal), con coordenadas de estaciones utilizadas.

Hasta la fecha se han preparado las fichas de 193 eventos de precipitaciones máximas registradas en 23 países de la región LAC (http://ifilac.org/?page_id=88). Los países que han suministrado estas informaciones y datos son: Argentina, Belice, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Puerto Rico, República Dominicana, Uruguay y Venezuela.


140


**FICHA HISTÓRICA
REGISTRO DE INUNDACIÓN
VII-25 MÉXICO**

Datos básicos

PAÍS: Argentina	FECHA: 7 de Abril de 1995
ESTADO / PROVINCIA: Buenos Aires	REGIÓN GEOGRÁFICA:
CUIDAD / COMUNIDAD: Pergamino	
CAUSAS: Tormenta de lluvia y granizo	
VIENTOS MÁXIMOS:	ESCALA:
VELOCIDAD:	DIRECCIÓN:

Precipitación

DURACIÓN: 7 de Abril de 1995	ÁREA DE LA CUENCA: km ²
LLUVIA ANTECEDENTE:	
CUENCA:	
PRECIPITACIÓN MÁXIMA: 300 mm en 2 horas y media	ESTACIÓN:
INTENSIDADES: 110 mm por hora	LATITUD:
PERIODO DE RETORNO:	LONGITUD:


140


**FICHA HISTÓRICA
REGISTRO DE INUNDACIÓN
VII-25 MÉXICO**

Daños

SUPERFICIE AFECTADA:	60% de la superficie de la ciudad de Pergamino
DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN:	
PERSONAS AFECTADAS:	
PERDIDAS ECONÓMICAS:	USD
DAÑOS MATERIALES:	Agricultura, carreteras, infraestructura urbana.
AFECTACIONES:	Fallecimientos y personas desalojadas de sus viviendas.

Medios:



La Opinión, Diario de Pergamino.

Mapas:



Ubicación del Partido de Pergamino


140


**FICHA HISTÓRICA
REGISTRO DE INUNDACIÓN
VII-25 MÉXICO**

Fotografías:



Ciudad de Pergamino, Buenos Aires








140


**FICHA HISTÓRICA
REGISTRO DE INUNDACIÓN
VII-25 MÉXICO**

Breve reseña: (máximo 1800 caracteres con espacios)

El 7 de abril de 1995 la región Norte de la provincia de Buenos Aires fue afectada por una tormenta de lluvia y granizo que provocó inundaciones, numerosos evacuados y daños en los distintos partidos de la zona. La ciudad de Pergamino fue la más perjudicada por el fenómeno ya que quedó aislada y paralizada por una inundación de características dramáticas. Las pérdidas se consideraron catastróficas por el elevado valor económico de los bienes e inmuebles particulares y públicos afectados, además de los daños a la infraestructura urbana. Esta inundación es recordada como una situación inesperada en relación con las experiencias previas ya que involucró a zonas y sectores sociales de la ciudad considerados fuera de riesgo

Figura 2. Fichas FRIEND IFI de Registros Máximos. Ejemplo de evento ocurrido en Buenos Aires, Argentina el 7 de abril del 1995

9. VISIBILIDAD DE LOS RESULTADOS

Este proyecto se encuentra en ejecución, y en el instante que se presenta esta relatoría los países preparan sus curvas IDF, siguiendo las recomendaciones del último taller realizado (Panamá, 2014). La acción conjunta FRIEND – IFI está demostrando las ventajas del trabajo sinérgico entre las iniciativas regionales del PHI; así como la aceptación de los países involucrados a esta forma de trabajo. El proyecto ha permitido desarrollar capacidades en los países participantes en la temática de la que es objeto de trabajo; así como

el intercambio de experiencias entre instituciones gubernamentales, científicas y universidades de la Región.

El proyecto ha fortalecido las iniciativas regionales FRIEND e IFI; así como su reconocimiento en la Región. Desde el punto de vista científico se está logrando una mejor comprensión del comportamiento regional de la intensidad de las precipitaciones; y la actualización de los registros de eventos extremos máximos. El enfoque regional de los resultados que está teniendo el proyecto logra también una visión integrada del fenómeno que estudia.

Teniendo en cuenta la solicitud de los países participantes, se prevé someter a la consideración de los Presidentes de CoNaPhis, en su reunión de octubre del 2015 en Chile, el desarrollo de un seminario de capacitación sobre excedencias anuales, series no estacionarias e hidrología estocástica; y, sobre la base de la experiencia de esta primera fase del proyecto; se propondrá una segunda fase dedicada a los caudales máximos.

10. PARTICIPANTES EN EL PROYECTO

Relación de expertos representantes de los países que han en las actividades realizadas.

Nombre y Apellidos	País	Institución
1 Carlos Paoli	Argentina	Instituto Nacional del Agua
2 Javier Mendoza Rodríguez	Bolivia	SENAMHI
3 Fagner Bittencourt	Brasil	Centro CIH
4 José Vargas Baecheler	Chile	Universidad de Concepcion
5 Nelsy Verdugo Rodríguez	Colombia	IDEAM
6 Sadí Laporte Molina	Costa Rica	ICE
7 José Vargas Baecheler	Chile	Universidad de Concepción
8 Berny Fallas Lopez	Costa Rica	ICE
9 José Alberto Zúñiga	Costa Rica	ICE
10 Eduardo Planos Gutiérrez	Cuba	Coordinador FRIEND LAC
11 Argelio Fernández Richelme	Cuba	INRH
12 Víctor M. Pérez	Guatemala	INSIVUMEH
13 Manuel de Jesús Sales Rodríguez	Guatemala	INSIVUMEH
14 Alfonso Gutierrez López	México	Coordinador IFI LAC
15 Fabiola Arellano Lara	México	Universidad Queretaro
16 Rafael Porras	México	Universidad Queretaro
17 Isaías Montoya Blanco	Nicaragua	INETER
18 Jorge Espinosa	Panamá	ACP
19 Jorge Espinosa	Panamá	ACP
20 Gerardo Lies Romero	Panamá	ACP
21 Julio Ordoñez Galvez	Perú	SENAMHI
22 Julia Acuña Lazarte	Perú	SENAMHI
23 Jannette Castro	República Dominicana	INDRHI
24 Roberto Galán	Panamá	ANAM
25 Diana Lee de Centanaro	Panamá	ETESA

BIBLIOGRAFÍA

- Campos Aranda, D.F. 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico. Tercera Edición. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.
- Fernández-Jauregui, C. 2000. El agua como Fuente de conflictos: repaso de los focos de conflictos en el mundo. Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América latina y el Caribe. 17 p.
- Guha-Sapir D, Hoyois Ph.,Below.R. 2013. Annual Disaster Statistical Review 2013:The Numbers and Trends. Brussels: CRED; 2013. 42 p.
- Gutiérrez, A y Planos, E. 2013. Statistical analysis for modeling the hydrological risks in Latin America and the Caribbean. *IAHS Red Book* No 363.
- IFI 2015. Iniciativa Internacional sobre Inundaciones para América Latina y el Caribe. <http://ifilac.org/>.
- Le Barbé L., and Lebel, T., (1997) "Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990" *J. of Hydrology* **188-189**, 43-73 p.
- PHI (2015). Programa Hidrológico Internacional en América Latina y el Caribe. <http://www.unesco.org.uy/phi/es>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2006. Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y procesos de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. OMM No 168, Sexta edición, Ginebra, Suiza. 778 p.
- Programa Hidrológico Internacional. 2003. PHI-VI: Interacciones del agua: sistemas en peligro y desafíos sociales. Plan estratégico. UNESCO. Programa Hidrológico Internacional. 2009. PHI-VII: Dependencia de los recursos hídricos. Sistemas sometidos a estrés y respuestas sociales (2008-2013). Plan estratégico. UNESCO. SC-2009/WS/36.
- World Water Program Assessment 2007. El agua, una responsabilidad compartida. 2do Informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. UN-WATER/WWAP/2007/02. ISBN UNESCO: 92-3-104006-5 (edición en inglés) 569 p.
- Pizarro, R. 2001. Análisis comparativo de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) en 6 estaciones pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). Universidad de Talca. Chile.
- Planos, E. 2013. Enfoque integrado de los estudios de peligro por grandes precipitaciones y precipitaciones intensas. Aqua-LAC - Vol. 5 - N° 1 - Mar. 2013. pp. 88 – 96.
- Varas, E. y Sanchez, S. 1988. Curvas generalizadas de Intensidad duración frecuencia. Hidrología y Drenaje vial. Chile. 332 p.

