



# Tecnología y Ciencias <sup>del</sup> Agua

ISSN 2007-2422





# Tecnología y Ciencias del Agua

## Comité Editorial

### Consejo Editorial

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés  
*Director General del  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

**Editor en Jefe**  
Dr. Nahún Hamed García Villanueva  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

**Editor en Agua y Energía**  
Dr. Humberto Marengo Mogollón  
*Comisión Federal de Electricidad*

**Editora en Calidad del Agua**  
Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros  
*Organización de las Naciones Unidas para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura*

**Editor en Ciencias Hidrográficas**  
Dr. Óscar L. Palacios Vélez  
*Colegio de Postgraduados, México*

**Editora en Ciencias Políticas y Sociales**  
Dra. Jacinta Palerm Viqueira  
*Colegio de Postgraduados, México*

**Editor en Gestión del Agua**  
Dr. Carlos Fernández-Jáuregui  
*Water Assessment and Advisory-Global Network  
(WASA-GN)*

**Editor en Hidráulica**  
Dr. Felipe I. Arreguín Cortés  
*Comisión Nacional del Agua*

**Editor en Hidrología**  
Dr. Fco. Javier Aparicio Mijares  
*Consultor*

**Editor en Innovación Científica y Tecnológica**  
Dr. Polioptro F. Martínez Austria  
*Universidad de las Américas, Puebla*

**Secretario Técnico**  
M.C. Jorge Arturo Hidalgo Toledo  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

**Coordinación editorial y cuidado de edición:** Helena Rivas López • **Asistencia editorial y diagramación editorial:** Luisa Guadalupe Ramírez Martínez • **Diseño de figuras:** Luisa Guadalupe Ramírez Martínez y Rosario Castro Rivera • **Corrección de textos en inglés:** Ellen Sue Weiss • **Coordinación del proceso de arbitraje:** Elizabeth Peña Montiel • **Seguimiento del proceso de arbitraje:** Elizabeth Peña Montiel y Bibiana Bahena Carvajal • **Diseño de logotipo y portada:** Oscar Alonso Barrón • **Diseño del formato:** Gema Alín Martínez Ocampo • **Comercialización:** Marco Antonio Bonilla Rincón.

• **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Alcides Juan León Méndez**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Alejandro López Alvarado**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile • **Dra. Alma Chávez Mejía**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez**, consultor, México • **Dr. Andrei S. Jouravlev**, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile • **Dr. Andrés Rodríguez**, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina • **Dra. Anne Margrethe Hansen Hansen**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Ariosto Aguilar Chávez**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Armando Guevara Gil**, Pontificia Universidad Católica, Perú • **Dr. Arturo Marciano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dra. Aziza Akhouch**, Organisation for Economic Cooperation and Development, Francia • **Dr. Carlos Sanchis Ibor**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Carlos Chairez Araiza**, consultor, México • **Dr. Carlos Cruickshank Villanueva**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Carlos Díaz Delgado**, Universidad Autónoma del Estado de México • **Dr. Carlos E. Puente**, University of California, Estados Unidos • **Dr. Cleverson Vitorio Andreoli**, Centro Universitário Unifae, Brasil • **Dr. Daene C. McKinney**, University of Texas at Austin, Estados Unidos • **Dr. Daniel Murillo Licea**, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México • **Dr. Eduardo A. Varas Castellón**, Pontificia Universidad Católica, Chile • **Dr. Emmanuel Galindo Escamilla**, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México • **Dr. Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Enrique Playán Jubillar**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España • **Dr. Eric Rendón Schneir**, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú • **Dr. Erick R. Bandalá**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Dr. Ernesto José González Rivas**, Universidad Central de Venezuela • **Dr. Federico Estrada**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Dr. Fedro Zazueta Ranahan**, University of Florida, Estados Unidos • **Dr. Gerardo Buelna**, Centre de Recherche Industrielle Québec, Canadá • **Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México • **Dr. Gueorguiev Tzatchkov Velitchko**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Ing. Héctor Garduño Velasco**, consultor, México • **M.I. Horacio Rubio Gutiérrez**, Comisión Nacional del Agua, México • **Dr. Ismael Aguilar Barajas**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Ismael Mariño Tapia**, Instituto Politécnico Nacional, México • **Dr. Ismael Piedra Cueva**, Universidad de la República, Uruguay • **Dr. Iván Obando Camino**, Universidad de Talca, Chile • **Dr. Jaime Iván Ordóñez Ordóñez**, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia • **Dr. Joaquín Rodríguez Chaparro**, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, España • **Dr. José Ángel Raynal Villaseñor**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Dr. José D. Salas**, University of Colorado, Estados Unidos • **Dr. José Joel Carrillo Rivera**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. José Luis Pimentel Equihua**, Colegio de Postgraduados, México • **José María Gómez Espín**, Universidad de Murcia, España • **M.C. Juan Andrés Martínez Álvarez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Juan B. Valdes**, The University of Arizona, Estados Unidos • **Dr. Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Dr. Julio Kuroiwa Horiuchi**, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú • **Dr. Karim Acuña Askar**, Universidad Autónoma de Nuevo León, México • **Dra. Luciana Coutinho**, Universidade Do Minho, Portugal • **Dr. Luis F. León Vizcaíno**, Waterloo University, Canadá • **Dr. Luis Texeira**, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Dra. Luisa Paré Ouellet**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Manuel Contijoch Escontria**, SAGARPA, México • **Dr. Marcos von Sperling**, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil • **Dra. María Claudia Campos Pinilla**, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia • **Dra. María Luisa Torregrosa Armentia**, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México • **Dra. María Rafaela de Saldanha Matos**, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal • **Dra. María Teresa Oré**, Pontificia Universidad Católica del Perú • **Dra. María Victoria Vélez Otálvaro**, Universidad Nacional de Colombia • **M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Michel M. Rosengaus Moshinsky**, consultor, México • **Dr. Miguel A. Medina**, Duke University, Estados Unidos • **Dr. Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Omar A. Miranda**, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina • **Dra. Natalia Uribe Pando**, Water Lex, Suiza • **Dr. Óscar F. Ibáñez Hernández**, consultor, México • **Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Rafael Val Segura**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Rafael Pardo Gómez**, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba • **Dr. Ramón Domínguez Mora**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Ramón Fuentes Aguilar**, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Chile • **Dr. Ramón Ma. Gutiérrez Serret**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Ing. Raquel Duque**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Colombia • **Dr. Raúl Antonio Lopardo**, Instituto Nacional del Agua, Argentina • **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Simón González Martínez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Tomás Martínez Saldaña**, Colegio de Postgraduados, México • **Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dra. Ximena Vargas Mesa**, Universidad de Chile •

©TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA, vol. VI, núm. 4, julio-agosto de 2015, es una publicación bimestral editada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, teléfono +52 (777) 3 29 36 00, extensión 474, www.imta.gob.mx/tyca, fsalinas@tialoc.imta.mx. Editor responsable, Nahún Hamed García Villanueva; Reserva de Derecho al Uso Exclusivo No. 04-2011-083111404500-203 e ISSN 2007-2422, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Subcoordinación de Difusión y Divulgación, Lic. Francisco José Salinas Estrada, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. Fecha de la última modificación, 31 de agosto de 2015.

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores y no necesariamente refleja la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Tecnología y Ciencias del Agua constituye la continuidad de las revistas *Irrigación en México* (1930-1946); *Ingeniería hidráulica en México* (1947-1971); *Recursos hidráulicos* (1972-1978), e *Ingeniería hidráulica en México*, segunda época (1985-2009); *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México* (2010-2011).



Para comentarios a la Coordinación Editorial, dé clic aquí



Para suscripciones, dé clic aquí



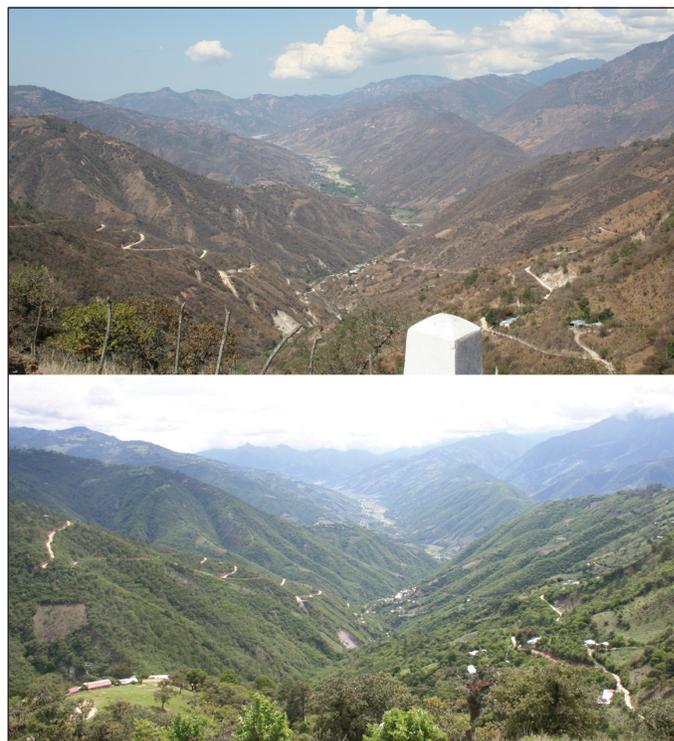
# Tecnología y Ciencias del Agua

Vol. VI, núm. 4, julio-agosto de 2015

**Portada:** Motozintla de Mendoza y Mazapa de Madero, Chiapas, México. Vistas desde la frontera con Guatemala. Contraste de la época seca con la lluviosa, cuencas de los ríos Bacantón y Xelajú, tributarios del río Grijalva.

Estudios realizados en la cuenca media y baja del río Grijalva confirman la presencia de metales pesados tanto en las aguas como en los sedimentos de ríos y lagos que conforman la cuenca, así como en la desembocadura de este río en el Golfo de México. Sin embargo, existen muy pocas investigaciones sobre la presencia de metales en la parte alta de la cuenca, lo cual es relevante para comprender el origen de dichos contaminantes y su dinámica a lo largo de toda la cuenca. Ver el artículo "Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala" de Laino-Guanes *et al.* (pp. 61-74).

**Foto:** Karim Musálem Castillejos.





Oasis de La Purísima, ubicado dentro de la zona norte del municipio de Comondú, Baja California Sur, México. Oasis que da vida a vastos palmares, árboles frutales y desde donde se aprecia el cerro "El Pilon" monumento natural con una altura de 400 metros. El oasis lleva el nombre de La Purísima, debido a que los padres jesuitas observaron la imagen abstracta de la virgen María que en el siglo XVIII.

Foto: Javier A. Arce Meza.

## Artículos técnicos

## Pronóstico de caudales con Filtro de Kalman Discreto en el río Turbio

Fernando González-Leiva  
Laura Alicia Ibáñez-Castillo  
Juan B. Valdés  
Mario Alberto Vázquez-Peña  
Agustín Ruiz-García

## Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información

Oswaldo Ortiz-Vera

## Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológico

Iván Vilchis-Mata  
Khalidou M. Bâ  
Roberto Franco-Plata  
Carlos Díaz-Delgado

## Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala

Rafaela María Laino-Guanes  
Ricardo Bello-Mendoza  
Mario González-Espinosa  
Neptalí Ramírez-Marcial  
Francisco Jiménez-Otárola  
Karim Musálem-Castillejos

## Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango

Palmira Bueno-Hurtado  
Armando López-Santos  
Ignacio Sánchez-Cohen  
Miguel Agustín Velásquez-Valle  
José Luis González-Barrios

## Elasticidad-precio de corto y largo plazo de la demanda de agua residencial de una zona árida. Caso de estudio: La Paz, B.C.S., México

Gerzaín Avilés-Polanco  
Marco A. Almendarez-Hernández  
Víctor Hernández-Trejo  
Luis Felipe Beltrán-Morales

## Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México

Juan Gabriel Brigido  
Iouri Nikolskii  
Liliana Terrazas  
Sergio Santiago Herrera

## Technical articles

*Streamflow Forecasting for the Turbio River using the Discrete Kalman Filter* 5

Fernando González-Leiva  
Laura Alicia Ibáñez-Castillo  
Juan B. Valdés  
Mario Alberto Vázquez-Peña  
Agustín Ruiz-García

*Hydraulic Similarities among the High Andean Hydrological Systems and Transfer of Hydrometeorological* 25

Oswaldo Ortiz-Vera

*Hydrological Modeling based on Rainfall Estimates using Hydrometeorological Sensors* 45

Iván Vilchis-Mata  
Khalidou M. Bâ  
Roberto Franco-Plata  
Carlos Díaz-Delgado

*Metal Concentrations in Water and Sediments in the Upper Grijalva River Basin, Mexico-Guatemala border* 61

Rafaela María Laino-Guanes  
Ricardo Bello-Mendoza  
Mario González-Espinosa  
Neptalí Ramírez-Marcial  
Francisco Jiménez-Otárola  
Karim Musálem-Castillejos

*Land Use Changes and their Effects on GHG Dynamics in the State of Durango* 75

Palmira Bueno-Hurtado  
Armando López-Santos  
Ignacio Sánchez-Cohen  
Miguel Agustín Velásquez-Valle  
José Luis González-Barrios

*Short-and Long-Term Price Elasticity of Residential Water Demand in an Arid Region. Case Study of La Paz, BCS, Mexico* 85

Gerzaín Avilés-Polanco  
Marco A. Almendarez-Hernández  
Víctor Hernández-Trejo  
Luis Felipe Beltrán-Morales

*Estimate of the Impact of Climate Change on Soil Fertility and Coffee Production in Veracruz, Mexico* 101

Juan Gabriel Brigido  
Iouri Nikolskii  
Liliana Terrazas  
Sergio Santiago Herrera

Validación del modelo ClimGen en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos <i>Gerardo Esquivel</i> <i>Julián Cerano</i> <i>Ignacio Sánchez</i> <i>Armando López</i> <i>Oscar G. Gutiérrez</i>	<i>Validation of the ClimGen Model to Estimate Climate Variables when Lacking Data for Modeling Processes</i> Gerardo Esquivel Julián Cerano Ignacio Sánchez Armando López Oscar G. Gutiérrez	117
Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo <i>Fidencio Cruz-Bautista</i> <i>Alejandro Zermeño-González</i> <i>Vicente Álvarez-Reyna</i> <i>Pedro Cano-Ríos</i> <i>Miguel Rivera-González</i> <i>Mario Siller-González</i>	<i>Modeling to Estimate the Dimensions of the Wet Bulb in Trickle Irrigation</i> Fidencio Cruz-Bautista Alejandro Zermeño-González Vicente Álvarez-Reyna Pedro Cano-Ríos Miguel Rivera-González Mario Siller-González	131
Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional <i>Mauro Iñiguez-Covarrubias</i> <i>Jorge Flores-Velazquez</i> <i>Waldo Ojeda-Bustamante</i> <i>Carlos Díaz-Delgado</i> <i>Roberto Mercado-Escalante</i>	<i>Comparison of Venturi Tube-Meter Experimental Data with Computational Fluid Dynamics Simulations</i> Mauro Iñiguez-Covarrubias Jorge Flores-Velazquez Waldo Ojeda-Bustamante Carlos Díaz-Delgado Roberto Mercado-Escalante	141
<b>Notas técnicas</b>	<i>Technical notes</i>	
Ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG con momentos $L$ depurados (1,0) <i>Daniel Francisco Campos-Aranda</i>	<i>Fitting of GPA, GLO and GEV Distributions with Trimmed L-moments (1,0)</i> Daniel Francisco Campos-Aranda	153
Discusión	<i>Discussion</i>	169
Guía para colaboradores	<i>Contributor's guide</i>	171

# Pronóstico de caudales con Filtro de Kalman Discreto en el río Turbio

• Fernando González-Leiva • Laura Alicia Ibáñez-Castillo\* •  
*Universidad Autónoma Chapingo, México*

\*Autor de correspondencia

• Juan B. Valdés •  
*The University of Arizona at Tucson, USA*

• Mario Alberto Vázquez-Peña • Agustín Ruiz-García •  
*Universidad Autónoma Chapingo, México*

## Resumen

González-Leiva, F., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Vázquez-Peña, M. A., & Ruiz-García, A. (julio-agosto, 2015). Pronóstico de caudales con Filtro de Kalman Discreto en el río Turbio. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 5-24.

Se propuso la implementación del algoritmo del Filtro de Kalman Discreto (DKF) junto con un modelo autorregresivo con entrada exógena (ARX) para realizar el pronóstico de caudales a corto plazo con 24, 48, 72 y 96 horas de anticipación en la cuenca del río Turbio, localizada en el estado de Guanajuato y parte del estado de Jalisco, México, vulnerable a inundaciones durante los periodos de lluvias que se presentan normalmente en la zona. La información de precipitación y caudal disponible con las que se realizaron los pronósticos corresponde a las series de los años 2003 y 2004. Los resultados obtenidos indican que los pronósticos realizados un paso hacia adelante, es decir, con un tiempo de 24 horas de anticipación, presentaron los mejores ajustes en términos de Nash-Sutcliffe, MSE y RMSE, que los pronósticos realizados a 48, 72 y 96 horas de anticipación.

**Palabras clave:** Filtro de Kalman, modelos autorregresivos, pronósticos de caudales a corto plazo.

## Abstract

González-Leiva, F., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Vázquez-Peña, M. A., & Ruiz-García, A. (July-August, 2015). Streamflow Forecasting for the Turbio River using the Discrete Kalman Filter. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 5-24.