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE KINOSHITA PARA LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE FUNCIONAMIENTO ÓPTIMO DE UN ESTERO COSTERO

DEFINITION OF OPTIMA HYDRAULIC USE AREA IN A COASTAL ESTERO, USING KINOSHITA EQUATION

M. Alfonso Gutiérrez-López¹, María Gricelda Jiménez J.²

Resumen

Se utiliza la formulación propuesta por Kinoshita para estimar la evolución del meandro en ríos, empleando las características fisiográficas de un cauce. Como principal característica se emplea la sinuosidad y la amplitud de las curvas; representadas por un coeficiente de sinuosidad angular. En este trabajo se presenta una fórmula alternativa basada en un análisis estocástico multivariado de las características hidráulicas del conjunto fluvial representado por un estero y dos ríos en confluencia. Asimismo, se utiliza una modelación hidráulica bidimensional para comparar los resultados del ancho óptimo del estero. Se aplican estos procedimientos en el conjunto estero San Pancho-Los Izotes-Las Calabazas ubicados en el estado de Nayarit, México. La comparación de los anchos obtenidos por ambos procedimientos permite estimar una zona de funcionamiento óptimo y definir en consecuencia zonas de riesgo potencial de inundación.

Palabras clave: meandro, análisis multivariado, simulación hidráulica, Nayarit México

Abstract

The formulation of Kinoshita curves takes into account a number of physiographic characteristics and the configuration of the river; however, it is the curve amplitude, the one that represents the main characteristic of this formulation. This main feature is known as the angular sinuosity coefficient. In this paper an alternative expression for meander prediction formulation, based on a stochastic multivariate analysis of the geomorphologic and physiographic characteristics of a river is proposed. Stochastic and hydraulic models are used to simulate the meandering of Estero San Pancho-Los Izotes-Las Calabazas Rivers in the Mexican state of Nayarit. The computation of the confidence limits, although from a statistical approach, constitutes a good tool to consolidate the arguments that define the zones at potential flood risk.

Key words: meander river, multivariate analysis, hydraulic simulation, Nayarit Mexico

1. INTRODUCCIÓN

La localidad de San Francisco (San Pancho) Nayarit, resalta entre los destinos de playa de la zona del Pacífico mexicano por su calidad proactiva en beneficio de los recursos naturales. No obstante, las presiones del crecimiento urbano afectan a la biodiversidad de sus cuerpos fluviales y costeros. En especial se puede mencionar el estero de San Pancho (en ocasiones conocido como estero La Palma), en donde se ha documentado la presencia de animales como nutrias, cocodrilos y una gran cantidad de aves; pero que desafortunadamente se ha visto afectado, en fechas recientes, por acciones que ponen en riesgo su continuidad y su supervivencia. Gracias a las valiosas acciones de activismo ecológico de la comunidad se ha evitado su muerte, deterioro y pérdida definitiva. Asimismo, está presente la problemática de la contaminación del agua, agravada por la contaminación de residuos sólidos urbanos en la playa que afecta sin duda a las poblaciones de plantas, disminuye las especies de aves y altera los principales recursos del estero. Lo principal para lograr una correcta comprensión del

funcionamiento del estero es lograr una delimitación óptima de su desembocadura a fin de garantizar su descarga. Se presenta a continuación una descripción del estero y de los procesos fluviales que caracterizan el funcionamiento hidráulico de este cuerpo de agua. Se realiza una simulación matemática basada en la formulación propuesta por Gutiérrez-López *et al.*, (2014) y una comprobación numérica, empleando la caracterización en campo del estero y de la modelación 2D de su principal afluente el río Los Izotes. El corredor fluvial, expresado como un ancho de cauce, en hidráulica fluvial se basa en un procedimiento que identifica dos tipos de sinuosidad en un río: la topográfica y la hidráulica. En este último tipo, la forma del meandro se asocia con la delimitación del corredor fluvial y con la configuración de la plataforma geológica de la corriente. Para el tipo de sinuosidad topográfica, se utilizan las llamadas curvas de Kinoshita las cuales se basan en la formulación empírica desarrollada por Beck (1988). La formulación de curvas Kinoshita incorpora un gran número de

¹ Centro de Investigaciones del Agua, Querétaro / Iniciativa Internacional sobre Inundaciones IFI-LAC.
e-mail: alfonso.gutierrez@uaq.mx

² Consultoría Punto Cero para el Desarrollo S.C., Querétaro, México

características fisiográficas y de configuración de un río, sin embargo, es la amplitud de las curvas, lo que representa la característica primordial de esta formulación; a esta característica se le conoce como coeficiente de sinuosidad angular, la cual se logra determinar con mediciones en campo y una caracterización geométrica de la evolución histórica del meandro del río. Es importante mencionar que con estos resultados se desea poner en evidencia la importancia del estero y lo valioso que resulta que se mantenga su funcionamiento como cuerpo regulador y generador de funciones ambientales e hidráulicas vitales para la población de San Pancho. A continuación se muestra una secuencia histórica de fotografías que permiten observar la interacción que tiene el estero San Pancho y los ríos Los Izotes y Las Calabazas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Región Hidrológica 13 se ubica en el occidente de la República Mexicana en los estados de Nayarit y Jalisco, cuenta con una extensión 5,225 km². La integran 6 cuencas hidrológicas, la parte norte denominada R. HUICICILA- SAN BLAS, está formada por las cuencas: Río Huicicila, Río Ixtapa y Río San Blas; la parte sur que corresponde a R. CUALE- PITILLAL está formada por las cuencas: Río Tecomala, Río Cuale y Río Pitillal. (CONAGUA, 2012). Esta ubicación se muestra a detalle en las figuras 1 y 2.

La zona de estudio se localiza en la subcuenca Charco Hondo que pertenece a la cuenca hidrológica del río Huicicila está conformada por las microcuencas del Arroyo Los Izotes, Arroyo Las Calabazas, cuenta con una superficie de 68.48 km². Limita en la parte con

el Océano Pacífico, al este con la Región Hidrológica 14, al norte y sur colinda con otras microcuencas que pertenecen a la cuenca del Río Huicicila (Figura 2).

Para el estudio de los efectos de inundación en el estero San Pancho, localizado en la localidad de San Francisco, Nayarit, México fue necesario calcular los caudales que aporta la cuenca de la que forma parte dicho estero ubicado a la salida de la cuenca que conforman los ríos Los Izotes que tiene una pendiente media del cauce de 1.7% con un tiempo de concentración de 2.94 horas. El río Las Calabazas tiene una pendiente media del cauce 3.2% con un tiempo de concentración de 1.59 horas. Partiendo del estudio hidrológico calculado con hietogramas tipo, relacionados con tormentas de gran intensidad y corta duración producto del paso de huracanes por esta región del país, utilizando técnicas de análisis espacial de precipitaciones, cartografía de campos de lluvia dentro de regiones consideradas hidrológicamente homogéneas, se obtuvieron gastos para un periodo de retorno de 100 años de 147.7 m³/s para el río Los Izotes y 92.6 m³/s para el río Las Calabazas. Los caudales dominantes calculados tienen una gran correlación con los valores estimados en el estudio hidrológico de estos dos ríos. Por ejemplo para el caso del río Los Izotes, se estimó un caudal dominante de 108 m³/s para un periodo de retorno de 25 años y de 125 m³/s para 50 años. De forma similar para el río Las Calabazas se tienen 102 m³/s y 117 m³/s respectivamente. En la figura 3, se muestra la ubicación del conjunto fluvial, río Los Izotes, río Las Calabazas y estero San Pancho (ESP-Izotes-Calabazas). También se muestran en la figura 4 (a,b,c y d) la evolución en el tiempo de la mancha urbana alrededor de este sistema fluvial.