This paper proposes the use of the discreet Kalman filter (DKF) along with an autoregressive model with exogenous inputs (ARX) for short-term streamflow forecasting with lead times of 24, 48, 72 and 96 hours. This model was applied to the Turbio River basin, located in the state of Guanajuato and a portion of the state of Jalisco, Mexico. This area is vulnerable to flooding during rainy periods which normally occur in the region. The forecasting was based on available precipitation and streamflow data from the years 2003 and 2004. The results indicate that the forecasts performed with one-step ahead, that is with a 24-hour lead time, present better fits than 48, 72 and 96-hour lead times in terms of Nash-Sutcliffe, MSE and RMSE.

**Keywords:** Kalman filter, autoregressive models, short-term streamflow forecasting.

Recibido: 10/09/2014

Aceptado: 29/04/2015

## Introducción

Como consecuencia de la variabilidad del clima (IPCC, 2007; Mendoza *et al.*, 2009; Montero-Martínez, Ojeda-Bustamante, Santana-Sepúlveda, Prieto-González, & Lobato-Sánchez, 2013) y de su previsible influencia en la magnitud de la gravedad, la frecuencia y el impacto de las avenidas y sequías, durante los últimos años ha aumentado la importancia de las predicciones

como estimaciones de los estados futuros de un fenómeno hidrológico. Dichas predicciones son esenciales para el funcionamiento eficaz de la infraestructura hídrica y para la atenuación de desastres naturales provocados según las condiciones ambientales (WMO, 2009).

De acuerdo con Valdés, Mejía-Velázquez, & Rodríguez-Iturbe (1980), en la predicción de caudales se puede postular una relación causal entre la precipitación en varios puntos de la

cuenca, a diferentes instantes de tiempo y un caudal medio en un punto de salida para un día determinado. Esta relación causal, denominada función de respuesta, puede ser representada como un modelo de caja negra. Los modelos autorregresivos han sido ampliamente usados en la hidrología y los recursos hídricos desde inicios de la década de 1960 para la modelación anual y periódica en series de tiempo de tipo hidrológico.

La aplicación de estos modelos ha sido atractiva en la hidrología; en especial, la forma autorregresiva tiene dependencia del tiempo y por la facilidad para ser usados (Salas, Delleur, Yevjevich, & Lane, 1980; Box, Jenkins, & Reinsel, 2013). En los últimos años, el algoritmo del Filtro de Kalman se ha propuesto para realizar el pronóstico de caudales en los sistemas hidrológicos, operado junto con modelos matemáticos de lluvia- escurrimiento en cuencas hidrográficas (Moradkhani, Sorooshian, Gupta, & Houser, 2005; Xie & Zhang, 2010; Lü et al., 2013; Morales-Velázquez, Aparicio, & Valdés, 2014; Abaza, Anctil, Fortin, & Turcotte, 2014), haciendo énfasis en la estimación óptima de los parámetros de estado de los modelos utilizados mediante la técnica conocida como asimilación de datos (Moradkhani, DeChant, & Sorooshian, 2012; Liu et al., 2012; Shi, Davis, Zhang, Duffy, & Yu, 2014; Samuel, Coulibaly, Dumedah, & Moradkhani, 2014; Liu, et al., 2015; Yucel, Onen, Yilmaz, & Gochis, 2015; Li, Ryu, Western, & Wang, 2015). Sin embargo, para usar estos modelos se requieren series continuas y completas de caudales, algo que podrían no tener países en desarrollo, como México. Según Perevochtchikova (2013), en las bases de datos a nivel climatológico, CLICOM, y de aguas superficiales, BANDAS, que posee México, existe una problemática recurrente: poca accesibilidad, marcadas diferencias sectoriales y vacíos en las series de tiempo, lo que deriva en dificultades para su uso en las tareas de comparación y análisis de evolución espacial y temporal, sistematización de datos, y construcción de indicadores y de modelos a escala local.

El Filtro de Kalman Discreto (DKF) fue propuesto por Kalman (1960) como una solución

recursiva por el método de mínimos cuadrados al problema de filtrado lineal de datos discretos. Es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. Este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de una estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente. Por esta razón, si se tiene conocimiento del sistema dinámico, las estadísticas del sistema ruidoso, los errores de medición y las condiciones iniciales, se puede estimar el estado para un sistema dinámico (Gelb, 1974; Simon, 2001; Welch & Bishop, 2006).

El pronóstico de caudales en cuencas hidrográficas forma parte de los procedimientos que permiten tomar decisiones con criterios fundamentados en la planificación del riesgo que busca mitigar los impactos negativos ocasionados por las avenidas en campos específicos de la hidrología, como la regulación de embalses y la emisión de alertas tempranas ante inundaciones en zonas con presencia de población civil. En México, Morales-Velázquez, Aparicio y Valdés (2014) evaluaron la utilidad del algoritmo del Filtro de Kalman Discreto (DKF) en el pronóstico de avenidas, con fines de regular los caudales en la presa Ángel Corbino Corzo o *Peñitas*, perteneciente al sistema hidroeléctrico Grijalva.

En el presente trabajo se propuso la implementación del algoritmo del Filtro de Kalman Discreto (DKF) junto con un modelo autorregresivo con entrada exógena ARX para realizar el pronóstico de caudales a corto plazo, con 24, 48, 72 y 96 horas de anticipación en la cuenca del río Turbio, localizada en el estado de Guanajuato y parte del estado de Jalisco, México, vulnerable a inundaciones durante los periodos de lluvias registradas en la zona.

## Materiales y métodos

### Descripción de la cuenca

La figura 1 muestra la localización y representación de la cuenca del río Turbio, la cual pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-

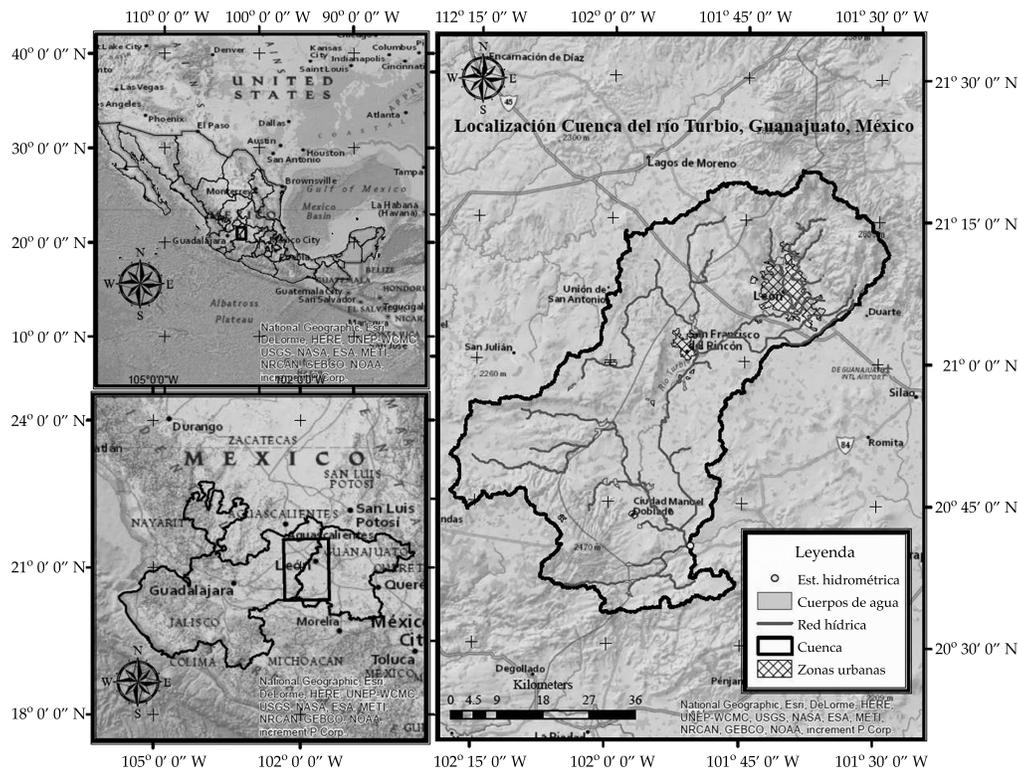


Figura 1. Localización de la cuenca del río Turbio.

Santiago, ubicada en los estados de Guanajuato y Jalisco, entre los  $20^{\circ} 32' 42''$  y los  $21^{\circ} 21' 18''$  de latitud norte, y entre los  $101^{\circ} 27' 82''$  y los  $102^{\circ} 17' 57''$  de longitud oeste. Las principales poblaciones que se encuentran en la cuenca son Ciudad de León, San Francisco del Rincón, Purísima de Bustos y Manuel Doblado. El área total de la cuenca es de  $3\,322\text{ km}^2$  hasta la estación hidrométrica Las Adjuntas, ubicada en los  $20^{\circ} 40' 32''$  de latitud norte y  $101^{\circ} 50' 40''$  de longitud oeste, de los cuales  $58.8\%$  pertenece al estado de Guanajuato y  $41.2\%$  corresponde al estado de Jalisco. El parteaguas de la cuenca tiene su máxima elevación a los  $2\,670\text{ msnm}$  y el punto de salida referenciado por la estación hidrométrica se encuentra a los  $1\,723\text{ msnm}$ . La pendiente media de la cuenca es de  $11\%$ ; el cauce principal tiene un desnivel de  $323\text{ m}$  y la cuenca presenta un tiempo de concentración de  $21\text{ h}$ , respectivamente. La precipitación media

anual es de  $659\text{ mm}$ , según las normales climatológicas para el periodo  $1981-2010$  (SMN, 2014), con un régimen de lluvias que inicia en el mes de junio y termina en octubre, concentrándose en este periodo un  $89\%$  del total de las precipitaciones anuales, caracterizadas por ser intensas y de corta duración.

Las presas más importantes dentro de la zona descrita son El Palote y El Barrial. La primera se encuentra en Ciudad de León y su propósito es agua potable y control de avenidas, con una capacidad máxima de  $17\text{ Mm}^3$ ; la segunda se ubica sobre San Francisco del Rincón, diseñada para el control de avenidas y riego, con una capacidad de  $55.26\text{ Mm}^3$ . Otras presas que se destacan son Santa Efigenia, con capacidad de  $42.75\text{ Mm}^3$ ; Jalpa Vieja, con  $14.38\text{ Mm}^3$ ; Ciénaga de Galvanes, con  $11\text{ Mm}^3$ , y Potrerillos, con  $15\text{ Mm}^3$ ; todas con doble propósito de riego y control de avenidas (Conagua, 2014b).

### Información climatológica

La información de precipitación para alimentar el modelo de pronóstico se obtuvo de la base de datos del CLICOM (SMN, 2014), utilizando las series de los años 2003 y 2004 a nivel diario, por tener el mayor registro de información completa para la cuenca. En el cuadro 1 se muestran un total de 11 estaciones meteorológicas distribuidas sobre toda la superficie de la cuenca del río Turbio.

### Información hidrométrica

Los caudales medios diarios se obtuvieron de la base de datos del Banco Nacional de Aguas Superficiales, BANDAS (Conagua, 2014a), para la serie de los años 2003 y 2004. En el cuadro 2 se resumen los cuantiles para los gastos máximos registrados en la estación hidrométrica Las Adjuntas, según la Comisión Nacional de Agua y reportados por Protección Civil Guanajuato (2012).

### Metodología

Los modelos autorregresivos han sido ampliamente usados en la hidrología y los recursos hídricos desde inicios la década de 1960, para

Cuadro 2. Periodos de retorno para gastos máximos en la estación hidrométrica Las Adjuntas.

Periodo de retorno (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
2	44.35
5	84.60
10	111.24
20	136.8
50	169.88
100	194.67
500	251.96
1 000	276.59

Fuente: Protección Civil Guanajuato (2012).

la modelación anual y periódica en series de tiempo de tipo hidrológico. La aplicación de estos modelos ha sido atractiva en la hidrología, principalmente porque la forma autorregresiva tiene dependencia del tiempo y por la facilidad para su implementación (Salas *et al.*, 1980; Box *et al.*, 2013).

Se propuso la creación de un modelo autorregresivo con entrada exógena ARX para predecir los caudales medios con base en los registros de series pasadas, obtenidos a partir de la base de datos BANDAS (Conagua, 2014a) para la estación hidrométrica Las Adjuntas. El modelo ARX relaciona las entradas con las salidas del sistema mediante una ecuación lineal

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Turbio.

Código estación	Nombre	Municipio	Estado	Dependencia
11020	El Palote	León	Guanajuato	SMN
11025	Hacienda de Arriba	León	Guanajuato	SMN/CEAG
11035	La Sandía	León	Guanajuato	SMN
11036	Adjuntas	Manuel Doblado	Guanajuato	SMN/CEAG
11045	Media Luna	León	Guanajuato	SMN
11153	La Laborcita	León	Guanajuato	SMN
11157	San Francisco del Rincón	Peñuelas	Guanajuato	SMN
11159	San Francisco del Rincón	Presas el Barrial	Guanajuato	SMN
14123	San Diego Alejandría	San Diego Alejandría	Jalisco	SMN
14157	Unión de San Antonio	Unión de San Antonio	Jalisco	SMN
14369	La Vaquera	Arandas	Jalisco	SMN

Fuente: SMN (2014).

en diferencias con coeficientes constantes (Hsu, Moradkhani, & Sorooshian, 2009):

$$y_{t+1} = \sum_{i=0}^{na} \alpha_i y_{t-i} + \sum_{j=0}^{nb} \beta_j r_{t-j} + e_{t+1} \quad (1)$$

Donde  $y_t$  y  $r_t$  son el caudal observado y la lluvia en el tiempo  $t$ , el cual representa un día;  $e_{t+1}$  es el término de error en la estimación del caudal;  $\alpha_i$  y  $\beta_j$  son parámetros, respectivamente. Los índices  $na$  y  $nb$  especifican el número de observaciones previas de caudales y lluvias. Es lo que sería un modelo autorregresivo ARX ( $na$ ,  $nb$ ).

Conocida la estructura general del modelo ARX, la formulación en espacio de estados se convierte en una herramienta útil para utilizar el Filtro de Kalman en cualquiera de sus versiones. La ecuación (1) puede representarse en forma de espacio de estados como sigue:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (2)$$

$$z_k = Hx_k + v_k$$

donde  $x_{k+1}$  es el caudal presente (no observado) de tamaño ( $n \times 1$ );  $A$  es la matriz de parámetros  $\alpha_i$  de tamaño ( $n \times n$ );  $x_k$  el caudal en el tiempo  $k$  de tamaño ( $n \times 1$ );  $B$ , la matriz de parámetros exógenos  $\beta_j$  de tamaño ( $n \times m$ );  $u_k$  representa el vector que contiene la precipitación media registrada en la cuenca para el tiempo  $k$  de tamaño ( $m \times 1$ );  $z_k$  el caudal medido en el tiempo  $k$  de tamaño ( $m \times 1$ );  $H$ , la matriz de transformación que mapea el vector de estados al dominio de la medición con dimensiones ( $m \times n$ );  $w_k$  y  $v_k$  son vectores que representan el ruido gaussiano en el proceso y el ruido en la medición para cada observación con tamaños ( $m \times 1$ ), de tal manera que:

$$w_k \sim N(0, Q) \quad (3)$$

$$v_k \sim N(0, R)$$

Para el caso específico de la matriz  $R$  de covarianza de la perturbación de la medición,

ésta se definió de acuerdo con lo reportado por Morales-Velázquez *et al.*, 2014. La matriz fue representada como  $\alpha^* q_{(k-1)}$  donde  $\alpha$  es una constante de proporcionalidad que representa un error constante e igual a una fracción del caudal en el tiempo anterior ( $k - 1$ ). El valor de  $\alpha$  en todos los casos tuvo un 5% con respecto al caudal inmediatamente anterior; ese 5% es el error que se cree comete la persona que mide los caudales, es decir, el aforador. De acuerdo con la formulación de la ecuación (2), la dinámica de un sistema permite una representación más sencilla, proporcionando descripciones estadísticas del comportamiento del sistema (Gelb, 1974).

Los modelos en espacio de estados son esencialmente una notación conveniente para abordar el manejo de un amplio rango de modelos de series de tiempo. En la estimación y control de problemas, esta metodología se basa en modelos estocásticos, dado el supuesto de la naturaleza errónea de las mediciones (Ramírez, 2003).

Finalmente, se puede observar que el sistema representado en la ecuación (2) consiste de un componente determinístico y un componente estocástico que reflejan incertidumbre en el modelo (Lee & Singh, 1998).

De la ecuación (3),  $Q$  y  $R$  pueden cambiar en el tiempo, pero por lo general se suponen constantes por simplicidad (Simon, 2001) y sus valores esperados se pueden representar como se sigue:

$$\begin{aligned} Q &= E[w_k w_k^T] \\ R &= E[v_k v_k^T] \end{aligned} \quad (4)$$

De esta forma, el modelo ARX se representa en espacio de estados, facilitando la aplicación del Filtro de Kalman para obtener los pronósticos de caudal en el tiempo ( $k + 1$ ) a partir de la serie de caudales registrada en el tiempo ( $k$ ), incluyendo la precipitación media diaria en la cuenca como el componente de entrada exógeno al modelo y siguiendo el esquema del algoritmo representado en la figura 2 mediante estimadores de estados (Kim, 2011).

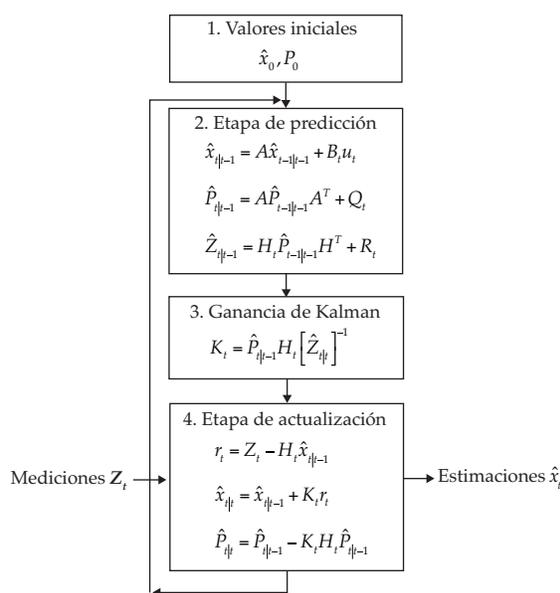


Figura 2. Algoritmo para el Filtro de Kalman Discreto.  
Fuente: Kim (2011).

Para crear el modelo ARX se programó una rutina en Matlab®, utilizando el *toolbox* de identificación de sistemas para obtener el orden del proceso autorregresivo según el número de términos representados en la ecuación (1).

Teniendo en cuenta que los parámetros estimados por el modelo ARX pueden variar en función de las épocas de mayor precipitación y/o de las variaciones abruptas en los caudales, se estableció un periodo ( $P$ ) a modo de calibración (“warming up”) para estimar los parámetros e iniciar el pronóstico de caudales en el tiempo ( $t_0 + P$ ).

Una vez definida la longitud del periodo, los pronósticos se realizaron desde ( $t_0 + P$ ) hasta el tiempo ( $t_0 + 2P$ ), recalculando los parámetros del modelo ARX para el periodo ( $2P$ ), iniciando de nuevo el pronóstico ahora desde ( $t_0 + 2P$ ) hasta ( $t_0 + 3P$ ) y así de modo sucesivo, tal como se describe en la figura 3. De esta manera, la implementación del ARX+DKF se hizo dinámica y con matrices de estado, que fueron variando en cada periodo definido, disminuyendo el ruido generado en el proceso representado como  $w_k$  en la ecuación (2).

Con el propósito de encontrar diferencias entre los pronósticos para  $L$  pasos hacia adelante, es decir, con 24, 48, 72 y 96 horas de anticipación, fue ejecutada una rutina en Matlab® que utilizó información del estado en el tiempo ( $k$ ) para avanzar, sin actualizar  $L$  pasos en la línea de tiempo. Una vez llegada a la posición  $L$  deseada, se realizó la actualización del primer estado pronosticado, como se describe en la figura 4. El ciclo se realizó teniendo en cuenta los periodos de calibración de modelo ARX descritos en la figura 3.

Para evaluar el ajuste de los pronósticos realizados con respecto a los datos medidos se calcularon las principales estadísticas según Gupta, Kling, Yilmanz y Martínez (2009) para la metodología descrita anteriormente. El error cuadrático medio MSE (Mood, Graybill, & Boes, 1974) y su normalización relacionada, y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) fueron los dos criterios a tener en cuenta, por ser los más utilizados para la calibración y evaluación de modelos hidrológicos con los datos observados.

Además se determinó un intervalo de predicción al 95% de probabilidad para cada serie pronosticada según Chatfield (2004). Con el objetivo de comprobar los supuestos de la teoría general del Filtro de Kalman, se realizaron ajustes a funciones de distribución de probabilidad para los errores  $e_k = x_k - \hat{x}_k$  provenientes de las series evaluadas.

## Resultados y discusión

El modelo ARX que presentó un mejor ajuste para los años 2003 y 2004 fue aquel de un orden autorregresivo de 2 para caudales ( $na = 2$ ) y de 1 para precipitación ( $nb = 1$ ); dichos ajustes se muestran en los cuadros 3 y 4, respectivamente. Se puede observar en ambos cuadros que el modelo mencionado presenta un mejor ajuste, considerando los coeficientes de Nash-Sutcliffe, en especial para pronóstico en 24 horas que, como se verá más adelante, ese pronóstico de

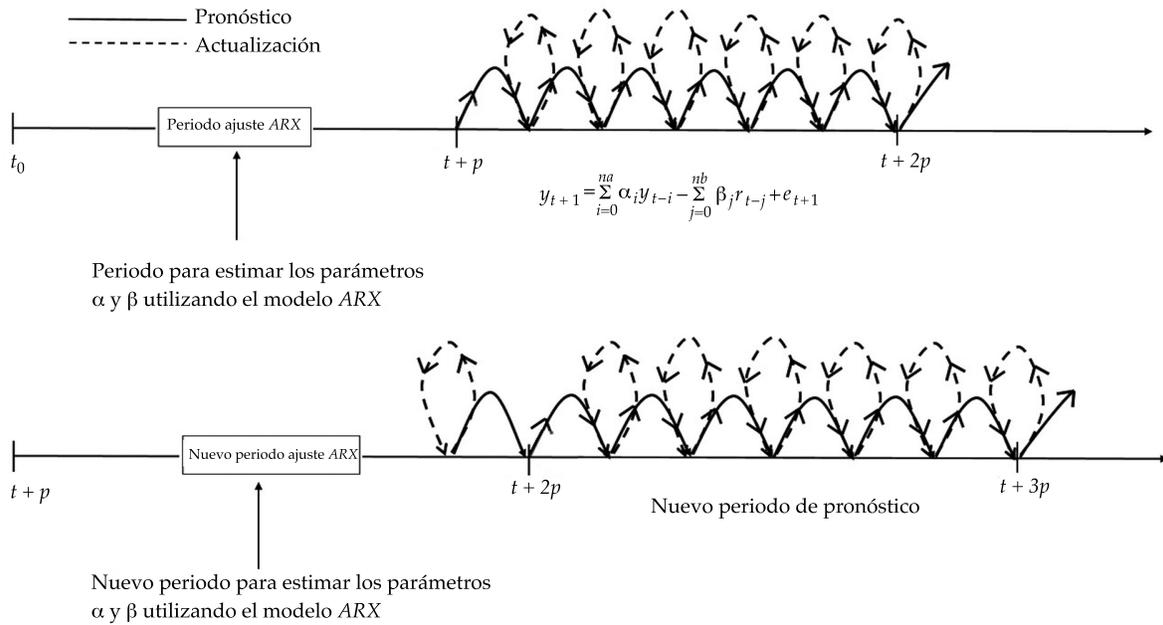


Figura 3. Descripción del proceso de pronóstico de caudales con base en periodos de estimación de parámetros para el modelo ARX + DKF.

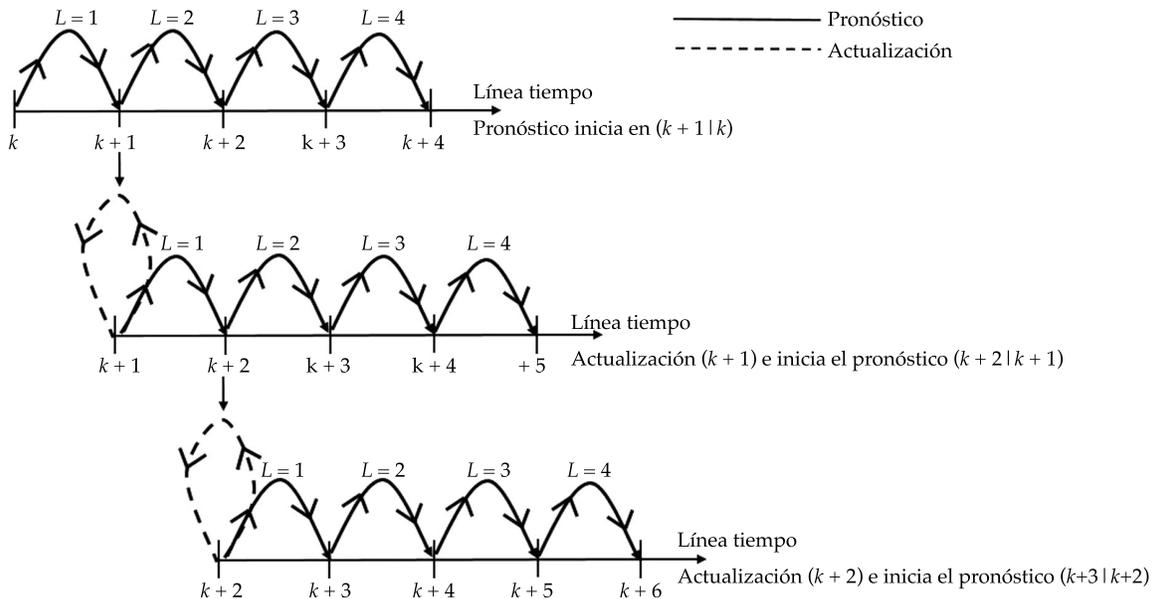


Figura 4. Descripción del pronóstico de caudales con  $L$  pasos hacia adelante luego del periodo de calibración.

24 horas es el que exhibe un mejor ajuste en el Filtro de Kalman Discreto. Asimismo, siempre es deseable que el modelo no sólo presente el

mejor ajuste, sino que también sea con el mínimo de términos posibles, pues resulta más fácil de manejar.

Cuadro 3. Comparación de ajustes en términos estadísticos para diferentes órdenes del modelo ARX ( $na, nb$ ) en el pronóstico de caudales a corto plazo para la serie del año 2003.

ARX ( $na, nb$ ) <sup>1</sup>		MSE <sup>2</sup>				RMSE <sup>3</sup>				Nash-Sutcliffe			
$na$	$nb$	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h
1	2	49.88	116.76	194.74	282.17	7.06	10.81	13.95	16.8	0.94	0.85	0.75	0.64
2	1	41.37	103.63	188.29	291.01	6.43	10.18	13.72	17.06	0.95	0.87	0.76	0.63
2	2	60.48	125.92	212.3	312.48	7.78	11.22	14.57	17.68	0.92	0.84	0.73	0.60
2	3	62.63	131.93	216.52	312.58	7.91	11.49	14.71	17.68	0.92	0.83	0.72	0.60
3	1	65.34	154.05	252.88	403.66	8.08	12.41	15.90	20.09	0.92	0.80	0.68	0.48
3	2	91.08	177.80	273.81	430.19	9.54	13.33	16.55	20.74	0.88	0.77	0.65	0.45
3	3	117.26	201.31	275.28	409.97	10.83	14.19	16.59	20.25	0.85	0.74	0.65	0.48

<sup>1</sup> $na$  = orden autorregresivo para caudales;  $nb$  = orden autorregresivo para precipitación.

<sup>2</sup>MSE = Mean Squared Error (cuadrado medio del error).

<sup>3</sup>RMSE = Root Mean Squared Error (raíz del cuadrado medio del error).

Cuadro 4. Comparación de ajustes en términos estadísticos para diferentes órdenes del modelo ARX ( $na, nb$ ) en el pronóstico de caudales a corto plazo para la serie del año 2004.

ARX ( $na, nb$ )		MSE				RMSE				Nash-Sutcliffe			
$na$	$nb$	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h
1	2	16.96	39.15	61.52	82.04	4.12	6.26	7.84	9.06	0.92	0.82	0.72	0.63
2	1	16.32	39.13	62.16	83.13	4.04	6.26	7.88	9.12	0.93	0.82	0.72	0.62
2	2	16.83	39.42	62.32	83.33	4.10	6.28	7.89	9.13	0.92	0.82	0.72	0.62
2	3	26.54	57.70	87.39	113.28	5.15	7.60	9.35	10.64	0.88	0.74	0.60	0.48
3	1	15.56	36.99	59.76	80.79	3.95	6.08	7.73	8.99	0.93	0.83	0.73	0.63
3	2	16.22	37.73	60.78	82.02	4.03	6.14	7.80	9.06	0.93	0.83	0.72	0.63
3	3	30.20	63.53	87.29	108.77	5.50	7.97	9.34	10.43	0.86	0.71	0.60	0.50

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el pronóstico de caudales en la cuenca del río Turbio, implementando el modelo ARX+DKF con información del año 2003. El periodo que utilizó el modelo para su calibración previa y pronósticos posteriores para el año 2003 fue de 20 días. En lo que respecta al periodo de calibración elegido fue el que mejor resultados en términos estadísticos arrojó en el ARX+DKF y dichos estadísticos se mostrarán después.

La figura 5 muestra el pronóstico de caudales obtenidos para  $L = 1$  o con 24 h de anticipación. En la figura 5 se puede notar que hay una diferencia en la escala del tiempo de cuando se presenta la precipitación máxima y el

caudal máximo, en especial el evento máximo del mes de septiembre del 2003; quizás esto se pueda deber a la presencia de varias presas en la cuenca del río Turbio. Sin embargo, en el evento máximo de julio del 2003, aunque la precipitación fue mayor que la de septiembre de 2003, el caudal máximo es menor que el de septiembre, quizás esto se deba a las condiciones de humedad antecedente en los suelos de la cuenca que tiene un mes de julio a un mes de septiembre. Algo semejante se observará más adelante en la figura 10, que corresponde al pronóstico del año 2004. En trabajos posteriores se pudiera plantear un Filtro de Kalman en que una variable externa adicional a considerar sea la humedad antecedente, medida como la lluvia

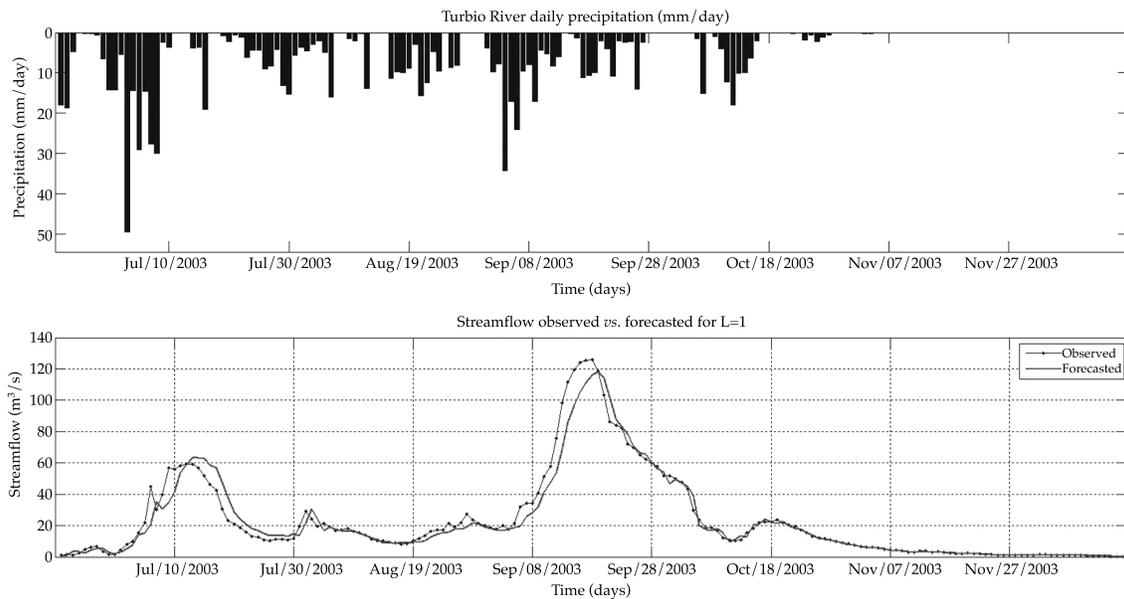


Figura 5. Pronóstico de caudales para  $L = 1$  o 24 h de anticipación mediante ARX + DKF en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2003.

en cinco días anteriores, como es el caso de la técnica del número de curva de escurrimiento para calcular los escurrimientos (McCuen, 2005).

De igual forma se realizaron los pronósticos para diferentes pasos hacia adelante  $L = 2$  o 48 h,  $L = 3$  o 72 h, y  $L = 4$  o 96 h de anticipación, respectivamente, con el objetivo de cuantificar los errores de predicción, teniendo en cuenta el esquema descrito en la figura 4.

En el cuadro 5 se resumen las estadísticas para los diferentes pronósticos en el tiempo utilizando los datos de la serie del año 2003.

Los mejores resultados son los pronósticos de caudales realizados un paso hacia adelante, es decir, para aquellos con 24 h de anticipación que los pronósticos realizados con 48, 72 y 96 horas de anticipación.

Según el resumen estadístico del cuadro 5, la media para los caudales pronosticados tiende a preservarse con respecto a la serie de los caudales observados; el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe disminuye conforme el RMSE aumenta a medida que el pronóstico se hace  $L$  pasos hacia adelante, generando pérdida de confiabilidad

en los pronósticos realizados. Los resultados obtenidos por el PBE para todos los pronósticos en el tiempo indican que los caudales tienden a ser subestimados por el modelo. Los resultados obtenidos presentan un comportamiento característico para caudales bajos, medios y altos de acuerdo con la dispersión que presentan a lo largo de la línea a 45 grados en la figura 6. Por esta razón, los datos se agruparon en tres clases:  $Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $20 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 60 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q > 60 \text{ m}^3/\text{s}$  (ver figura 7), siguiendo el patrón de dispersión de la figura 6.

El orden para los diagramas de dispersión en la figura 7 son  $L = 1$  gráficas (a, b, c);  $L = 2$  gráficas (d, e, f);  $L = 3$  gráficas (g, h, i), y para  $L = 4$  gráficas (j, k, l). Se puede apreciar que para la serie del año 2003 (ver cuadro 6), el ARX+DKF realizó los mejores pronósticos para el rango de caudales menores a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  en términos de RMSE y Nash-Sutcliffe para  $L = 1$  y  $L = 2$  ver gráficas (a,d).