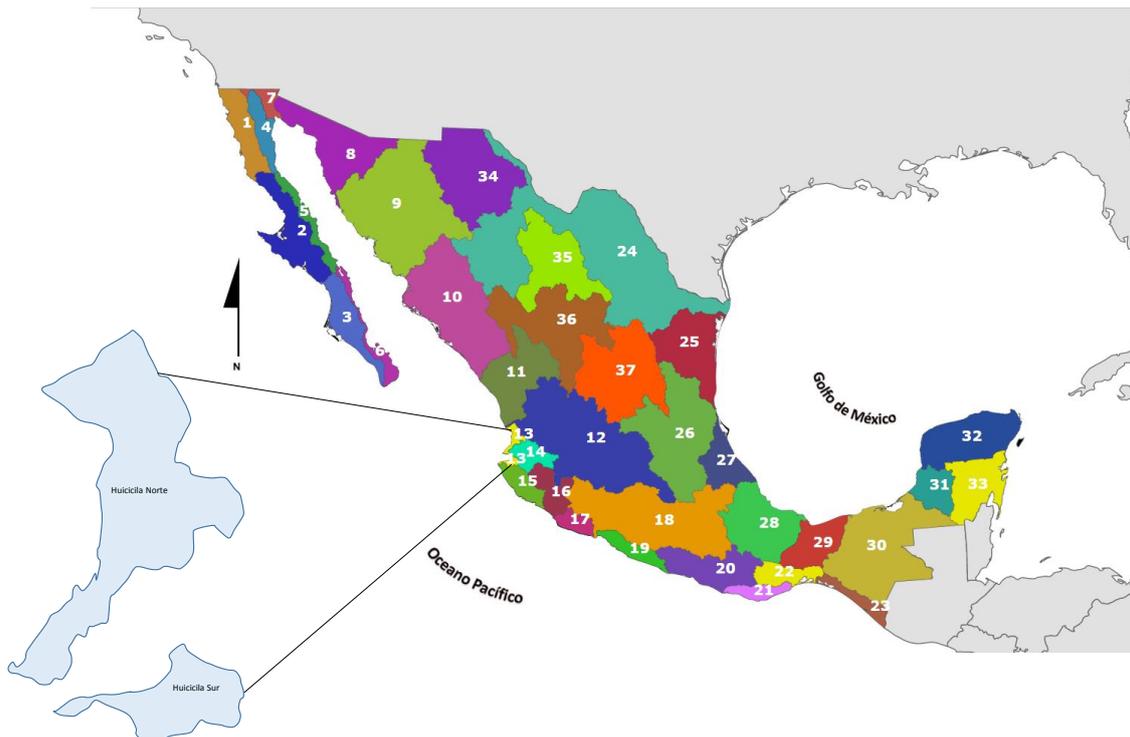


Figura 1. Ubicación de la Región Hidrológica 13: Huicicila

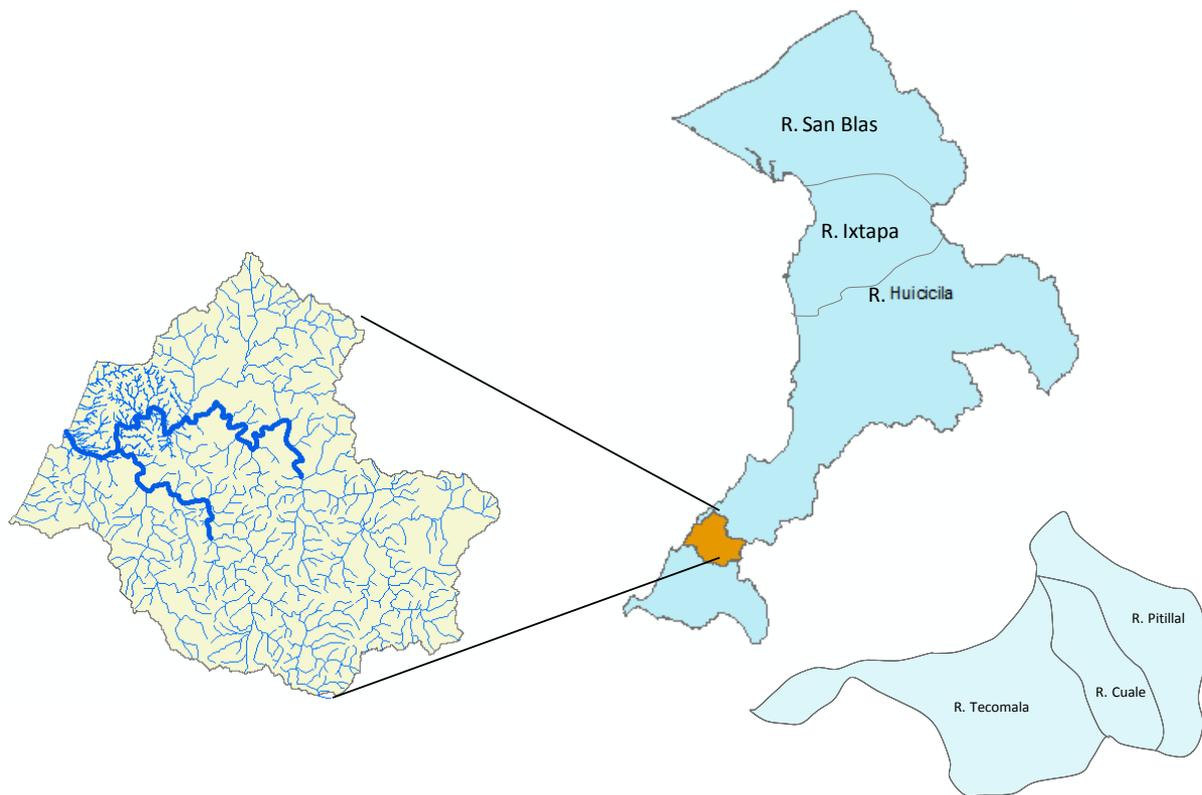


Figura 2. Subcuenca Charco Hondo

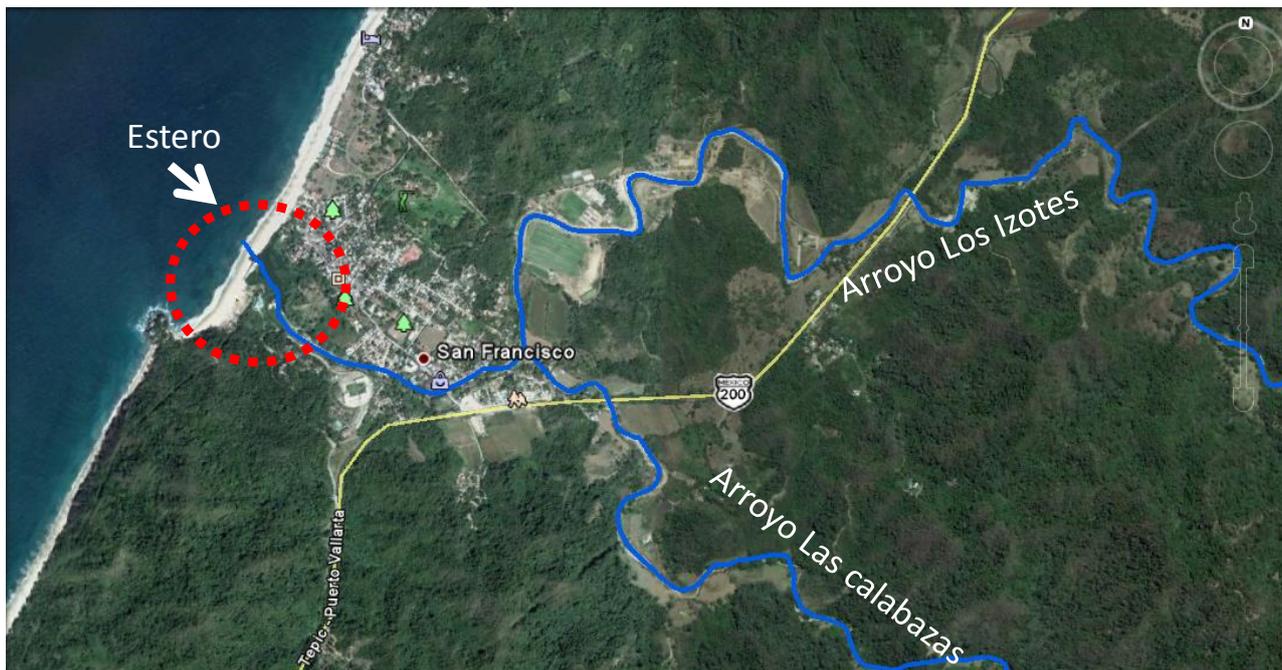
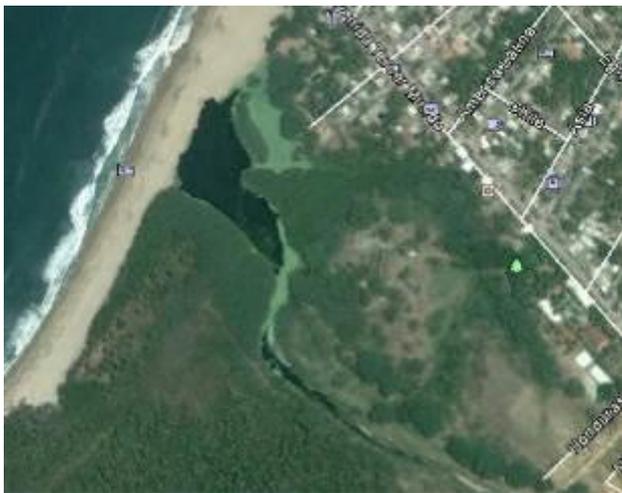
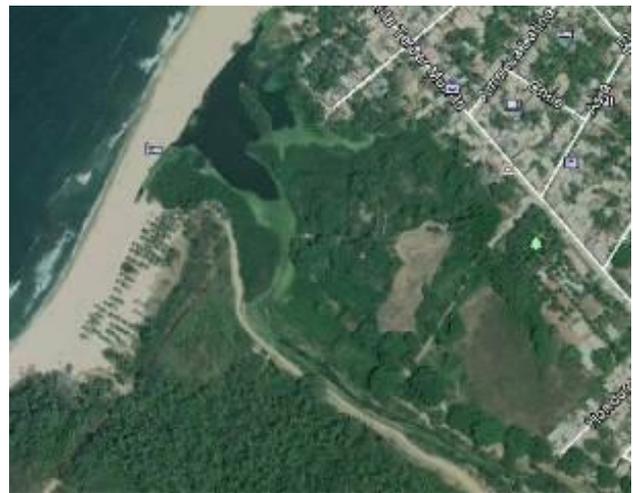