En el mismo rango, los pronósticos para  $L = 3$  y  $L = 4$  no presentan los mejores resultados de acuerdo con los estadísticos evaluados. Por el contrario, para el pronóstico de caudales en

Cuadro 5. Resumen estadístico para diferentes pronósticos mediante ARX + DKF en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2003.

Estadísticas	Media	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	Nash-Sutcliffe	PBE
Caudales pronosticados L = 1	22.6	41.37	6.43	0.97	0.95	-3.82
Caudales pronosticados L = 2	22.0	103.63	10.18	0.93	0.87	-6.14
Caudales pronosticados L = 3	21.6	188.29	13.72	0.87	0.76	-7.87
Caudales pronosticados L = 4	21.2	291.01	17.06	0.80	0.63	-9.35
Caudales observados	20.1	-	-	-	-	-

PBE = porcentaje de error sistemático.

el rango de 20-60 m<sup>3</sup>/s (ver gráficas b, e, h, k de la figura 7), el ARX+DKF tiende subestimar los caudales pronosticados, siendo mayor este índice para los caudales pronosticados por arriba de los 60 m<sup>3</sup>/s (ver gráficas c, f, i, l de la figura 7).

Como se había descrito antes, la teoría asume que los errores de pronóstico  $e = (x - \hat{x})$

proviene de una distribución normal. En este sentido, el supuesto fue verificado para los errores obtenidos en las series pronosticadas a 24, 48, 72 y 96 horas de anticipación.

En la figura 8 se presentan los ajustes obtenidos para los errores de pronóstico, teniendo en cuenta los diferentes pasos en el tiempo. En

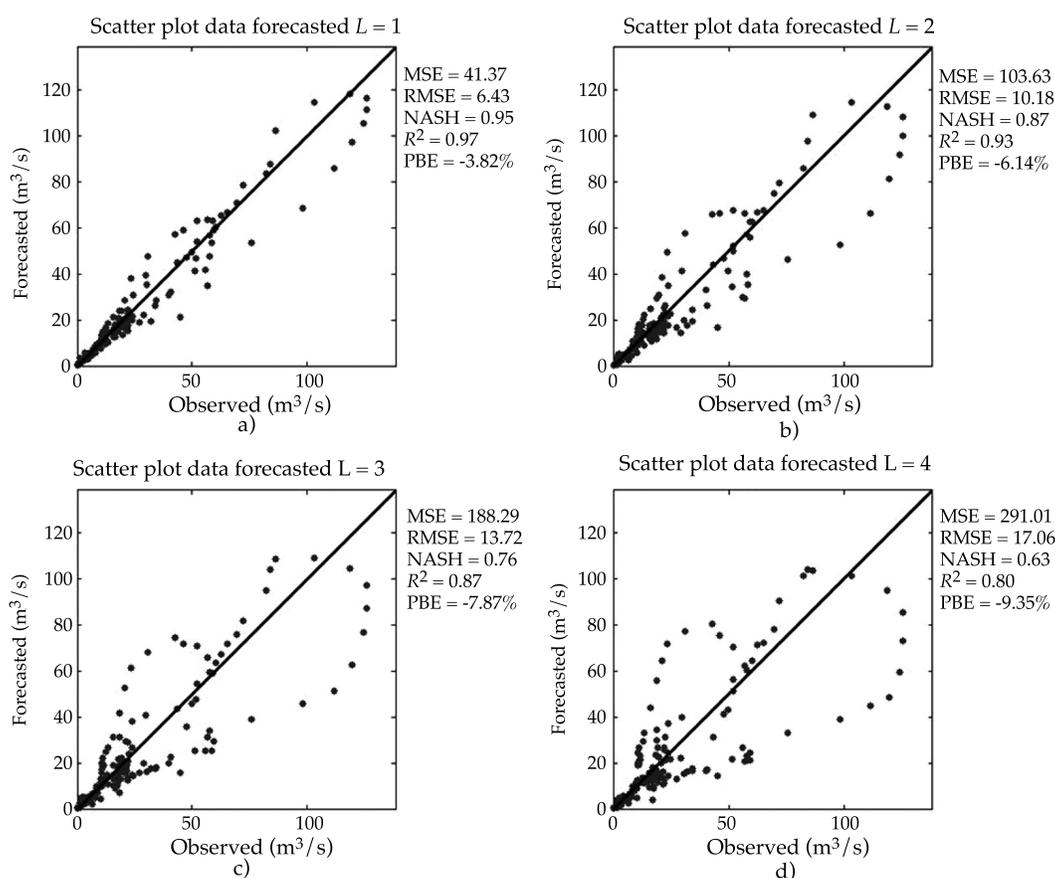


Figura 6. Diagramas de dispersión comparativos para pronósticos a 24 (a), 48 (b), 72 (c) y 96 horas (c) en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2003.

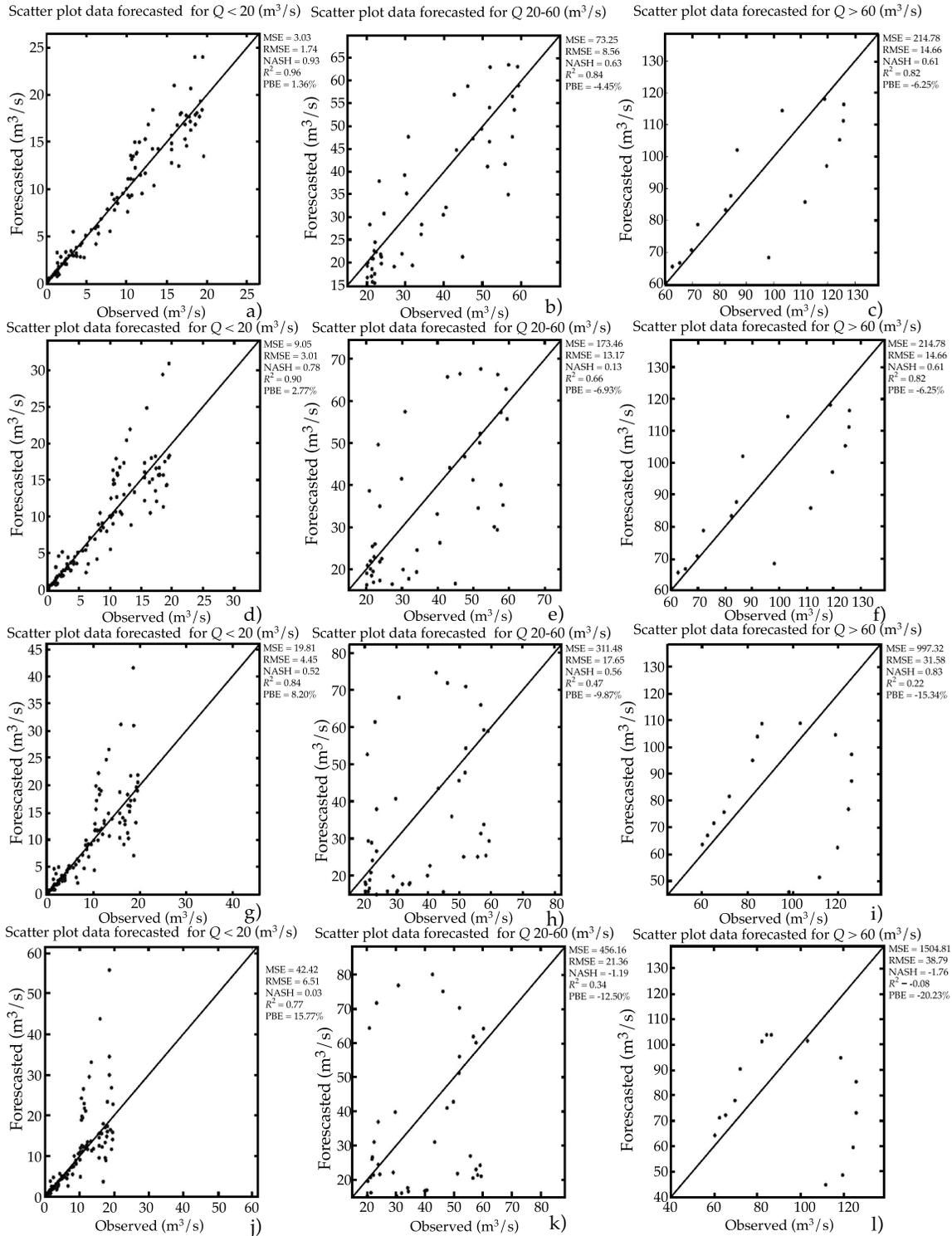


Figura 7. Diagramas de dispersión agrupados para los pronósticos en diferentes pasos del tiempo utilizando datos del año 2003.

Cuadro 6. Resumen estadístico para los pronósticos agrupados en diferentes pasos del tiempo utilizando datos del año 2003.

Pronósticos	Rango	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	Nash-Sutcliffe	PBE
L = 1 24 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	3.03	1.74	0.96	0.93	1.36
	20 ≤ Q ≤ 60 m <sup>3</sup> /s	73.25	8.56	0.84	0.63	-4.45
	Q > 60 m <sup>3</sup> /s	214.78	14.66	0.82	0.61	-6.25
L = 2 48 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	9.05	3.01	0.9	0.78	2.77
	20 ≤ Q ≤ 60 m <sup>3</sup> /s	173.46	13.17	0.66	0.13	-6.93
	Q > 60 m <sup>3</sup> /s	214.78	14.66	0.82	0.61	-6.25
L = 3 72 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	19.81	4.45	0.84	0.52	8.20
	20 ≤ Q ≤ 60 m <sup>3</sup> /s	311.48	17.65	0.47	0.10	-9.87
	Q > 60 m <sup>3</sup> /s	997.32	31.58	0.22	-0.83	-15.34
L = 4 96 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	42.42	6.51	0.77	-0.03	15.77
	20 ≤ Q ≤ 60 m <sup>3</sup> /s	456.16	21.36	0.34	-1.19	-12.50
	Q > 60 m <sup>3</sup> /s	1 504.81	38.79	0.08	-1.76	-20.23

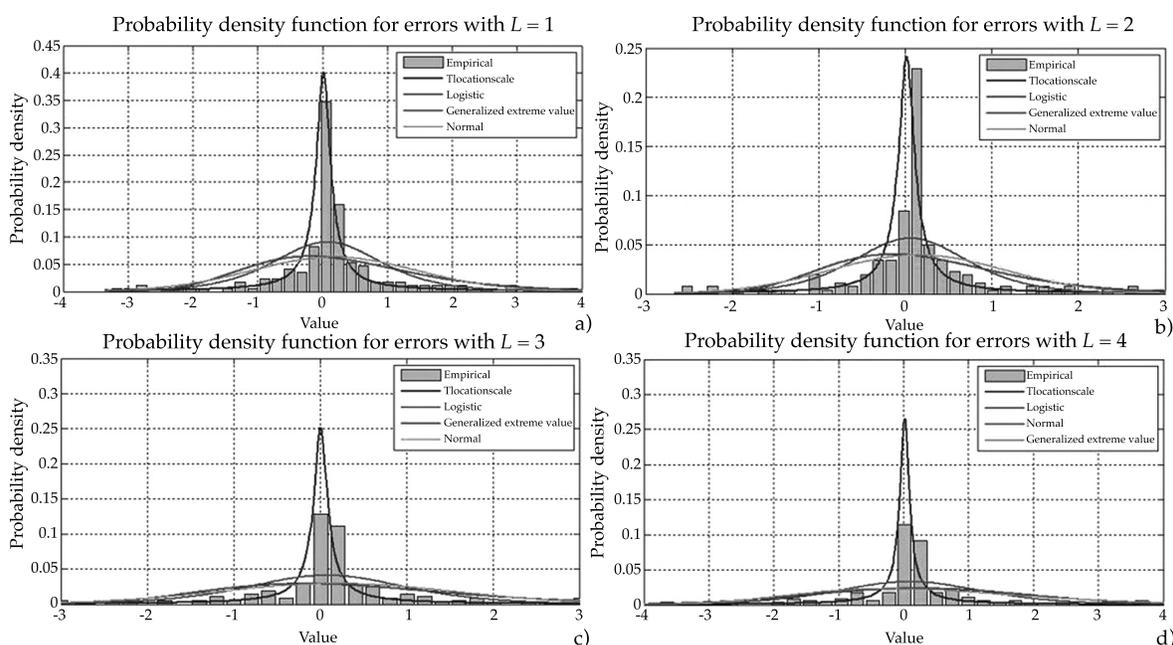


Figura 8. Funciones de distribución de probabilidad para los errores de pronóstico obtenidos con 24 (a), 48 (b), 72 (c) y 96 horas (d) de anticipación en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2003.

terminos generales, todos los errores se ajustan a una distribución *t* de *student* escalada.

Según Chatfield (2001), en la práctica los errores no siempre se ajustan a una distribución normal debido a la asimetría que se puede presentar, la presencia de datos atípicos que generan distribuciones con colas pesadas y por

errores asociados a los datos involucrados que contaminan la distribución de los errores en la predicción. De acuerdo con lo anterior, se sugiere que el valor para obtener una probabilidad dada se seleccione con base en la distribución para la cual los datos se han ajustado mediante sus parámetros.

Con el objetivo de establecer el grado de incertidumbre asociado con realizar los pronósticos para diferentes pasos en el tiempo, se determinaron los intervalos de predicción para cada valor puntual siguiendo los criterios establecidos por Chatfield (2004).

En la figura 9 se presenta el intervalo de predicción al 95% de probabilidad para el pronóstico realizado con 24 h de anticipación utilizando la serie del año 2003. Se puede observar que el pronóstico es aceptable debido a que la mayoría de los caudales observados están dentro del rango de los intervalos calculados a lo largo de la serie, a diferencia de los intervalos obtenidos en el evento ocurrido entre Sep/08/2003 y Sep/15/2003, donde los caudales observados quedan por fuera del rango calculado, guardando relación con los datos que fueron agrupados en la figura 7 para la clase  $Q > 60 \text{ m}^3/\text{s}$  con  $L = 1$ .

La figura 10 presenta el pronóstico de caudales realizado para la serie del año 2004 utilizando el  $ARX+DKF$  para 24 horas de anticipación.

En esta serie pronosticada, el periodo que mejor se ajustó fue de 36 días, considerando en

dos el orden autorregresivo para caudales y en uno el número de días de precipitación, como ya se había mostrado anteriormente en el cuadro 4. Las estadísticas para el pronóstico de la serie 2004 se resumen en el cuadro 7.

Los mejores resultados obtenidos fueron para los caudales pronosticados para  $L = 1$  o con 24 horas de anticipación de acuerdo con las estadísticas reportadas en el cuadro 7.

La media de la serie pronosticada para  $L = 1$  tiende a alejarse relativamente en cuanto a la serie de datos observados y a las series pronosticadas con  $L = 2$ ,  $L = 3$  y  $L = 4$ , respectivamente.

En términos generales, a medida que se avanza en el tiempo, el pronóstico tiende a perder eficiencia reflejado en los valores de Nash-Sutcliffe, MSE y RMSE, con la tendencia a subestimar los datos según los valores reportados por el PBE.

Se agruparon los caudales pronosticados para la serie del año 2004, siguiendo la misma estructura con la que se realizó para los datos pronosticados en la serie del año 2003. En este caso, los rangos fueron para los  $Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$  y

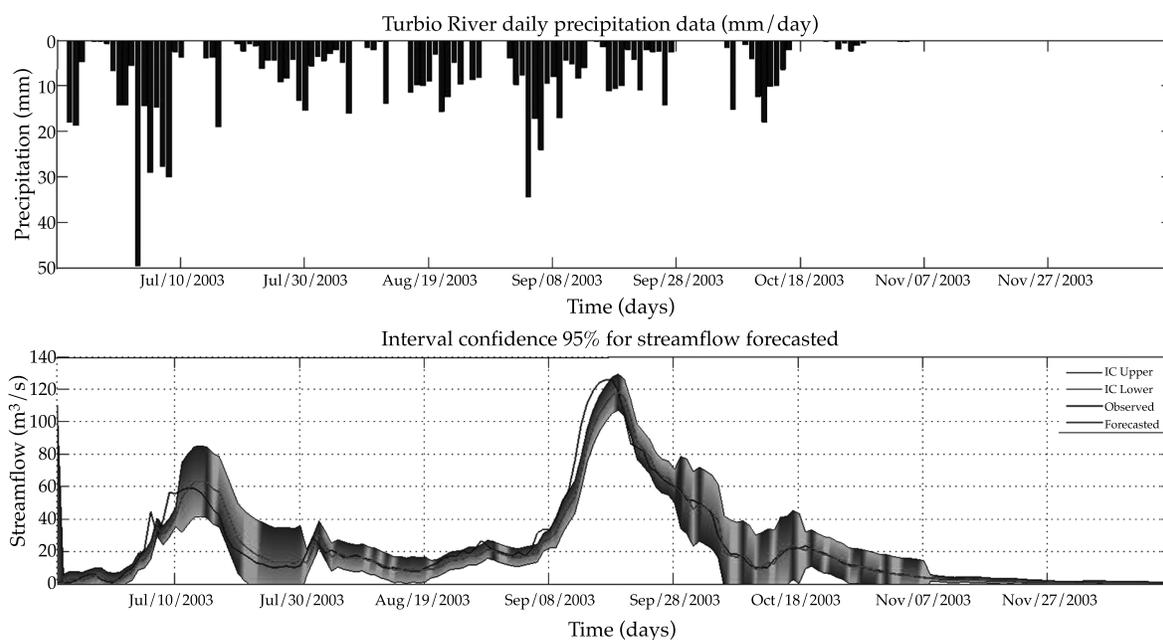


Figura 9. Intervalo de predicción al 95% de probabilidad para  $L = 1$  o 24 horas de anticipación en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2003.