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio



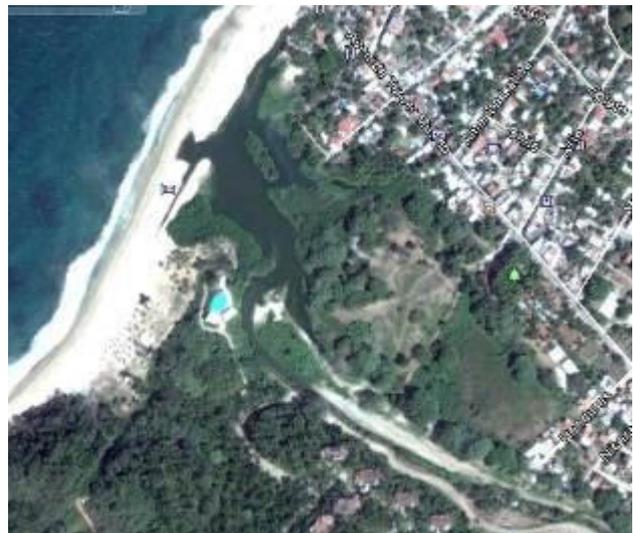
a) Vista aérea del estero San Pancho 2002



b) Vista aérea del estero San Pancho 2009



c) Vista aérea del estero San Pancho 2011



b) Vista aérea del estero San Pancho 2014

Figura 4. Vista aérea del estero San Pancho, evolución en el tiempo

3. FUNCIONAMIENTO FLUVIAL DE LOS RÍOS LOS IZOTES Y LAS CALABAZAS

La predicción del meandro de ríos es uno de los fenómenos físicos más complejos a estudiar dentro de la hidráulica fluvial. La constante interacción de causa-efecto entre la propagación de una onda de avenida y las condiciones geológicas de la sección transversal de un cauce, son sin duda el génesis del meandro en ríos. Como una consecuencia de esta interacción, procesos como la migración lateral (debida a la erosión de las márgenes), el ensanchamiento del cauce, la degradación y agradación del lecho, la evolución de las formas de fondo y las variaciones en las concentraciones de sedimentos suspendidos; son procesos fluviales que ocurren a lo largo y ancho de los componentes funcionales de un río; transmitiendo así, un sello o característica única a la planicie de inundación y a la desembocadura de un río. A este conjunto de procesos fluviales se les conoce con el nombre de migración de ríos. En la actualidad numerosos estudios se llevan a cabo para predecir el comportamiento de un río con

base en este tipo de procesos. Pero también estas características hidrodinámicas aportan un grado de dificultad cuando se trata de utilizar modelos hidrodinámicos para predecir la migración de ríos con meandros. Sin embargo, pocos son los programas de cómputo desarrollados específicamente para describir y pronosticar la migración de ríos (Lagasse *et al.*, 2004; Abad y García, 2006). En Latinoamérica, el modelo RVR Meander (Abad y García, 2004), constituye la más precisa herramienta para el pronóstico de meandros. Un procedimiento para caracterizar el meandro en ríos debe considerar, una completa descripción del ciclo fluvial. Es decir, una caracterización de la etapa de juventud, madurez y completo desarrollo del río (Mueller, 1968). Este procedimiento se basa en la identificación de los dos tipos de sinuosidad: topográfica e hidráulica. En este último tipo, la forma del meandro se asocia con la delimitación del corredor fluvial y con la configuración de la plataforma geológica de la corriente. Para el tipo de sinuosidad topográfica, se utilizan las llamadas curvas de Kinoshita las cuales se basan en la formulación empírica desarrollada por Beck

(1988). La formulación de curvas Kinoshita incorpora un gran número de características fisiográficas y de configuración de un río, sin embargo, es la amplitud de las curvas, lo que representa la característica primordial de esta formulación; a esta característica se le conoce como coeficiente de sinusidad angular. Un procedimiento propuesto por (Abad y García, 2006), consiste en identificar tres etapas principales. Un pre-procesamiento, el cual consiste en obtener la ubicación exacta (coordenadas) de los n puntos que juntos conforman la traza de un río a lo largo de su eje. La segunda etapa es el procesamiento estadístico. En ella se estima apropiadamente la evolución del río. Se calculan parámetros como el desplazamiento lateral y longitudinal del río, la amplitud, la sinusidad, así como la curvatura promedio (MacDonald *et al.*, 1992). Adicionalmente se emplean otros parámetros correspondientes a los aspectos dinámicos como el gasto de lavado y gasto dominante. En las tablas siguientes se muestran las características morfológicas y fluviales para el análisis de migración de ríos utilizando un esquema

estocástico senoidal. La figura 5 describe cada uno de los parámetros recién comentados.

Características morfológicas y fluviales para el análisis de migración de ríos

No.	Variables que intervienen (Xi)	Símbolo
1	Longitud del río	L
2	Radio de curvatura	r
3	Ancho del cauce	b
4	Longitud de onda del meandro	M_L / λ
5	Ancho del meandro	B
6	1/2 Ancho de cauce primer tramo	b_1
7	1/2 Ancho de cauce segundo tramo	b_2
8	Amplitud del meandro	a
9	Grado de curvatura	G_c
10	Ángulo de desvío del cauce en un punto	θ
11	Longitud de curva	L_c
12	Relación de Schumm (amplitud de curva)	r/b
13	Área de la cuenca, a la curva	Ac
14	Factor de área	FA
15	Gasto dominante (Tr = 2 años)	Qd

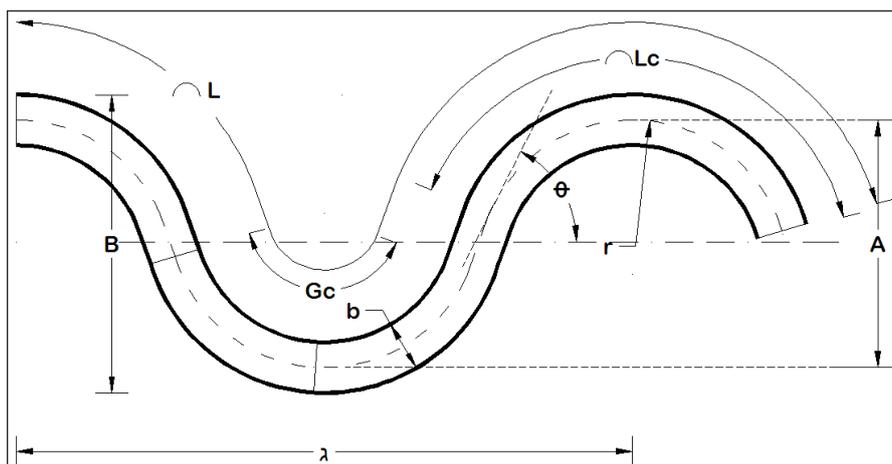


Figura 5. Características morfológicas y fluviales propuestas

Tabla 1. Características morfológicas y fluviales del conjunto ESP-Izotes-Calabazas