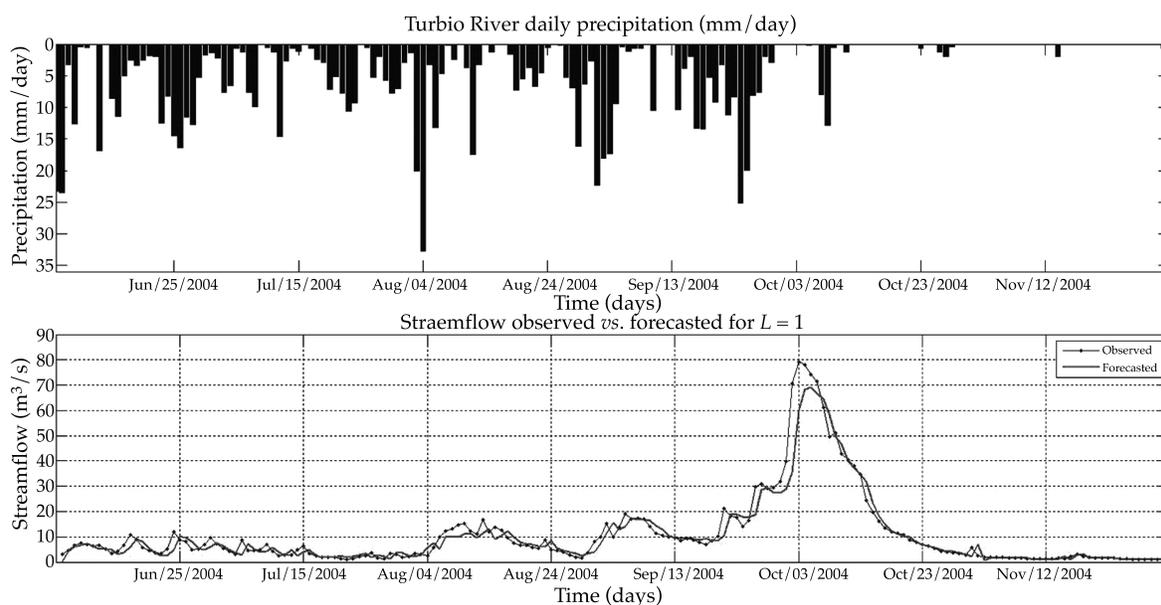


Figura 10. Pronóstico de caudales para  $L = 1$  o 24 horas de anticipación mediante  $ARX + DKF$  en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2004.

Cuadro 7. Resumen estadístico para los pronósticos a diferentes pasos mediante  $ARX + DKF$  en la cuenca del río Turbio para la serie del 2004.

Estadísticas	Media	MSE	RMSE	$R^2$	Nash-Sutcliffe	PBE
Caudales pronosticados $L = 1$	10.12	16.32	4.04	0.96	0.93	-5.64
Caudales pronosticados $L = 2$	9.64	39.13	6.26	0.91	0.82	-10.02
Caudales pronosticados $L = 3$	9.18	62.16	7.88	0.86	0.72	-14.14
Caudales pronosticados $L = 4$	8.76	83.13	9.12	0.80	0.62	-17.84
Caudales observados	8.16	-	-	-	-	-

$Q \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$  de acuerdo con la dispersión de los datos obtenidos en la figura 11.

En la figura 12 se presentan los resultados para  $L = 1$  gráficas (a, b), para  $L = 2$  gráficas (c, d), para  $L = 3$  gráficas (e, f) y para  $L = 4$  gráficas (g, h). Se observa que los mejores ajustes se encuentran para los caudales menores a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , tal como se observó en la serie del año 2003 (ver gráficas a, c, e, g).

Se puede observar en las gráficas (b, d, f, h) de la figura 12, que los pronósticos para  $Q \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$  en todos los pasos del tiempo tienden a perder confiabilidad según el grado de dispersión con respecto a los valores observados, reflejados por el aumento del RMSE y disminu-

ción del coeficiente de Nash-Sutcliffe a medida que se hace el pronóstico con mayor tiempo de anticipación, tal como se reporta en los estadísticos del cuadro 8.

Al igual que en los resultados obtenidos en la serie del año 2003, los errores de pronóstico se ajustaron a una distribución *t student* escalada para los diferentes pasos en el tiempo, generada por la presencia de datos atípicos, discutidos anteriormente.

Según el ajuste de los errores presentado en la figura 13, se calculó el intervalo de predicción al 95% de probabilidad con los datos para  $L = 1$  o 24 h de anticipación. Se obtuvieron ajustes satisfactorios con respecto a los valores

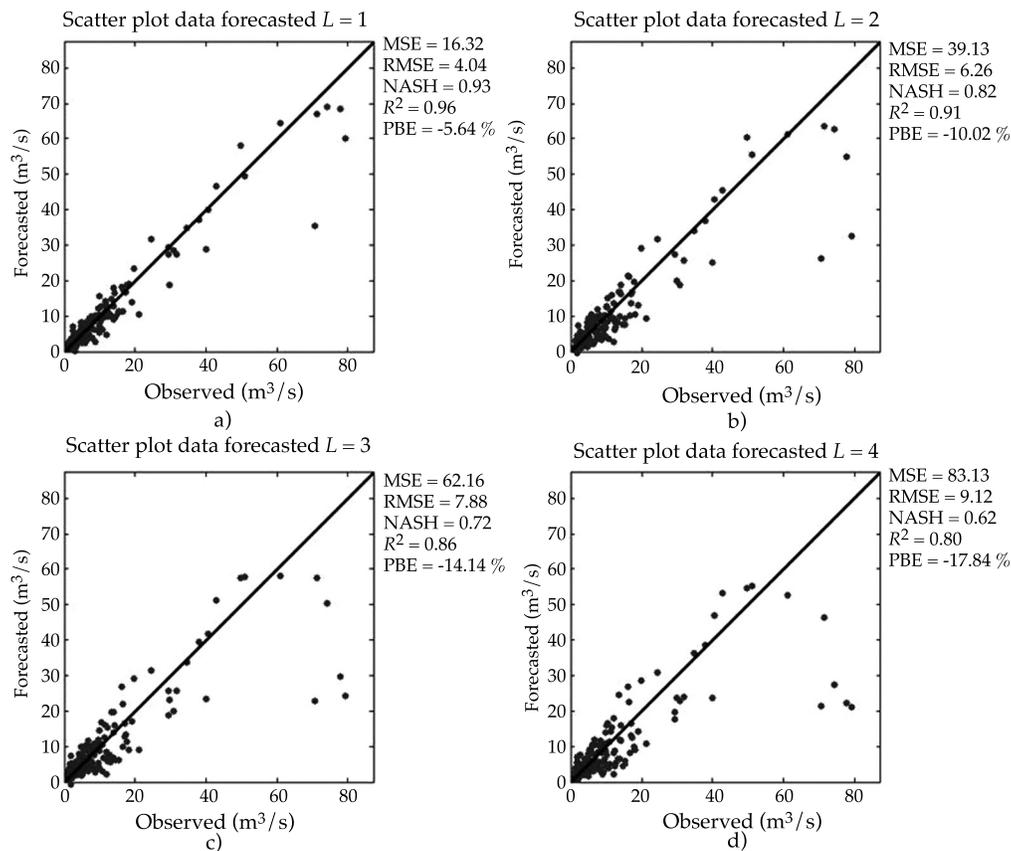


Figura 11. Diagramas de dispersión comparativos para pronósticos a 24 (a), 48 (b), 72 (c) y 96 horas (d) en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2004.

observados (ver figura 14) en la mayoría de los intervalos calculados, a diferencia de los pronósticos realizados entre oct/01/2004 y oct/04/2004 para los cuales los intervalos no incluyeron los valores observados en el mismo periodo de tiempo, estableciendo una relación de semejanza con los datos agrupados en el rango de  $Q \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$  y con 24 h de anticipación reportados en la figura 12.

Kim, Tachikawa y Takara (2004) hicieron la implementación del Filtro de Kalman con el modelo *CDRMV3* para el pronóstico de caudales y encontró que los mejores resultados pertenecían a los pronósticos realizados a una hora que para los obtenidos a 12 horas después, evaluados en términos de RMSE.

Por otra parte, Hirpa *et al.* (2013) encontraron que en términos de Nash-Sutcliffe, los

mejores resultados fueron para los pronósticos de caudales realizados para un día que para aquellos que fueron realizados con 15 días de anticipación, en el río Ganges y Brahmaputra de Asia meridional.

En este trabajo se llevó a cabo el pronóstico de caudales para los años 2003 y 2004 porque eran los datos más completos y de más calidad, en la base de datos *BANDAS*, para alimentar el modelo de Filtro de Kalman. En trabajos posteriores se pudiera probar el Filtro de Kalman en cuencas con datos de caudales más completos; quizás intentar el acceso a la base de datos de caudales de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Sin embargo, el acceso a la base de datos de caudales de CFE no es libre, tal como ocurre con la base de datos *BANDAS* de la Comisión Nacional del Agua.

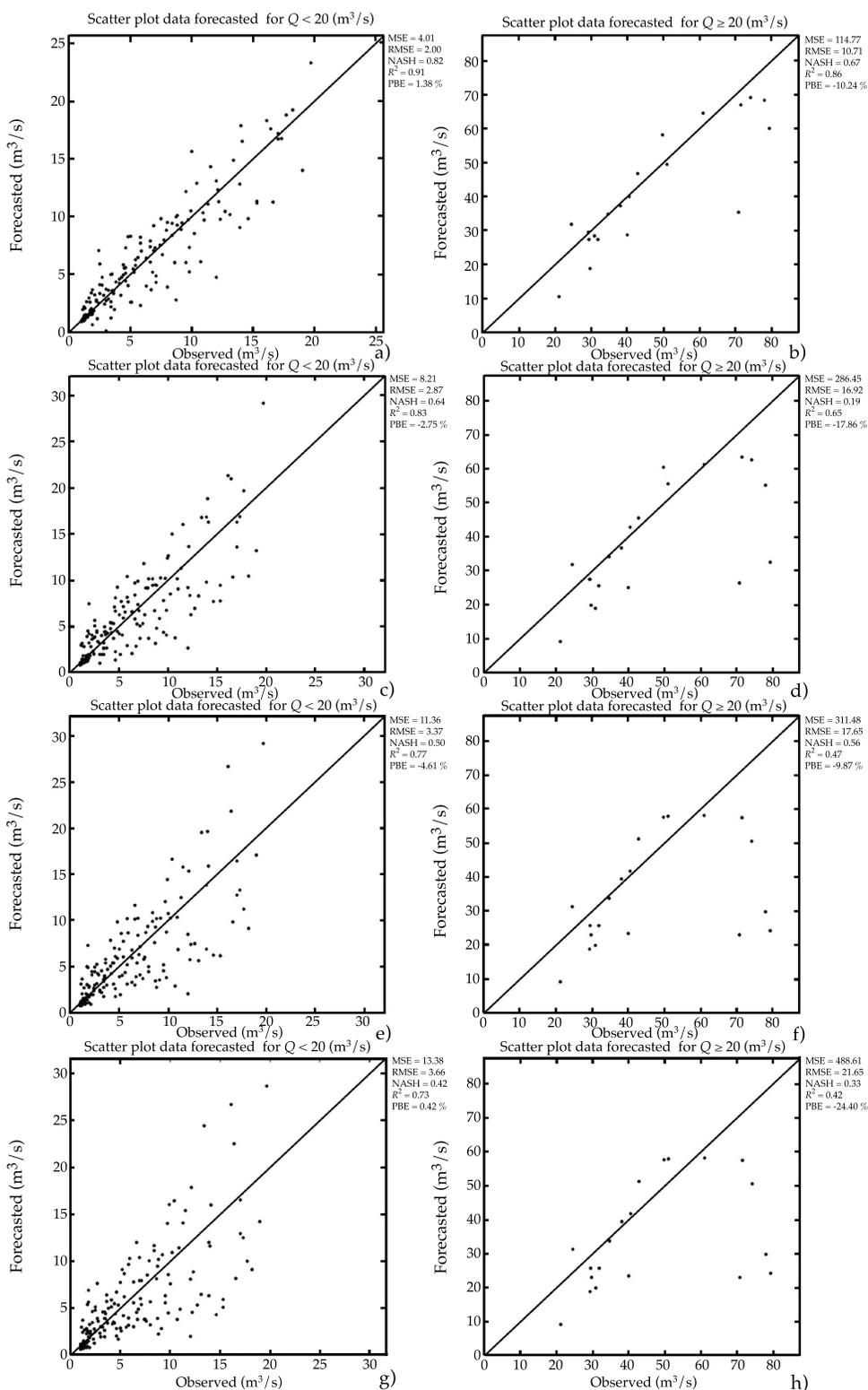


Figura 12. Diagramas de dispersión agrupados para los pronósticos en diferentes pasos del tiempo utilizando datos del año 2004.

Cuadro 8. Resumen estadístico para los pronósticos agrupados en diferentes pasos del tiempo utilizando datos del año 2004.

Pronósticos	Rango	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	Nash-Sutcliffe	PBE
L = 1 24 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	4.01	2.00	0.91	0.82	-1.38
	Q ≥ 20 m <sup>3</sup> /s	114.77	10.71	0.86	0.67	-10.24
L = 2 48 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	8.21	2.87	0.83	0.64	-2.75
	Q ≥ 20 m <sup>3</sup> /s	286.45	16.92	0.65	0.19	-17.86
L = 3 72 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	11.36	3.37	0.77	0.50	-4.61
	Q ≥ 20 m <sup>3</sup> /s	468.61	21.65	0.42	-0.33	-24.40
L = 4 96 h	Q < 20 m <sup>3</sup> /s	13.38	3.66	0.73	0.42	-6.41
	Q ≥ 20 m <sup>3</sup> /s	468.61	21.65	0.42	-0.33	-24.40

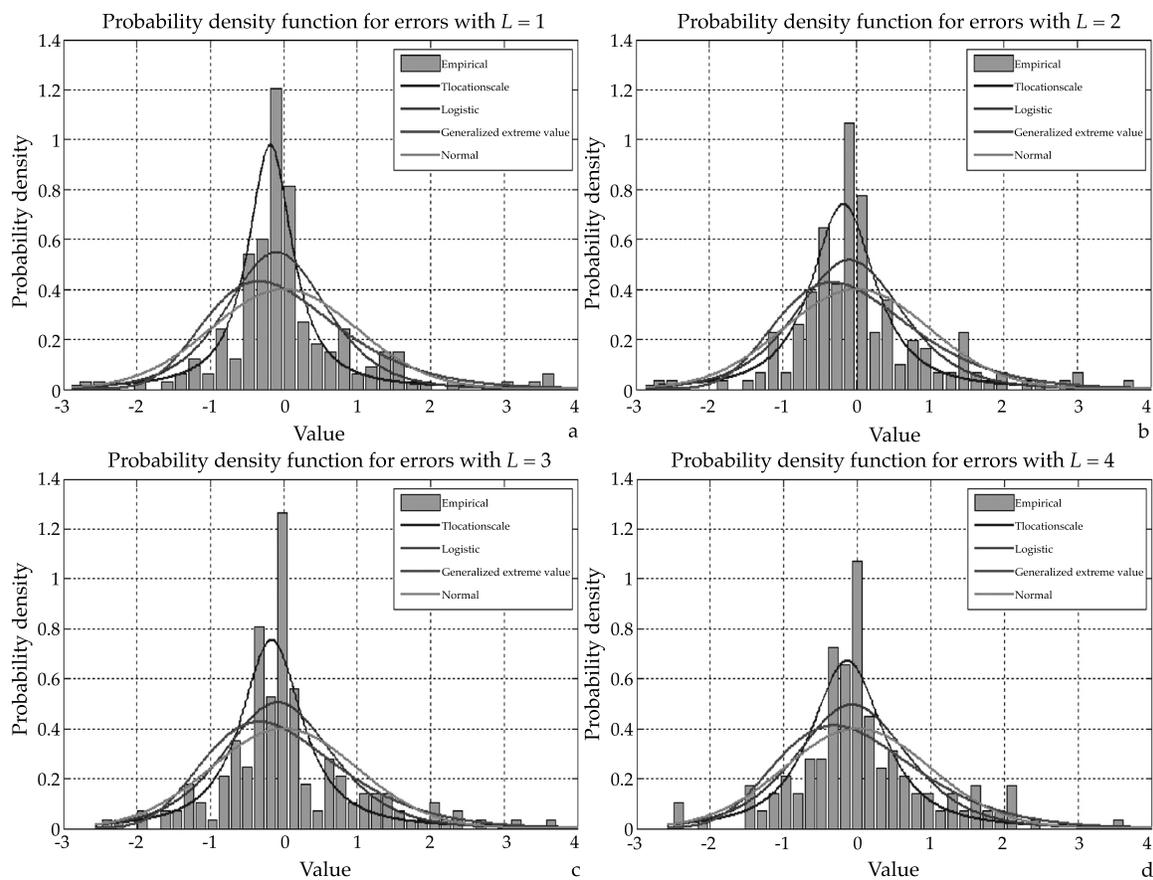


Figura 13. Funciones de distribución de probabilidad para los errores de pronóstico obtenidos con 24, 48, 72 y 96 horas de anticipación en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2004.

### Conclusiones

El pronóstico de caudales mediante el modelo *ARX+DKF* en la cuenca del río Turbio para los años 2003 y 2004 fue implementado de manera

satisfactoria. Con base en los resultados obtenidos, los pronósticos realizados un paso hacia adelante  $L = 1$  o con 24 horas de anticipación, presentan un mejor ajuste en términos de Nash-Sutcliffe, MSE y RMSE, que los pronósticos rea-

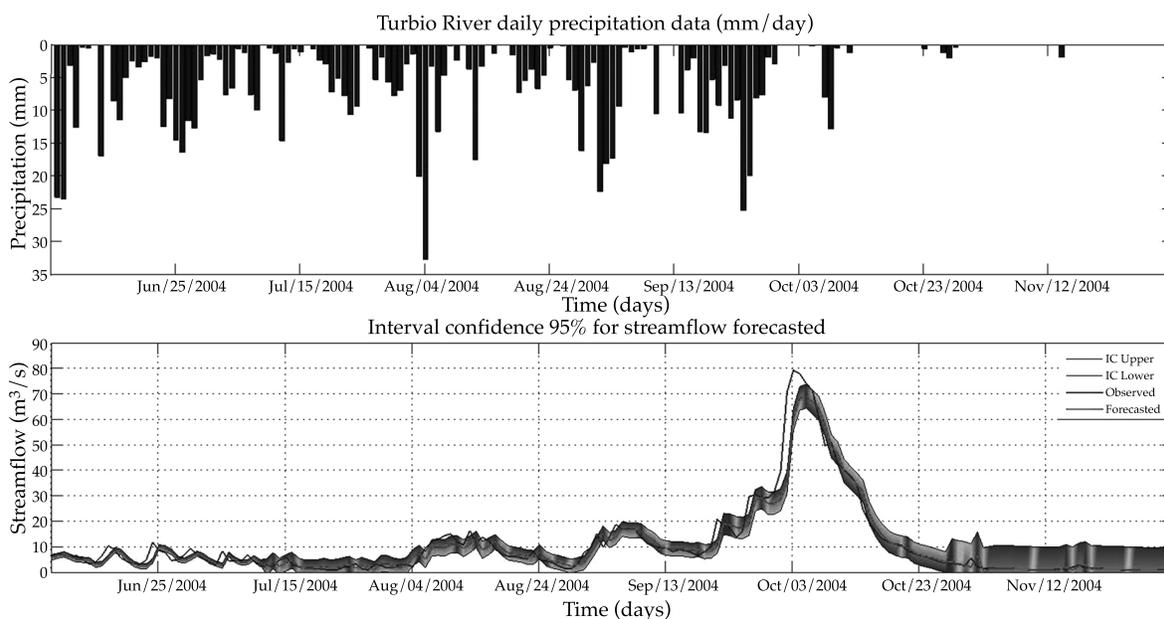


Figura 14. Intervalo de predicción al 95% de probabilidad para  $L = 1$  o 24 h de anticipación en la cuenca del río Turbio para la serie del año 2004.

lizados a 2, 3 y 4 pasos hacia adelante, es decir, con 48, 72 y 96 horas de anticipación.

Los periodos previos de calibración para la metodología del modelo  $ARX+DKF$  son fundamentales para mejorar los pronósticos a través del tiempo, pues la función de respuesta en la cuenca puede ser variante según los periodos del ciclo hidrológico o debido a la presencia de eventos meteorológicos de consideración.

Los errores de pronóstico para las dos series evaluadas no se ajustaron a una distribución normal como teóricamente debería presentarse, pero la presencia de datos atípicos atribuidos a la calidad de la información involucrada genera distribuciones de colas pesadas pertenecientes a la familia de la distribución  $t$  de *student*.

La implementación de técnicas, como el Filtro de Kalman, para el pronóstico de caudales en cuencas con instrumentación muy pobre o deficiente puede ser una tarea compleja si la medición de caudales no es continua o es inexistente, o los registros son de mala calidad y corta duración. De hecho, por eso en este trabajo la implementación del Filtro de Kalman en la

cuenca del río Turbio sólo se hizo para los años 2003 y 2004.

En trabajos posteriores se pudiera hacer lo siguiente: (a) considerar la humedad antecedente como variable exógena en el Filtro de Kalman; (b) aplicar el Filtro de Kalman en cuencas instrumentadas por la CFE, en donde la continuidad y la calidad de registros pudiera ser más completa que los registros de *BANDAS*.

## Referencias

- Abaza, M., Anctil, F., Fortin, V., & Turcotte, R. (2014). Sequential Streamflow Assimilation for Short-Term Hydrological Ensemble Forecasting. *Journal of Hydrology*, 519, 2692-2706.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2013). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (746 pp) (4th edition). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Chatfield, C. (2001). Prediction Intervals for Time-Series Forecasting (475-494 pp). In *Principles of Forecasting*. Philadelphia, USA: Springer US.
- Chatfield, C. (2004). *The Analysis of Time Series: An Introduction* (313 pp) (6th edition). Florida: Chapman & Hall/CRC Press.

- Conagua (2014a). *Banco Nacional de Aguas Superficiales, BANDAS*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de [ftp://ftp.conagua.gob.mx/bandas/bases\\_datos\\_bandas](ftp://ftp.conagua.gob.mx/bandas/bases_datos_bandas).
- Conagua (2014b). *Sistema de Seguridad de Presas*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/>.
- Gelb, A. (1974). *Applied Optimal Estimation*. Massachusetts: MIT Press. (374 pp).
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- Hsu, K. L., Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2009). A Sequential Bayesian Approach for Hydrologic Model Selection and Prediction. *Water Resources Research*, 45(12), 1-15. W00B12, doi:10.1029/2008WR006824.
- Hirpa, F. A., Hopson, T. M., De Groeve, T., Brakenridge, G. R., Gebremichael, M., & Restrepo, P. J. (2013). Upstream Satellite Remote Sensing for River Discharge Forecasting: Application to Major Rivers in South Asia. *Remote Sensing of Environment*, 131, 140-151.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis* (104 pp.). R. K. Pachauri & A. Reisinger (directores de la publicación). Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra: IPCC.
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Fluids Engineering*, 82(1), 35-45.
- Kim, P. (2011). *Kalman Filter for Beginners: with Matlab Examples* (232 pp.). Seoul, Korea: CreateSpace.
- Kim, S., Tachikawa, Y., & Takara, K. (2004). *Embedding Kalman Filter into a Distributed Hydrological Model* (pp. 21-25). IHP Conference (with WSUD), Adelaide, Australia, November, 21-26.
- Lee, Y. H., & Singh, V. (1998). Application of the Kalman Filter to the Nash Model. *Hydrological Processes*, 12(5), 755-767.
- Li, Y., Ryu, D., Western, A. W., & Wang, Q. J. (2015). Assimilation of Stream Discharge for Flood Forecasting: Updating a Semidistributed Model with an Integrated Data Assimilation Scheme. *Water Resources Research*, 51(5), 3238-3258. doi: 10.1002/2014WR016667.
- Liu, J., Wang, J., Pan, S., Tang, K., Li, C., & Han, D. (2015). A Real-Time Flood Forecasting System with Dual Updating of the NWP Rainfall and the River Flow. *Natural Hazards*, 77(2), 1161-1182.
- Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks-Franssen, H. J., Kumar, S., Moradkhani, H., & Restrepo, P. (2012). Advancing Data Assimilation in Operational Hydrologic Forecasting: Progresses, Challenges, and Emerging Opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10), 105-119.
- Lü, H., Hou, T., Horton, R., Zhu, Y., Chen, X., Jia, Y., Wang, W. & Fu, X. (2013). The Streamflow Estimation Using the Xinanjiang Rainfall Runoff Model and Dual State-Parameter Estimation Method. *Journal of Hydrology*, 480, 102-114.
- Matlab® R2013b. MathWorks, Inc.
- McCuen, R. H. (2005). *Hydrologic Analysis and Design* (859 pp) (3rd edition). Upper Saddle, USA: Prentice Hall PTR.
- Mendoza, V. M., Villanueva, E. E., Garduño, R., Nava, Y., Santisteban, G., Mendoza, A. S., Oda B., & Adem, J. (2009). Thermo-Hydrological Modelling of the Climate Change Effect on Water Availability in Two Hydrologic Regions of Mexico. *International Journal of Climatology*, 29, 1131-1153.
- Montero-Martínez, M. J., Ojeda-Bustamante, W., Santana-Sepúlveda, J. S., Prieto-González, R., & Lobato-Sánchez, R. (abril-junio, 2013). Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 113-128.
- Moradkhani, H., DeChant, C. M., & Sorooshian, S. (2012). Evolution of Ensemble Data Assimilation for Uncertainty Quantification Using the Particle Filter-Markov Chain Monte Carlo Method. *Water Resources Research*, 48(12), 1-13. 41:W05012, doi: 10.1029/2004WR003604.
- Moradkhani, H., Sorooshian, S., Gupta, H. V., & Houser, P. R. (2005). Dual State-Parameter Estimation of Hydrological Models Using Ensemble Kalman Filter. *Advances in Water Resources*, 28(2), 135-147.
- Mood, A., Graybill, F., & Boes, D. (1974). *Introduction to the Theory of Statistics* (229 pp) (3rd edition). Singapore: McGraw-Hill.
- Morales-Velázquez, M. I., Aparicio, J., & Valdés, J. B. (2014). Pronóstico de avenidas utilizando el Filtro de Kalman Discreto. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 85-110.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Perevochtchikova, M. (2013). Retos de la información del agua en México para una mejor gestión. Realidad, Datos y Espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 4(1), 42-57.
- Protección Civil Guanajuato (2012). Recuperado de: [http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/hidrometeorologico/hidro\\_cuenca\\_turbio.php](http://proteccioncivil.guanajuato.gob.mx/atlas/hidrometeorologico/hidro_cuenca_turbio.php).
- Ramírez, Á. S. (2003). *El Filtro de Kalman*. Nota técnica. Banco Central de Costa Rica, División Económica, Departamento de Investigaciones Económicas.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., & Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series* (484 pp). Colorado, USA: Highlands, Co., Water Resources Publications.
- Samuel, J., Coulibaly, P., Dumedah, G., & Moradkhani, H. (2014). Assessing Model State and Forecasts Variation in Hydrologic Data Assimilation. *Journal of Hydrology*, 513, 127-141.

- SMN (2014). *Sistema de Información Climática Computarizada CLICOM*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional.
- Simon, D. (2001). Kalman filtering. *Embedded Systems Programming*, 14(6), 72-79.
- Shi, Y., Davis, K. J., Zhang, F., Duffy, C. J., & Yu, X. (2014). Parameter Estimation of a Physically Based Land Surface Hydrologic Model Using the Ensemble Kalman Filter: A Synthetic Experiment. *Water Resources Research*, 50(1), 706-724.
- Valdés, J. B., Mejía-Velázquez, J. M., & Rodríguez-Iturbe, I. (1980). *Filtros de Kalman en la hidrología: predicción de descargas fluviales para la operación óptima de embalses*. Informe Técnico No. 80-2. Caracas: Universidad Simón Bolívar, Decanato de Estudios de Posgrado, Posgrado en Planificación e Ingeniería de Recursos Hídricos.
- Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill: University of North Carolina at Chapel Hill.
- WMO (2009). *WMO Report No 168. Guide to hydrological practices volume II: Management of water resources and application of hydrological practices*. Geneva: World Meteorological Organization.
- Xie, X., & Zhang, D. (2010). Data Assimilation for Distributed Hydrological Catchment Modeling Via Ensemble Kalman Filter. *Advances in Water Resources*, 33(6), 678-690.
- Yucel, I., Onen, A., Yilmaz, K. K., & Gochis, D. J. (2015). Calibration and Evaluation of a Flood Forecasting System: Utility of Numerical Weather Prediction Model, Data Assimilation and Satellite-Based Rainfall. *Journal of Hydrology*, 523, 49-66.

## Dirección institucional de los autores

M.I. Fernando González Leiva  
Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo  
Dr. Mario Alberto Vázquez Peña  
Dr. Agustín Ruiz García

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua  
Universidad Autónoma Chapingo  
Km. 38.5 carretera México-Texcoco  
56230 Chapingo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 9521 551  
fernando.gleiva@gmail.com  
libacas@gmail.com  
mvazquezp@correo.chapingo.mx  
agustinruizg@gmail.com

Dr. Juan B. Valdés

The University of Arizona at Tucson  
Hydrology and Water Resources  
United States of America  
1133 James E. Rogers  
Harshbarger Bldg. Room 318E  
Tucson AZ 85721, USA  
jvaldes@email.arizona.edu



Haga clic aquí para escribir al autor

# Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica

• Oswaldo Ortiz-Vera\* •  
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú  
\*Autor de correspondencia

## Resumen

Ortiz-Vera, O. (julio-agosto, 2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 25-44.

El objeto de este estudio fue determinar las leyes que rigen la similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos altoandinos. Para ello, los parámetros adimensionales en hidrología, al igual que en hidráulica de modelos físicos, jugaron papel preponderante. Se encontró que los parámetros índice Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, son condiciones necesarias y suficientes para una aproximación de similitud hidráulica. Los parámetros obtenidos mediante análisis dimensional, unidos a las condiciones de semejanza, permite intercambiar información entre sistemas hidrológicos similares. La morfometría adimensional en la que se sustenta esta metodología permite generalizar su aplicación a sistemas hidrológicos de otra región o interregiones subnacionales e internacionales.

**Palabras clave:** sistemas hidrológicos altoandinos, similitud hidráulica, transferencia, información hidrometeorológica.

## Abstract

Ortiz-Vera, O. (July-August, 2015). *Hydraulic Similarities among the High Andean Hydrological Systems and Transfer of Hydrometeorological Information*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 25-44.

The objective of this work was to determine the laws governing hydraulic similarities among the high Andean hydrological systems. To this end, dimensionless hydrological parameters and physical hydraulic models play an important role. The study finds that the Gravelius index, the convergence ratio and the orographic coefficient are necessary and sufficient conditions to determine hydraulic similarity. The parameters obtained from the dimensionless analysis along with conditions of similarity enable exchanging information among similar hydrological systems. Given the dimensionless morphometry on which this methodology is based, its application can be generalized to hydrological systems in other regions, among regions within countries as well as internationally.

**Keywords:** Andean hydrological systems, hydraulic similarity, transfer, hydrometeorological information.

---

Recibido: 26/09/2014  
Aceptado: 14/04/2015

---

## Introducción

En general, la información hidrometeorológica es escasa y más aún la información de escorrentías, la misma que constituye base fundamental en cualquier proyecto hidráulico; obviamente, las mayores dificultades lo afrontan los países en vías de desarrollo (Jimenez & Farías, 2005). La falta o escasez de información hidrométrica y sedimentológica en las cuencas impide un análisis regional consistente, problema que afecta el planeamiento, diseño y operación de los

proyectos hidráulicos (Jimenez & Farías, 2005; ICOLD, 2008). Esta situación obliga a la búsqueda constante de metodologías sencillas que permitan generar información local en cantidad y calidad lo suficientemente aceptable para fines prácticos, lo cual se logra usando criterios aproximativos de similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos.

El estudio de similitud entre modelo y prototipo, con una adecuada operación del modelo a escala, ha hecho posible la construcción de grandes obras de ingeniería, que han contribuido al desarrollo de la humanidad (Sotelo-Ávila,

1977; Rodríguez Díaz, 2001). No obstante que el hombre es artífice de todo ello, no ha podido conseguir una exacta similitud entre modelo y prototipo; pero aun así los resultados del modelo transferidos al prototipo han sido suficientes para solucionar gran cantidad de problemas en la práctica (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). Este aspecto fue motivo de inspiración para el desarrollo del presente trabajo, consistente en identificar en la propia naturaleza sistemas hidrológicos con similitud hidráulica, cuyas condiciones pueden aprovecharse para transferir información de un sistema a otro similar (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). En el maravilloso escenario de la naturaleza, a través de millones de años, ha sucedido algo parecido a lo que suele hacer el hombre artificialmente en materia de similitud, donde mediante acciones dinámicas naturales de causa-efecto recurrentes en sistemas de naturaleza intrínseca similar, se han ido construyendo sistemas hidrológicos unos a imagen de otros.

El objeto de este trabajo es desarrollar una base metodológica que permita identificar sistemas hidrológicos similares, usando parámetros adimensionales como referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Estos parámetros de semejanza y otros deducidos dimensionalmente de fenómenos físicos que tienen como escenario la cuenca, mediante el principio de similitud hidráulica, se convierten en funciones de transferencia de información entre sistemas hidrológicos altoandinos similares (Streeter & Wilie, 2000; Vergara, 1993; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001).

La metodología restringe su aplicación a sistemas altoandinos, donde la superficie receptora de precipitaciones coincide con la superficie colectora y donde la precipitación es la variable más importante y única de entrada al sistema. El hecho de que, territorialmente, las cuencas altoandinas sean las unidades hidrológicas más lejanas del sistema hidrográfico, determina también que sean las más afectadas en materia

de disponibilidad de información (Jimenez & Farías, 2005; Rocha, 2006).

Se tiene la certeza de que los resultados de esta investigación sean capitalizados por el Ministerio del Ambiente de Perú, a través de los centros de investigación de los sectores Autoridad Nacional del Agua (ANA) y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamih), e instituciones nacionales e internacionales ligadas con la investigación sobre cambio climático global.