Variables	Tramo				
	1	2	3	4	
L	Longitud río L (m)	3024.86	2962.46	705.15	1242.74
r	Radio de curvatura (m)	797.95	1166.59	360.2	1278.91
B	Ancho del cauce b (m)	292.648	179.311	145.7025	164.588
ML	Longitud de onda λ (m)	4363.02	3913.70	2449.32	1814.77
B	Ancho del meandro B (m)	1536.69	502.23	1206.17	1482.00
b1	1/2 Ancho de cauce (m)	146.324	89.6555	72.85125	82.294
b2	1/2 Ancho de cauce (m)	149.175	71.305	48.32	76.33
a	Amplitud (m)	1241.191	341.2695	1084.999	1323.376
Gc	Grado de curvatura (grados)	56	85	88	99
Angle	Ángulo Θ (grados)	49	42	48	41
Lc	Longitud curva (m)	779.9039	1730.671	553.2275	2209.798
r/b	(r/b) (forzadas)	2.7266545	6.5059589	2.4721607	7.7703721
Ac	Área de cuenca en curvas (km ²)	177.19323	180.05136	180.70565	181.64418
FA	Factor de área (%)	0.730	0.742	0.745	0.749

La tercera etapa comprende propiamente la predicción de la migración del río. En esta etapa es importante definir la formulación de la configuración de curvas; si son simétricas (*sinegenerated curves*) (Langbein y Leopold, 1966) o asimétricas (Kinoshita, 1961; Kinoshita y Miwa, 1974; Parker *et al.*, 1983; Yamaoka y Hasegawa, 1984; Parker y Andrews, 1986). (*Asymmetric Bends*). Para modelar la erosión de bancos, considerados verticales, se emplea el concepto de velocidad excesiva. Algunas simplificaciones son utilizadas en este tipo de modelos, por ejemplo la ecuación de continuidad del sedimento, no es incluida y se considera un perfil lineal del fondo del río (Abad y García, 2006). Este nuevo procedimiento utiliza la *forma* de la expresión de Kinoshita, pero afecta la sucesión de senos y cosenos directamente con las características morfológicas del río. Esta idea no es nueva y normalmente se utiliza para definir la variación promedio aguas abajo del valle (\dot{z}) y el ancho de la sección transversal del valle (\dot{y}) (MacDonald, 1991; MacDonald *et al.*, 1992).

$$\dot{z} = \frac{\sum n \text{sen } \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad \dot{y} = \frac{\sum n \text{cos } \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad (1)$$

donde:

- n es el componente perpendicular al eje del río, a lo largo de la sección transversal.
- s es el componente perpendicular a "n" que forma un ángulo (θ) con el plano horizontal de referencia.
- Δt es el intervalo de tiempo de ocurrencia.

Se proponen formar una ecuación con una sucesión de senos y cosenos. La amplitud de cada función trigonométrica, está formada por los valores de cada una de las características morfológicas y fluviales propuestas (X_i). Asimismo, la frecuencia de los senos y cosenos es el producto de cada uno de los componentes principales Ω_i por la distancia longitudinal de desarrollo del meandro. Esto quiere decir que el ancho de la sección transversal del valle (\dot{y}) es función de la variación del meandro a lo largo del valle (\dot{z}) y de las características morfológicas-fluviales.

$$(\dot{y}_i) = \left[X_{i+(i-1)}'' \text{seno}(|\Omega_i| \dot{z}) \right] + \left[X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i| \dot{z}) \right] \quad (2)$$

donde:

- X_i'' son los valores centrados-estandarizados de las características morfológicas y fluviales propuestas $X_i'' = (X_i - \mu_x) / \sigma_x$
- Ω_i es el i-ésimo componente principal

Una expresión similar a la anterior, es la propuesta por Kinoshita para generar curvas de meandros Beck (1988).

$$\theta = \theta_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right) + \theta_0^3 \left[J_s \text{cos} \left(3 \frac{2\pi s}{\lambda} \right) - J_f \text{sen} \left(3 \frac{2\pi s}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

- J_s es el coeficiente de asimetría
- J_f es el coeficiente de aplastamiento o curtosis
- θ_0 es ángulo máximo de amplitud
- λ es el arco de curvatura del canal
- s es la coordenada de giro

Beck (1988) presentó una comparación cualitativa entre la sinuosidad media y la elevación del fondo de un río con curvatura simétrica (Hooke, 1984) presentó estas relaciones a través de tres ecuaciones que se conocen como las relaciones de Beck (Abad y García, 2006). Esta misma comparación se realizó para ríos con alta sinuosidad. Estas comparaciones sugieren que existe un componente a lo largo del eje del río, que relaciona la pendiente transversal máxima del río con el radio máximo de curvatura. Sin embargo, los demás componentes topográficos son bien representados. De forma similar, se puede demostrar que existe similitud entre la formulación de Kinoshita (ecuación 3) y la expresión propuesta en este trabajo dada por la ecuación 2. Lo anterior fue presentado por Gutiérrez-López *et al.*, (2014) quienes mostraron que la sinuosidad utilizando los valores presentados por la formulación de Beck (1988) y utilizando los mismo parámetros se puede estimar la sinuosidad empleando la ecuación 2, para $i=1$ (un solo par de senos y cosenos). La similitud entre las dos formulaciones es evidente, a pesar de que existe un desfaseamiento. La formulación propuesta lo corrige agregando otro par de senos y cosenos y así sucesivamente, hasta lograr la precisión deseada. Cabe mencionar que en ambos casos se utilizaron los valores de $\theta_0 = 20^\circ$ $J_s = 1/32$ $J_f = 1/192$ y $\theta_0 = 100^\circ$ $J_s = 1/32$ $J_f = 1/192$ presentados por Beck (1988). La idea fundamental de la expresión propuesta radica en utilizar un número tal de pares de senos y cosenos que permitan describir la trayectoria y migración del meandro. Además estas funciones trigonométricas estarán afectadas por un máximo de características morfológicas y fluviales, siempre y cuando éstas hayan sido seleccionadas y jerarquizadas con un análisis multivariado. Por ejemplo para nuestro caso, al estimar la sinuosidad del río Los Izotes, la formulación se puede extender hasta 15 características morfológicas y fluviales; lo cual da como resultado tener 7 pares de senos y cosenos ($n=7$), más un término independiente. La selección de variables que se utiliz proviene de una análisis multivariado y se basa en la idea de que un conjunto de variables son capaces de especificar

por si solas una cierta semejanza, que dibujadas en un diagrama revelarán similitudes (o agrupaciones) entre cada una de ellas. Esta consideración se emplea sistemáticamente en la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas en hidrología (Everitt, 1978; Wiltshire y Beran, 1987; Donald, 1988; Nathan y McMahon, 1990). Este tipo de desarrollo multivariado prevé una discriminación previa de variables, la cual sirve para resaltar la importancia de cada una de las características empleadas.

Como se ha mencionado, antes de utilizar el esquema propuesto es necesario llevar a cabo una jerarquización de variables. Con los valores de las características morfológicas y fluviales presentadas, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) en donde se encontró que los dos primeros componentes principales explican el 70.5 % de la varianza de las características morfológicas y fluviales del río Los Izotes. Los resultados del ACP muestran la existencia de tres grupos de variables que definen el comportamiento del río Los Izotes. El primer grupo está formado por las características morfológicas del río, como son el radio de curvatura, la sinuosidad y las longitudes de curva y de la onda (r/b , r , ML , Lc y $b2$). El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el

área de la cuenca (Qd , FA y Ac). El tercer grupo de características representa variables morfológicas y geométricas del río (a , B , L , Gc , $Ang\theta$, b y $b1$). También de este análisis se puede obtener una jerarquización de características con base en la proyección de cada variable sobre los ejes de los componentes principales $|\Omega_i$. Este procedimiento es la interpretación tradicional de un ACP. Gutiérrez-López *et al.*, (2014) mostraron que la variable con mayor importancia para el primer componente principal Ω_1 es la sinuosidad (r/b) y la de mayor relevancia para el segundo componente Ω_2 es el ancho del meandro (B).