## Metodología

### Área de estudio

Comprende una muestra de 70 microcuencas altoandinas, todas ubicadas en superficie territorial del departamento de Cajamarca, en el norte de Perú, donde la presencia de la cordillera de los Andes determina una topografía muy abrupta e irregular, cuyos relieves escarpados y estrechos valles interandinos dan lugar a una gran variedad de pisos ecológicos, con biodiversidad impresionante, propia de cada microclima. Todas las unidades hidrológicas se desarrollan entre los 1 500 y 4 200 msnm, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 9 °C (zonas más altas) y 25 °C (zonas bajas), y precipitaciones medias anuales que varían entre 400 y 1 200 mm/año. Muchas de estas microcuencas, reguladas mediante pequeñas presas, fueron la base fundamental del desarrollo agrícola en los valles interandinos, que sirvió de sustento a importantes poblaciones de culturas preincaicas.

### Análisis dimensional de sistemas hidrológicos

El fenómeno físico más importante en microcuencas altoandinas es el de precipitación-esorrentía, variables causa y efecto, respectivamente. La primera, dependiente de las características climáticas, y la segunda de la naturaleza de cada microcuenca (Chow, 1993). Sencillamente, si se desprecia la evapotranspiración real, el fenó-

meno simplificado queda representado por las variables mostradas en el cuadro 1.

Las variables se agruparon en parámetros adimensionales, mediante la aplicación del teorema PI de Vaschy-Buckingham (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001). El producto de este análisis condujo a la obtención de las leyes físicas que rigen los sistemas hidrológicos altoandinos, representadas por los parámetros adimensionales de las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5):

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (1)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$\pi_3 = \frac{I * t}{H} \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (4)$$

$$\pi_5 = \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Donde:

$\pi$  = parámetro adimensional.

$Q$  = caudal de escurrimiento.

$A$  = proyección del área receptora-colectora sobre un plano horizontal.

$P$  = precipitación pluviométrica.

$H$  = altitud media sobre el nivel del mar.

$I$  = intensidad de precipitación.

$t$  = periodo de duración de intensidad de precipitación.

$p$  = perímetro de la cuenca.

El hecho de haber despreciado la evapotranspiración real en este análisis se justifica porque los tiempos de duración de las tormentas son relativamente cortos; para periodos de tiempo más largos, los balances hidrológicos deben tomar en cuenta esta componente o bien incluirla como pérdida en los coeficientes de escorrentía (Chow, 1993; Aparicio, 1997).

### Parámetro adimensional de semejanza geométrica

Está dado por el parámetro adimensional de la ecuación (5), donde multiplicando ambos miembros por 0.28 resulta el índice de Gravelius ( $Kc = 0.28 * \pi_5$ ) dado por la ecuación (6); parámetro adimensional que se obtiene relacionando el perímetro de una cuenca y el perímetro que tendría un círculo imaginario de la misma área que la cuenca (Askoa-Ibizate, 2004; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Gravelius, 1914).

$$K_c = 0.28 \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

El índice de Gravelius tiene influencia en la configuración de la red de drenaje superficial y

Cuadro 1. Variables y dimensiones del fenómeno precipitación-escorrentía.

Variables principales del fenómeno físico precipitación-escorrentía	
Variable	Dimensión
1. Precipitación pluvial: $P$	$LT^{-1}$
2. Intensidad de precipitación pluvial: $I$	$LT^{-1}$
3. Periodo de duración de la lluvia: $t$	$T$
4. Proyección del área receptora colectora: $A$	$L^2$
5. Desnivel sobre el nivel del mar: $H$	$L$
6. Caudal de escurrimiento: $Q$	$L^3T^{-1}$
7. Perímetro de la cuenca: $p$	$L$

en la geometría del hidrograma de escorrentía directa y, por tanto, en la magnitud del caudal pico de avenidas (Senciales, 2005; Askoa-Ibizate, 2004; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antigüedad, 1980; Gaspari *et al.*, 2012). Además, los rangos de este parámetro han sido de mucha utilidad en la clasificación de cuencas por su geometría, tal como el que se plasma en el cuadro 2 (Henaos, 1988). Este parámetro, por ser descriptor más eficaz de la forma de la cuenca, es un buen referente de similitud geométrica entre sistemas hidrológicos.

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos se puede inferir entonces que: “dos o más sistemas hidrológicos son geoméricamente semejantes si tienen igual índice de Gravelius”. Conviene resaltar que el término “igual” no tiene connotación matemática, sino simplemente el de una “igualdad hidrológica”, que al igual que en estadística, se acepta con cierto nivel de aproximación válida para fines prácticos.

Las microcuencas de forma oval concentran más rápidamente los flujos superficiales, generando picos súbitos violentos y recesiones rápidas ante tormentas extraordinarias, características que favorecen la escorrentía directa y la erosión hídrica, en detrimento de la recarga de acuíferos, contrariamente al comportamiento de las cuencas alargadas (Ibáñez, Moreno, & Gisberbert, 2005; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antigüedad, 1980; Gaspari *et al.*, 2012; Gaspari, 2002; Martínez, 1986).

### Parámetro adimensional de escurrimiento instantáneo

Está dado por el parámetro adimensional de la ecuación (4), donde sustituyendo el primer miembro por un coeficiente de escorrentía directa ( $\pi_4 = C$ ), se convierte en la ecuación

del vetusto método Racional (7); metodología sencilla, aún vigente, para estimar descargas máximas (picos de hidrogramas), a partir de datos de precipitación (Chow, 1993; Aparicio, 1997):

$$Q_{\text{máx}} = CIA \quad (7)$$

Donde:

- $Q_{\text{máx}}$  = caudal máximo de escorrentía directa.
- $C$  = coeficiente de escorrentía.
- $I$  = intensidad máxima de precipitación, inherente al tiempo de concentración de la cuenca.
- $A$  = área receptora-colectora proyectada sobre un plano horizontal.

### Parámetro adimensional de escurrimiento sostenido

Está dado por la ecuación (1), donde sustituyendo el primer miembro por un coeficiente promedio ( $K = \pi_1$ ) se transforma en la ecuación (8), expresión que puede usarse para la determinación de caudales promedio multianuales de escorrentía, que involucra a las componentes de escorrentía directa y subterránea (Chow, 1993; Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, s.f.); Aparicio, 1997):

$$Q = KAP \quad (8)$$

Donde:

- $Q$  = caudal promedio en el periodo considerado.
- $A$  = área de la cuenca receptora-colectora de precipitaciones.
- $P$  = “Precipitación efectiva” en el periodo considerado.
- $K$  = coeficiente de escorrentía.

Cuadro 2. Formas estándar de cuencas con base en el índice de Gravelius.

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
$K_{c1}$	$1 < K_c \leq 1.25$	Oval redonda
$K_{c2}$	$1.25 < K_c \leq 1.50$	Oval oblonga
$K_{c3}$	$1.50 < K_c \leq 1.75$	Oblonga alargada

El término “precipitación efectiva”, por tratarse de periodos más largos, obviamente, incluye pérdidas por evapotranspiración real y almacenamiento en el suelo.

### Parámetro adimensional orográfico y semejanza dinámica

Está representado por la ecuación (2), donde elevando al cuadrado ambos miembros resulta el parámetro adimensional de la ecuación (9), conocido como coeficiente orográfico,  $C_o$  ( $\pi^2 = C_o$ ), parámetro asociado con las fuerzas gravitacionales de los flujos superficiales y, por ende, con los potenciales de erosión hídrica y de generación de energía hidráulica (Henaos, 1988):

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (9)$$

Los sistemas altoandinos de relieve escarpado, ubicados a gran altitud, tienen coeficientes orográficos muy altos, siendo indicativos de una gran capacidad erosiva y de transporte de sedimentos (Henaos, 1988). Por todo ello, se considera que este parámetro constituye un buen referente de similitud dinámica.

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos se puede inferir que: “dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes, dinámicamente, si tienen igual coeficiente orográfico”, con similar consideración del término “igual” que para el caso de semejanza geométrica.

### Parámetro de relación de confluencias promedio y semejanza cinemática

Este parámetro adimensional, influenciado también por el índice de Gravelius, describe la configuración espacial o geometría de la red de drenaje y expresa el grado de ramificaciones de la red (Askoa-Ibizate, 2004; Docampo, De Vikeña, Rico, & Rallo, 2009; Antiguiedad, 1980; Cruz-Santillán, & Tamés, 1983; Horton, 1945;

Gaspari, 2002). Se cuantifica mediante la aplicación de las ecuaciones (10) y (11), para lo cual es necesaria la categorización previa de la red de drenaje superficial, prefiriéndose la metodología de Horton (Antiguiedad, 1980; Cruz-Santillán, & Tamés, 1983; Gaspari *et al.*, 2012; Gravelius, 1914; Gaspari, 2002; Martínez, 1986).

Por la influencia que ejerce en la configuración espacial de la red de drenaje, se considera que la relación de confluencias promedio es un buen referente de la similitud cinemática de los sistemas hidrológicos.

$$r_c = \frac{n_i}{n_{i+1}} \quad (10)$$

$$R_C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ci} \quad (11)$$

Donde:

- $r_c$  = relación de confluencias parcial.
- $n_i$  = número de cursos naturales de orden  $i$ .
- $n_{i+1}$  = número de cauces de orden inmediatamente superior a  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$ ).
- $N$  = número de orden de la cuenca.
- $r_{ci}$  = cada uno de los “ $n$ ” valores parciales.
- $R_C$  = relación de confluencias promedio.

Por analogía, entre modelo y prototipo, se infiere que: “dos sistemas hidrológicos son semejantes, cinemáticamente, si tienen igual relación de confluencias promedio”, con la misma indicación del término “igual” que para los dos casos de semejanza anteriores.

### Parámetro adimensional de lluvia

Este parámetro, dado por la ecuación (3), describe las características de la precipitación pluviométrica sobre la cuenca como una variable con distribución espacial y temporal. Se observa que las mayores intensidades ocurren en periodos cortos de tiempo y a mayor altitud sobre el ni-

vel del mar y viceversa (Chow, 1993; Aparicio, 1997). Es muy importante en la generación de escorrentías máximas (caudales pico) a partir de datos de precipitación; pero, además, explica que en cuencas altoandinas la precipitación es dependiente de la altitud sobre el nivel del mar.

### Condición de semejanza hidráulica de sistemas hidrológicos

Por analogía, con la hidráulica de modelos físicos a escala, "dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes si cumplen simultáneamente las condiciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica", con cierto nivel de aproximación previamente adoptado.

### Parámetros adimensionales de transferencia

Establecida la similitud hidráulica entre sistemas, todos los parámetros adimensionales que controlan las leyes del fenómeno estudiado (ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5)) se convierten en funciones de transferencia, dependiendo en qué parámetro se ubique la variable de interés (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001).

En ocasiones, con el propósito de mejorar la calidad de transferencia, se pueden realizar combinaciones entre parámetros para obtener otro(s) parámetro adimensional(es) con mayor cantidad de variables, tal como el parámetro adimensional de la ecuación (12), resultado de combinar las ecuaciones (1) y (2), muy importante para transferir escorrentías (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001):

$$\pi_{12} = \frac{QH}{A^{3/2}P} \quad (12)$$

Aplicando el principio de similitud para una dupla de cuencas origen y destino, el parámetro adimensional de la ecuación (12) queda conforme lo establece la ecuación (13), o su equivalente

(15), en función de escalas (Streeter & Wilie, 2000; Sotelo-Ávila, 1977; Rodríguez Díaz, 2001):

$$\frac{Q_o H_o}{A_o^{3/2} P_o} = \frac{Q_d H_d}{A_d^{3/2} P_d} \quad (13)$$

Los subíndices de las variables del primer y segundo miembro de esta ecuación corresponden a los sistemas hidrológicos de origen y destino, respectivamente:

$$Q_d = \left( \frac{H_o}{H_d} \right) \left( \frac{P_d}{P_o} \right) \left( \frac{A_d}{A_o} \right)^{3/2} Q_o \quad (14)$$

$$Q_d = H_e^{-1} P_e A_e^{3/2} Q_o \quad (15)$$

Donde:

$H_e$  = escala de altitudes.

$P_e$  = escala de precipitaciones.

$A_e$  = escala de áreas.

$Q_o$  = caudal total en la cuenca de origen.

$Q_d$  = caudal total transferido a la cuenca destino.

Otras de las variables de mayor escasez son las intensidades de tormentas máximas, cuya función de transferencia se obtiene a partir de la ecuación (3), la que mediante el principio de similitud se convierte en la ecuación (16) o su equivalente (17), en función de escalas:

$$\frac{I_o t_o}{H_o} = \frac{I_d t_d}{H_d} \quad (16)$$

$$I_d = \left( \frac{H_d}{H_o} \right) \left( \frac{t_o}{t_d} \right) I_o = H_e t_e^{-1} I_o \quad (17)$$

Donde:

$I_d$  = intensidad de precipitación en la cuenca destino.

$I_o$  = intensidad de precipitación en la cuenca de origen.

$t_e$  = escala de periodos de duración.

$H_e$  = escala de altitudes.

### Muestra de microcuencas altoandinas- región Cajamarca

Se seleccionaron aleatoriamente 70 microcuencas altoandinas de la región Cajamarca-Perú (cuadro 3), ubicadas en cabeceras de las vertientes del Pacífico y Atlántico, y desarrolladas por encima de los 1 500 msnm. Con el fin de controlar errores y costos en el presente estudio, se ha establecido un protocolo consistente en lo siguiente:

- Uso de mapas cartográficos a la misma escala, 1/100 000.
- Mapas cartográficos elaborados por una misma institución (IGN, Perú), como garantía de que se hayan usado los mismos criterios para su elaboración.
- Procesamiento de información cartográfica empleando la misma metodología para cada caso (delimitación de cuenca, área, perímetro, altitud, jerarquización de la red de drenaje, etc.). De preferencia, deben usarse modelos digitales de altitudes 3D y procedimientos en SIG.

- Estimación de variables involucradas en los parámetros adimensionales de semejanza, siguiendo la misma metodología para cada caso. Para la determinación de la altitud media sobre el nivel del mar se ha utilizado el método momentos estáticos de Varignon, dado por la ecuación (18) (Chow, 1993; Aparicio, 1997):

$$\bar{H} = \frac{1}{A} \sum_A \Delta A_i \bar{h}_i \quad (18)$$

Donde:

$\bar{H}$  = altitud media sobre el nivel del mar.

$A$  = área de la cuenca.

$\Delta A_i$  = área parcial entre curvas de nivel consecutivas.

$\bar{h}_i$  = promedio de cotas de las dos curvas de nivel que limitan cada área parcial.

La división de áreas parciales entre curvas de nivel de la cuenca de estudio se realizó en concordancia con la topografía y, generalmente, entre curvas maestras (Chow, 1993).

Cuadro 3. Parámetros de semejanza entre unidades hidrológicas altoandinas de la región Cajamarca, Perú.

Parámetros adimensionales de similitud hidráulica de microcuencas alto-andinas, región Cajamarca-Perú (escala 1/100 000)						
Microcuenca	A (km <sup>2</sup> )	N	K <sub>c</sub>	R <sub>c</sub>	C <sub>o</sub> (%)	Vertiente
1. Río Grande1	72.50	3	1.27	2.70	8.22	Atlántico
2. Qda. Tallal	14.00	2	1.23	2.68	44.6	Pacífico
3. Río Quismache	183.80	4	1.24	2.74	2.90	Atlántico
4. Río Grande2	456.50	4	1.27	2.75	2.68	Pacífico
5. Río Cospán	196.50	4	1.28	2.56	4.40	Pacífico
6. Río Porcón	81.60	3	1.16	1.88	11.03	Atlántico
7. Río La Leche	116.50	3	1.16	1.90	12.04	Atlántico
8. Río Huagayoc	12.50	2	1.15	1.85	72.02	Atlántico
9. Río Ronquillo	36.80	3	1.12	1.93	22.85	Atlántico
10. Río Mashcón	276.10	4	1.31	3.45	1.88	Atlántico
11. Río Chonta	352.80	4	1.32	3.73	1.55	Atlántico
12. Qda. Huertas	105.50	3	1.34	2.98	3.87	Pacífico
13. Qda. Chausis	207.30	4	1.38	2.67	3.80	Pacífico
14. Río Llaucán	595.00	4	1.41	2.55	0.89	Atlántico

Cuadro 3 (continuación). Parámetros adimensionales de similitud de micro cuencas de la región Cajamarca-Perú (Escala 1 / 100 000).