Por otro lado, se estiman los valores máximos y mínimos de cada una de las características del conjunto fluvial ESP-Izotes-Calabazas. Estos valores permiten obtener las condiciones límite hasta la fecha, de la posible configuración morfológica de sus meandros. A continuación se utilizan estas características jerarquizadas y los componentes principales en la ecuación 2 para obtener una representación del meandro del río en el tramo estudiado. Para el caso del río Los Izotes se seleccionaron 9 características $X_{i,i=1...9}$ ($n=4$ + un término independiente) y los primeros cuatro componentes principales $\Omega_{i,i=1...4}$. Con estos valores puede desarrollarse la expresión de la siguiente forma:

$$\dot{y}(z) = \left[(r/b)/\sqrt{2} \right] + \sum_{i=1}^4 \left[X_{i+(i-1)}'' \text{seno}(|\Omega_i|z) + X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i|z) \right] \quad (4)$$

donde

z es la variación de las condiciones de meandro a lo largo del eje del río (2.3 km)

$$\begin{aligned} \dot{y}(z) = & \left[(r/b)/\sqrt{2} \right] + \left[M_L \cdot \text{seno}(|\Omega_1|z) + \theta \cdot \text{cos}(|\Omega_1|z) \right] + \left[r \cdot \text{seno}(|\Omega_2|z) + Lc \cdot \text{cos}(|\Omega_2|z) \right] + \dots \\ & \dots + \left[G_c \cdot \text{seno}(|\Omega_3|z) + FA \cdot \text{cos}(|\Omega_3|z) \right] + \left[Qd \cdot \text{seno}(|\Omega_4|z) + AC \cdot \text{cos}(|\Omega_4|z) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Al sustituir las características morfológicas máximas y mínimas del río en la expresión anterior se obtiene el pronóstico del meandro como una representación gráfica de la sinuosidad del río. La figura 6 muestra los resultados de este procedimiento. Cabe señalar que al utilizar cuatro pares de senos y cosenos, la señal se deforma y presenta lo que se conoce como *ruido blanco* de una señal. Para suavizar el trazo es necesario tomar el promedio móvil de cada una de las condiciones. La sinuosidad obtenida de un promedio móvil tiene la ventaja de poder desfasarse a lo largo del eje longitudinal del río, lo cual permite adecuar la configuración del meandro, según lo analizado al comparar la expresión propuesta en este trabajo, con la formulación de Beck (1988).

Si se acepta que el trazo de estos límites proviene de una formulación que involucra las características morfológicas y fluviales del río Los Izotes, entonces esta frontera así determinada podrá delimitar las condiciones extremas de movimiento del río. Sin embargo, es importante mencionar que rigurosamente la construcción de estos límites se basa en una condición puramente estadística y no involucra en su formulación condiciones físicas del río. Esto puede solucionarse, por ejemplo agregando a la metodología propuesta una etapa de simulación estocástica para definir directamente las fronteras o zonas de riesgo por meandro del río Los Izotes; o en su caso como se muestra a continuación con una simulación hidráulica.

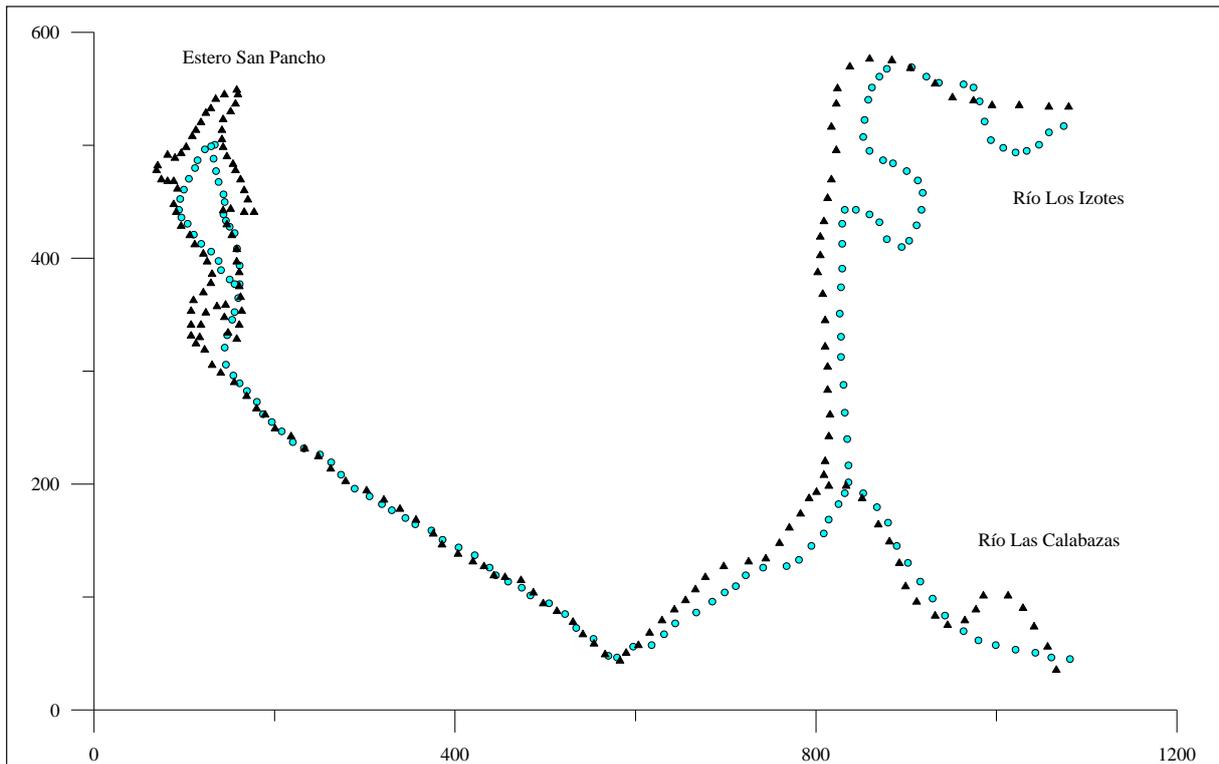


Figura 6. Comparación entre la condición natural de meandro del conjunto estero SP-Izotes-Calabazas y sus condiciones máximas (triángulos) y mínimas simuladas (círculos).

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL

Para conocer la zona de inundación del estero fue necesario utilizar una modelación matemática del flujo de agua en los ríos Izotes y Calabazas, los cuales descargan en el estero y finalmente al mar del Océano Pacifico. La modelación matemática del flujo de agua en un río consiste en intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La modelación matemática es siempre una aproximación a la realidad, tanto mejor cuanto más se adapten las ecuaciones de partida y el esquema numérico para su resolución al fenómeno real que se está estudiando. (Bladé E. *et al*, 2006). Para describir muchos fenómenos naturales como puede ser la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación unidimensional (1D) deja de ser adecuada y por ello se desarrollaron primero los esquemas cuasi bidimensionales y luego los esquemas bidimensionales (2D). Para el caso de la modelación de inundación del estero, necesariamente se utilizó un modelo 2D ya que existen meandros fuertes con llanuras de inundación importantes.

Los modelos bidimensionales simulan flujo de fluidos no-newtonianos, aludes torrenciales en conos de deyección, simula flujos en topografías complejas, en dichos modelos se trabaja sobre un dominio bidimensional con 3 variables definidas en cada

punto del dominio: el calado y las dos componentes de la velocidad horizontal. Las ecuaciones que rigen la evolución de dichas variables se conocen como ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales, y se pueden expresar como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \tag{6}$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{I}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial t} \tag{7}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{I}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial t} \tag{8}$$

donde:

- h es la profundidad del flujo (m);
- V_x y V_y son las componentes de la velocidad media en la vertical (m/s),
- T es el tiempo(s),
- G es la aceleración de la gravedad (m/s²),
- S_f es la pendiente de fricción;
- S_o es la pendiente del lecho,
- i es intensidad de la precipitación (m/s).

Para resolver numéricamente las ecuaciones de flujo es necesario discretizarlas en una malla bidimensional. Independientemente del esquema numérico utilizado, las mallas en que se discretizan las ecuaciones se pueden clasificar de forma general en mallas estructuradas y mallas no estructuradas. Se podría realizar una clasificación más detallada de las mismas, pero para los propósitos de este artículo la anterior clasificación es suficiente, (Bladé E. *et al*, 2006). Las mallas estructuradas bidimensionales están formadas por elementos cuadrangulares ordenados en filas y columnas, de forma que cualquier elemento quede perfectamente identificado por un par de índices (i,j). La principal ventaja de las mallas estructuradas es su eficiencia desde el punto de vista numérico, tanto en lo que se refiere a la programación de algoritmos como al orden de precisión. Tienen el inconveniente de ser difícilmente adaptables a geometrías muy irregulares, como es el caso de los cauces fluviales. Este problema se solventa en algunos casos mediante el uso de coordenadas curvilíneas o mediante mallas estructuradas por bloques. Las mallas no estructuradas están formadas por elementos de cualquier forma. En mallas bidimensionales lo más habitual es utilizar elementos triangulares, pudiéndose utilizar asimismo elementos cuadrangulares en zonas con una geometría más regular. Su principal ventaja es la facilidad con que se adaptan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Esta característica las hace especialmente indicadas para su utilización en hidráulica fluvial. Se utilizó la herramienta computacional Iber que es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente,

GEAMA (Universidad de La Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Dicho modelo incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión. Iber es un modelo de uso libre que se puede descargar de la página web www.iberaula.es, donde se ofrece documentación adicional, soporte a través de un foro de discusión y cursos de formación, (Bladé E. *et al*, 2012). Utilizando el modelo Iber, se realizó la simulación de inundación de los arroyos Izotes y Calabazas así como del estero ubicado aguas abajo hasta la desembocadura con el mar. En dicho modelo se utilizó información topográfica obtenida del Modelo Digital de Elevación del INEGI, datos de caudal e hidrogramas obtenidos en el estudio hidrológico.

5. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

El cálculo de las zonas inundables en los sitios antes mencionados se realizó para caudales asociados al periodo de retorno de 100 años. Como primer resultado, se muestra el tirante (calado) a lo largo del tramo analizado (figura 7).

El calado o tirante del agua en el tramo analizado puede llegar hasta 6.65 metros como se marca en color rojo en la figura 7, el calado máximo se genera en el punto donde se ubica en el estero y es lógico debido a que este sitio trabaja como zona de inundación por su configuración topográfica y por ser el punto de descarga de la cuenca.

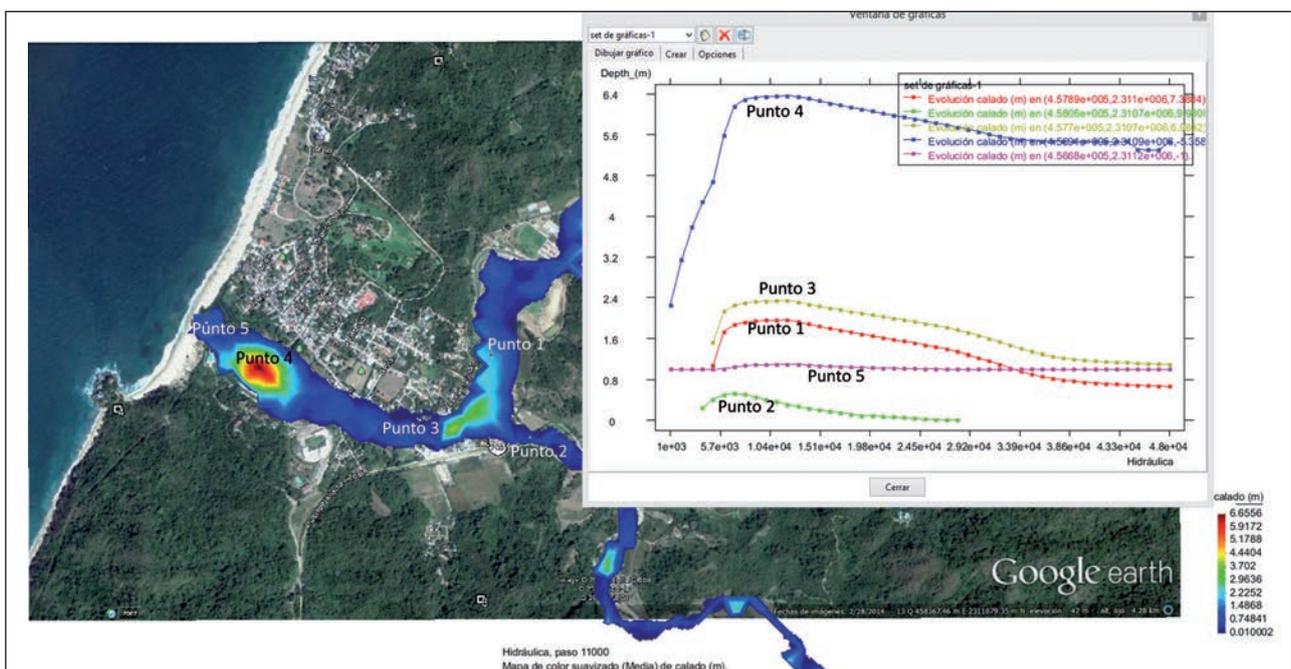


Figura 7. Evolución del calado en diferentes puntos

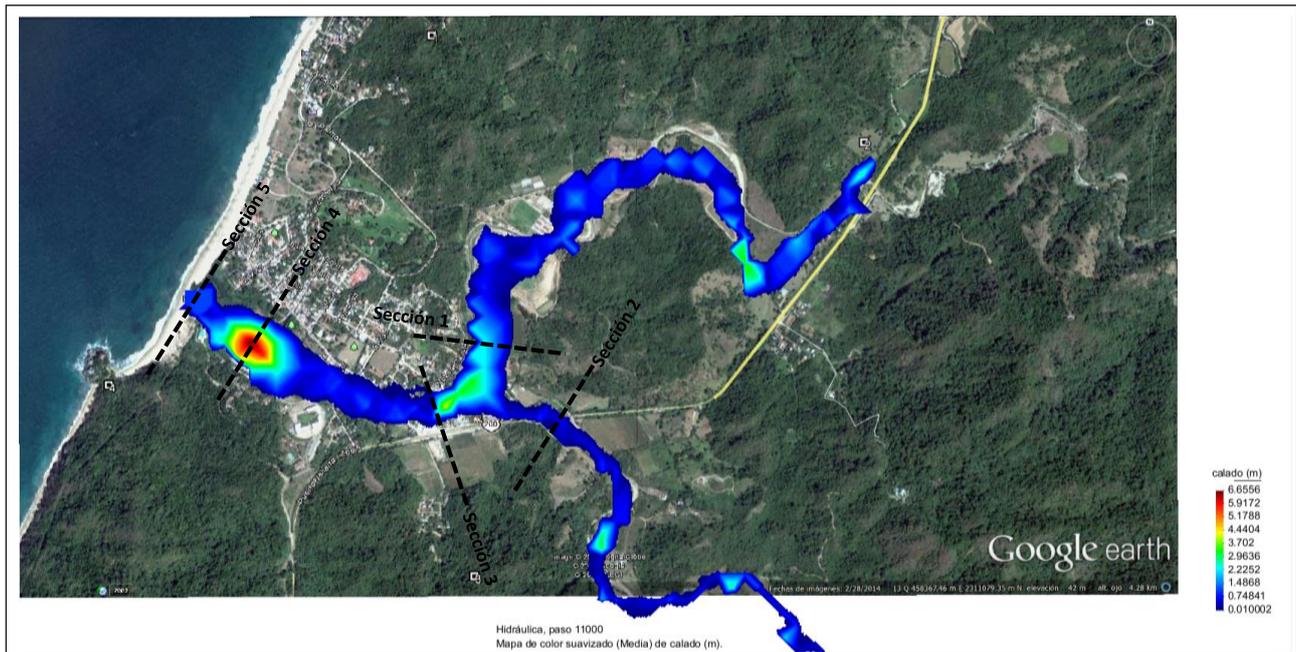


Figura 8. Puntos de secciones transversales en análisis

El modelo Iber permite conocer la evolución de las velocidades así como los valores en un punto a lo largo del tiempo establecido en el hidrograma, se eligieron cinco puntos de análisis para el calado, mismos que se muestran en la figura 7.

Los puntos 1 y 2 se encuentran antes de la confluencia de los arroyos Izotes y Calabazas, el punto 3 es inmediatamente después de la confluencia, el punto 4 corresponde al estero y finalmente el punto 5 está en la desembocadura del agua al mar. Como puede observarse, los tirantes máximos se generan en el estero (punto 4) mientras que en la desembocadura (punto 5) se mantiene un tirante casi constante, esto puede justificarse debido a que la ubicación del estero permite que éste tenga una función reguladora de los escurrimientos generados en la cuenca. Las velocidades generadas en la modelación bidimensional indican que los puntos con mayor velocidad de flujo son en los puntos de inicio del modelo y después de la confluencia de los ríos Izotes y Calabazas donde se presentan velocidades de hasta 5 m/s mientras que en el estero las velocidades varían desde 0.75 m/s a 1.5 m/s. El escurrimiento del río las Calabazas es el primero en llegar al punto de confluencia y esto se debe al tiempo de concentración de esta cuenca ya que al ser 1.59 horas es menor que el de los Izotes es 2.94 horas además de que el río las calabazas tiene una pendiente media mayor a la de los izotes.

Como forma adicional de mostrar el ancho de la inundación en el tramo, se generaron secciones con la variable de tirante de agua a fin de observar la amplitud del espejo de agua, las secciones elegidas son las que integran los puntos de evolución de calado mostrados en la figura 8. La sección 1 indica una amplitud de espejo de agua aproximada de

237 m, la sección 2 de 85 m, la sección 3 de 140 m, **sección 4 (en el inicio del estero) es de 250 m y finalmente la sección 5 que se localiza en el cuerpo del estero es de 180 m.**

6. DISCUSIÓN

La jerarquización de las variables obtenida con el ACP, mostró claramente tres grupos de parámetros los cuales en conjunto explican el comportamiento del meandro en el río Los Izotes. El primer grupo formado por las características morfológicas del río. El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el área de la cuenca y el tercero formado por las características morfológicas y geométricas del río. La utilización de las condiciones máximas y mínimas que ha presentado el meandro del río históricamente, arrojan un panorama adecuado para comenzar la estimación de la zona de posibles daños. De esta forma, el cálculo de los límites de confianza aunque de una manera estadística, constituye una buena herramienta para consolidar los argumentos que definen las zonas de riesgo potencial de ser afectadas por el meandro del río Los Izotes. Como se muestra en la siguiente figura, la sobre-posición de las condiciones simuladas con la teoría del meandro de ríos, arroja un **ancho necesario de 148.68 metros de ancho libre para que el estero funcione hidráulicamente óptimo**, que exista un caudal dominante que permita la vida en el estero y el almacenamiento o regulación temporal necesario para que los ríos Los Izotes y Las Calabazas, no provoque inundaciones en las zonas bajas de la cuenca. Claramente, se puede dictaminar que la obra que se construyó y obstruye

la zona del estero de San Pancho, representa una clara afectación a los componentes funciones de este sistema. Cualquier obra que se construya en el estero, podrá en riesgo el flujo normal del río y constituye un riesgo potencial para la sedimentación del cuerpo de agua, con la inminente muerte del estero y del valor ambiental que éste representa en la zona. De no detener esta obra, el daño será irreversible ya que al entrar en el periodo de secas, los ecosistemas perdidos y la dinámica fluvial del río se perderán. Adicionalmente, se está poniendo en riesgo a la población aldeaña pues una obstrucción en la desembocadura de dos ríos representa un peligro potencial.

7. CONCLUSIONES

Los ríos son componentes funcionales que captan de forma natural las aguas que drena una cuenca; normalmente, las aguas presentan un régimen a superficie libre, hasta su eventual desembocadura en el mar. Es importante considerar que la intervención del hombre sobre los ríos, puede alterar las condiciones naturales de escurrimiento. Sin embargo, en todo momento se debe considerar que el río, al ser parte del medio ambiente, se relaciona con el mismo y conforma a su alrededor un ecosistema húmedo, apropiado para la vida vegetal y animal. Asimismo, un río mantiene un flujo constante de agua y sedimento (procedente del cauce o de la cuenca). De esta forma se concluye que los ríos como componentes funcionales para desalojar las aguas que escurren naturalmente y toda obstrucción provocarán efectos en la dinámica fluvial del entorno. Toda intervención humana requiere de estudios muy detallados y especializados e incluso de campañas de medición en campo para conocer las posibles obras a construir y de qué forma se verá afectado el entorno hidrológico, fluvial, biológico y natural. Asimismo, la calidad del agua en esa zona se verá afectada provocando daños asociados a su aprovechamiento. Finalmente, los riesgos a desastres aumentan, ya que la vulnerabilidad de la zona se incrementa al construir una obstrucción en el cauce sin un estudio hidráulico previo. En este estudio se consideró la sinuosidad del río como una variante de la formulación de Kinoshita y los resultados obtenidos empleando cuatro pares de senos y cosenos más un término independiente, permitieron obtener un ancho mínimo que garantice el funcionamiento óptimo del estero. Si bien la formulación expuesta no presenta componentes cinemáticos del comportamiento del meandro, si es una buena aproximación de la evolución de la sinuosidad del conjunto estero SP-Izotes-Calabazas. Tampoco se utilizaron parámetros que involucren el transporte de sedimentos, pero el desarrollo presentado permite incorporar variables relacionadas con este fenómeno. La modelación bidimensional con la ayuda del programa Iber, permitió conocer las zonas de inundación así como obtener los tirantes de agua generados en una

avenida asociada al periodo de retorno de 100 años. Para la simulación de inundación del estero San Pancho. Por lo que se concluye que los anchos mínimos a respetar en el conjunto estero SP-Izotes-Calabazas deben ser entre 150 y 250 metros libres, los cuales corresponden a la simulación fluvial e hidráulica. Finalmente, como recomendación general se puede decir que dado que el estero tiene una vital función en la descarga de los escurrimientos de la cuenca, es importante mencionar que dicho estero debe conservarse desde punto de vista hidrológico e hidráulico así como evitar la invasión urbana de la zona de inundación determinada en este análisis además de tomar en cuenta la franja de inundación generada en los ríos Los Izotes y Las Calabazas a fin de delimitar las zonas con probabilidad de inundación y evitar daños a la población que se encuentra cercana a los ríos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J. D. y García, M. H. (2004). Conceptual and Mathematical Model for Evolution of Meandering Rivers in Naturalization Processes. *ASCE World Water & Environmental Resources Congress, Salt Lake City, Utah, USA*.
- Abad, J. D. y García, M. H. (2006). RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computers & Geosciences* (32) 92–101.
- Beck, S. M. (1988). *Computer-simulated deformation of meandering river patterns*. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Bladé E, et al. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Monograph CIMNE N°97. Barcelona, España.
- Donald, H.B., 1988 Delineation of groups for regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, Number 104, 345-361 pp.
- Everitt, B.S., 1978 Graphical techniques for multivariate data, Great Britain, North-Holland, 117 p.
- Gutierrez-Lopez, A., Contreras, V., Ramirez, A. I., y Mejia, R. (2014). Risk Zone Prediction in Meandering Rivers by Using a Multivariate Approach. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 19(9).
- Hooke, J. M. 1984. Changes in river meanders: a review of techniques and results of analyses. *Prog. Phys. Geog.* 8: 473-508.
- Kinoshita, R. 1961. Investigation of channel deformation in Ishikari River. *Report to the Bureau of Resources*: 1-174.

-
- Kinoshita, R. y Miwa, H. (1974). River channel formation which prevents downstream translation of transverse bars. *ShinSabo*, 94: 12-17.
- Lagasse, P. F., Spitz, W. J., Zevenbergen, L. W., y Zachmann, D. W. (2004). *Handbook for predicting stream meander migration. Report 533*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 105 pp.
- Langbein, W. B. y Leopold, L. B. 1966. River meanders, a theory of minimum variance. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-H, 15.
- MacDonald, T. E., Parker, G., y Leuthe, D. 1992. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. *Technical report., Department of Civil Engineering, University of Minnesota*, Minneapolis, Minnesota, USA, 38 pp.
- MacDonald, T.E., 1991. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, 152pp.
- Mueller, J. E. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the American Geographers*, 58 (2): 371-385.
- Nathan, J., y McMahon, T., 1990 Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *Journal of Hidrology*, Number 121, 217-238 pp.
- Parker, G. y Andrews, E. D. 1986. On the time development of meanders bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 162: 139-156.
- Parker, G., Diplas, P., y Akiyama, J. 1983. Meander bends on high amplitude. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (10).
- Wiltshire, S., y Beran, M., 1987 Multivariate techniques for the identification of homegeneous flood frequency regions, *Regional flood frequency analysis*, 133-145 pp.
- Yamaoka, I. y Hasegawa, K. 1984. Effects of bends and alternate bars on meander evolution. *In River Meandering, Proceedings of the Conference, Rivers '83*, edited by C. M. Elliot, pp: 783-793, ASCE, New York.

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

Balocchi, Francisco

University of Arizona, USA

Emmanuel, Evens

Universidad de Quisqueya, Haití

Fossati, Monica

Universidad de la República, Uruguay

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Cuba

Pochat, Victor

Gestión Integrada de Recursos Hídricos, UNESCO, Argentina

Matias Peredo

Universidad de Santiago de Chile, Chile

Maria Antonieta Gómez Balandra

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Koen Verbist

Responsable del Proyecto MWAR-LAC. UNESCO- Gobierno de Flandes

Jorge Nuñez

Universidad de La Serena, Chile

Claudia Natenzon

Universidad de Buenos Aires, Argentina

Virginia Garcia Costa

Profesora-investigadora del CIESAS, México

Christian Chreties

Universidad de la República, Uruguay

Carlos Ubaldo Paoli

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Felipe Pérez

Dirección General de Aguas , Chile

Pablo Spalletti

Instituto Nacional del Agua , Argentina

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