Microcuenca	A (km <sup>2</sup> )	N	$K_{c1,5258}$	$R_c$	$C_o$ (%)	Vertiente
15. Río Cascasén	114.20	4	1.42	3.12	6.88	Atlántico
16. Río Azufre	45.00	2	1.45	3.13	7.22	Atlántico
17. Río Poclush	882.50	5	1.56	3.20	4.82	Pacífico
18. Río Rejo*	201.40	4	1.58	3.16	4.93	Pacífico
19. Río San Juan-1	271.20	4	1.60	3.89	5.55	Pacífico
20. Qda. Onda	130.00	3	1.60	3.52	4.81	Atlántico
21. Río Magdalena	807.20	4	1.70	4.60	3.98	Pacífico
22. Río Naranjo	51.40	2	1.70	1.50	23.00	Pacífico
23. Río San Miguel	1 047.20	5	1.53	5.89	0.90	Pacífico
24. Río San Pablo	182.43	3	1.29	4.20	3.26	Pacífico
25. Río Chetillano	180.10	4	1.42	4.10	4.40	Pacífico
26. Río San Juan-2	638.43	4	1.21	4.35	1.16	Pacífico
27. Qda. Chantilla	94.49	3	1.31	3.25	6.51	Pacífico
28. Río Pallac	235.28	4	1.34	3.23	2.38	Pacífico
29. Río Contumazá	198.40	4	1.72	4.20	3.90	Pacífico
30. Qda. La Bamba	52.21	2	1.73	4.00	4.03	Pacífico
31. Qda. Chiminote	200.76	4	1.36	2.83	1.90	Pacífico
32. Qda. Nazario	30.90	2	1.19	2.00	8.32	Pacífico
33. Qda. La Ramada	19.14	2	1.18	1.00	8.64	Pacífico
34. Qda. Del Chorro	19.63	2	1.68	1.00	19.11	Pacífico
35. Qda. Cajón	22.15	2	1.17	1.00	4.06	Pacífico
36. Qda. La Ramada	34.67	2	1.33	3.00	3.00	Pacífico
37. Río LLapa	210.32	4	1.57	3.13	5.43	Pacífico
38. Qda. Honda	110.20	3	1.76	3.90	11.21	Pacífico
39. Río Tumbadén	309.30	4	1.37	3.56	3.71	Pacífico
40. Qda. El Cardo	29.92	3	1.26	1.76	17.63	Pacífico
41. Qda. Yamulán	59.85	3	1.23	2.25	12.27	Pacífico
42. Qda. Chorro Blanco	36.83	3	1.46	1.75	27.13	Pacífico
43. Río El Carrizo	111.64	4	1.39	2.72	9.50	Pacífico
44. Qda. Amillas	31.18	2	1.41	1.00	23.76	Pacífico
45. Qda. Del Qilengo	30.75	2	1.43	2.00	23.51	Pacífico
46. Río San Juan-3	204.35	4	1.72	3.89	4.07	Pacífico
47. Río Asunción	76.47	3	1.24	2.34	10.10	Pacífico
48. Río Pinche	21.03	2	1.34	1.00	32.35	Pacífico
49. Qda. Quinuas	65.38	2	1.49	7.00	11.94	Pacífico
50. Río Yaucán	49.91	2	1.37	3.00	15.97	Pacífico
51. Qda. Tallal	19.50	2	1.43	1.00	36.88	Pacífico
52. Río Namora	475.70	4	1.43	4.42	2.50	Atlántico
53. Río Huacararucu	136.90	4	1.29	3.83	8.51	Pacífico
54. Río Muyoc	319.26	4	1.41	3.38	3.28	Atlántico
55. Río Llantén	401.70	4	1.26	2.57	2.49	Atlántico
56. Río Sanagorán	608.10	4	1.42	4.35	2.03	Atlántico

Cuadro 3 (continuación). Parámetros adimensionales de similitud de micro cuencas de la región Cajamarca-Perú (Escala 1 / 100 000).

Microcuenca	A (km <sup>2</sup> )	N	$K_{c1,5258}$	$R_c$	$C_o$ (%)	Vertiente
57. Río Cañad	249.20	4	1.40	3.22	2.70	Pacífico
58. Qda. Pencayoc	243.4	4	1.49	4.50	4.65	Pacífico
59. Río Puerto Blanco	247.50	4	1.43	3.79	2.32	Atlántico
60. Río Chanta	97.20	3	1.40	3.73	4.40	Pacífico
61. Río Callayuc	346.74	4	1.42	3.92	2.96	Atlántico
62. Río Llantén	298.78	4	1.32	3.49	3.73	Pacífico
63. Río El Sauce	170.00	3	1.44	4.17	3.43	Atlántico
64. Río Chilca	84.87	3	1.46	4.17	13.00	Atlántico
65. Río Chancayano	598.04	4	1.48	6.63	1.55	Pacífico
66. Río San Juan-4	118.91	3	1.42	3.25	8.93	Atlántico
67. Río Llaucano	121.73	3	1.70	2.20	9.90	Atlántico
68. Río Gansul	100.37	3	1.32	3.58	8.30	Atlántico
69. Río San Juan Pampa	122.42	3	1.36	2.75	8.50	Pacífico
70. Río Jadibamba	243.45	4	1.49	4.50	4.65	Atlántico
<b>Media</b>	<b>1.40</b>	<b>3.13</b>	<b>9.42</b>			
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.1587</b>	<b>1.2242</b>	<b>11.6612</b>			
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0.1133</b>	<b>0.3911</b>	<b>1.2379</b>			

N = número de orden de la cuenca.

\*Modelo de manejo de cuenca piloto, forestación Granja Porcón.

### Identificación de microcuencas hidráulicamente similares

El protocolo establecido para la identificación o reconocimiento de sistemas hidrológicos altoandinos con similitud hidráulica se resume en las siguientes actividades:

- Estimación de parámetros morfométricos de similitud hidráulica: índice de Gravelius, relación de confluencias, coeficiente orográfico.
- Agrupación de microcuencas por su geometría, utilizando el criterio de rangos del índice de Gravelius del cuadro 2. Resulta obvio considerar que todas las unidades hidrológicas comprendidas en un mismo rango son geoméricamente semejantes.
- Se excluyen de cada grupo geométrico aquellas unidades hidrológicas más discrepantes, de tal modo que el coeficiente de variación del índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico no

exceda de 0.05, 0.20 y 0.30, respectivamente. Este nivel de aproximación, aceptado en la práctica, se justifica por los niveles de error cometidos en la estimación de variables y efectos de escala.

- Las unidades hidrológicas que quedan, luego del paso precedente, son microcuencas hidráulicamente similares.

### Transferencia de información hidrometeorológica

#### *Sistema hidrológico con información de tormentas máximas*

Para ilustrar la aplicación de transferencia de información mediante esta metodología, se tomó como sistema origen la microcuenca río Mashcón (cuadro 9), en cuya cuenca baja se ubica la estación pluviométrica Weberbauer (07° 10' S, 78° 30' W; altitud: 2 536 msnm) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamih-Perú), en las inmediaciones del cam-

pus universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca, estación que hasta hace muy poco tiempo era única en su género a nivel regional con registro de información pluviográfica.

El análisis de frecuencias de tormentas máximas anuales de 50 años de registro y el ajuste de datos al modelo de variable extrema Gumbel permitió modelar y simular las intensidades de máximas tormentas anuales, algunos de cuyos resultados se presentan en el cuadro 10 (Chow, 1993; Aparicio, 1997). No se incluye aquí el procedimiento de este análisis, por no ser objeto del presente estudio, sino el de simplemente transferir información.

### *Sistema hidrológico sin información de máximas tormentas*

Se seleccionó a priori la microcuenca del río Jadibamba (altitud media: 3 218 msnm), pero pudo haber sido cualquier otra del mismo grupo geométrico de similitud hidráulica que la cuenca origen (ver cuadro 9). Esta cuenca, así como otras de la región de estudio, carece de información de máximas tormentas, muy importante para cualquier proyecto de drenaje superficial y obras de captación (drenaje de carreteras, drenaje pluvial urbano, defensas ribereñas, presas de regulación, canales de riego, centrales hidroeléctricas, captaciones de aguas de lluvia, prevención de inundaciones, etc.).

Los datos pueden transferirse a cualquier punto de interés del sistema hidrológico destino; sin embargo, no existiendo preferencia particular, se optó, para efectos de la ilustración, el punto correspondiente a la altitud media de la cuenca destino (3 218 msnm).

## **Resultados**

### *Parámetros morfométricos adimensionales de similitud hidráulica*

Los resultados de los estudios de morfometría adimensional dan cuenta que se trata de una muestra bastante heterogénea, cuya variabilidad se percibe a través de los coeficientes de variación de cada uno de los parámetros adi-

mensionales de similitud hidráulica mostrados en el cuadro 3, donde la menor discrepancia corresponde al índice de Gravelius, seguido en forma ascendente por la relación confluencias y coeficiente orográfico, lo cual clarifica el orden de influencia de la geometría de la cuenca.

Los estadísticos del índice de Gravelius de 1.40, 0.1587 y 0.1133, para la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación, respectivamente, son indicadores de baja variabilidad de la forma geométrica y un alto predominio de la forma oval oblonga (media,  $K_c = 1.40$ ), sobre las otras dos formas geométricas (figura 1).

En cambio, los estadísticos de la muestra para la relación de confluencias dan cuenta de una mayor variabilidad ( $C_v = 39.11\%$ ) en la configuración de la red de drenaje, pero siempre coincidentemente inclinándose las mayores bifurcaciones a la forma oval oblonga de la cuenca promedio.

El caso extremo corresponde al coeficiente orográfico, cuya variabilidad es muy alta (123.79%), muy sensible con la ubicación de los sistemas respecto del nivel del mar.

### **Clasificación morfométrica de microcuencas**

Las unidades hidrológicas de la muestra fueron clasificadas de acuerdo con el criterio de rangos del índice de Gravelius plasmado en el cuadro 2, resultando los grupos siguientes:

#### *Microcuencas de la forma oval redonda*

Este grupo (cuadro 4), conformado por 12 unidades hidrológicas (17.1%), está caracterizado por tener tiempos de concentración relativamente cortos, generando hidrogramas de salida del tipo leptikúrtico, donde las crecidas efluentes son muy súbitas y violentas, con altos riesgos de inundaciones ante tormentas extraordinarias.

#### *Microcuencas de la forma oval oblonga*

Este grupo geométrico (cuadro 5), conformado por 44 microcuencas (62.9%), tiene característi-

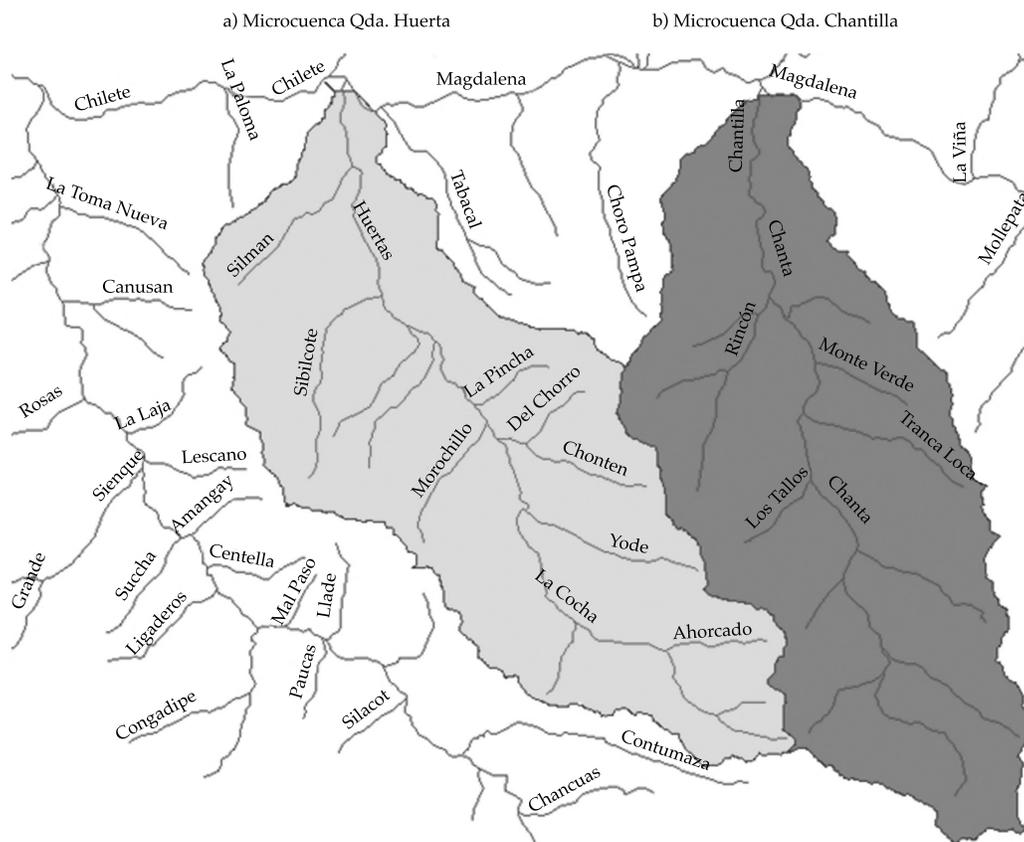


Figura 1. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos en la forma oval oblonga.

Cuadro 4. Grupo de microcuencas de la forma oval redonda.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1 < K_c \leq 1.25$	Forma de la cuenca
1. Qda. Tallal-1	1.23	Oval redonda
2. Río Quismache	1.24	Oval redonda
3. Río Porcón	1.16	Oval redonda
4. Río La Leche	1.16	Oval redonda
5. Río Hualgayoc	1.15	Oval redonda
6. Río Ronquillo	1.12	Oval redonda
7. Río San Juan-2	1.21	Oval redonda
8. Qda. Nazario	1.19	Oval redonda
9. Qda. La Ramada-1	1.18	Oval redonda
10. Qda. Cajón	1.17	Oval redonda
11. Qda. Yamulán	1.23	Oval redonda
12. Río Asunción	1.24	Oval redonda
<b>Media</b>	<b>1.18</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.0411</b>	
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0.0348</b>	

Cuadro 5. Grupo de microcuencas de la forma oval oblonga.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1.25 < K_c \leq 1.50$	Forma de la cuenca
1. Río Grande 1	1.27	Oval oblonga
2. Río Grande 2	1.27	Oval oblonga
3. Río Cospán	1.28	Oval oblonga
4. Río Mashcón	1.31	Oval oblonga
5. Río Chonta	1.32	Oval oblonga
6. Qda. Huertas	1.34	Oval oblonga
7. Qda. Chausís	1.38	Oval oblonga
8. Río Llaucán	1.41	Oval oblonga
9. Río Cascasén	1.42	Oval oblonga
10. Río Azufre	1.45	Oval oblonga
11. Río San Pablo	1.29	Oval oblonga
12. Río Chetillano	1.42	Oval oblonga
13. Qda. Chantilla	1.31	Oval oblonga
14. Río Pallac	1.34	Oval oblonga
15. Qda. Chiminote	1.36	Oval oblonga
16. Qda. La Ramada-2	1.33	Oval oblonga
17. Río Tumbadén	1.37	Oval oblonga
18. Qda. El Cardo	1.26	Oval oblonga
19. Qda. Chorro Blanco	1.46	Oval oblonga
20. Río El Carrizo	1.39	Oval oblonga
21. Qda. Amillas	1.41	Oval oblonga
22. Qda. Del Qilengo	1.43	Oval oblonga
23. Río Pinche	1.34	Oval oblonga
24. Qda. Quinuas	1.49	Oval oblonga
25. Río Yaucán	1.37	Oval oblonga
26. Quebrada Tallal-2	1.43	Oval oblonga
27. Río Namora	1.43	Oval oblonga
28. Río Huacrarucro	1.29	Oval oblonga
29. Río Muyoc	1.41	Oval oblonga
30. Río Llantén	1.26	Oval oblonga
31. Río Sanagorán	1.42	Oval oblonga
32. Río Cañad	1.40	Oval oblonga
33. Qda. Pencayoc	1.49	Oval oblonga
34. Río Puerto Blanco	1.43	Oval oblonga
35. Río Chanta	1.40	Oval oblonga
36. Río Callayuc	1.42	Oval oblonga
37. Río Llantén	1.32	Oval oblonga
38. Río El Sauce	1.44	Oval oblonga
39. Río Chilca	1.46	Oval oblonga
40. Río Chancayano	1.48	Oval oblonga
41. Río San Juan-4	1.42	Oval oblonga
42. Río Ganzul	1.32	Oval oblonga
43. Río San Juan Pampa	1.36	Oval oblonga
44. Río Jadibamba	1.49	Oval oblonga
<b>Media</b>	<b>1.38</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.0677</b>	
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0.0491</b>	

cas hidrológicas muy parecidas a las del grupo oval redonda, pero con respuestas ligeramente menos intensas ante tormentas extraordinarias. Es la geometría de cuencas con mayor presencia en la región de estudio (figura 1).

#### *Microcuencas de la forma oblonga alargada*

Este grupo (cuadro 6), conformado por 14 unidades hidrológicas (20%), se caracteriza porque los tiempos de concentración son relativamente mayores que en las dos formas anteriores, generando hidrogramas de crecidas efluentes del tipo platicúrtico, con caudales más sostenidos y recesiones más duraderas. A diferencia de los dos tipos de geometría anteriores, en este caso las condiciones para la recarga de acuíferos son más favorables y las pérdidas por escorrentía directa menores (figura 2).

En los tres grupos de clasificación, el coeficiente de variación cayó estrepitosamente por debajo de 5% respecto de su valor muestral (11.3%), lo cual confirma la solidez del criterio de esta clasificación.

### Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos

En cada cuadro de clasificación geométrica anterior se han identificado, por descarte, los sistemas con similitud hidráulica, teniendo en cuenta el límite de error establecido para cada uno de los parámetros de similitud hidráulica.

#### *Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de forma oval redonda*

En el grupo de esta forma se identificaron cuatro microcuencas con similitud hidráulica (cuadro 7), que representan 33.3% del total del grupo y sólo 5.7% del total de la muestra.

#### *Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de la forma oblonga alargada*

Dentro de esta clase geométrica se identificaron siete microcuencas con similitud hidráulica (cuadro 8), equivalente a 50% del total del grupo y sólo el 10% del total de la muestra.

Cuadro 6. Grupo de microcuencas de la forma oblonga alargada.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1.50 < K_c \leq 1.75$	Forma de la cuenca
1. Río Poclush	1.56	Oblonga alargada
2. Río Rejo'	1.58	Oblonga alargada
3. Río San Juan-1	1.60	Oblonga alargada
4. Qda. Onda	1.60	Oblonga alargada
5. Río Magdalena	1.70	Oblonga alargada
6. Río Naranjo	1.70	Oblonga alargada
7. Río San Miguel	1.53	Oblonga alargada
8. Río Contumazá	1.72	Oblonga alargada
9. Qda. Bamba	1.73	Oblonga alargada
10. Qda. Del Chorro	1.68	Oblonga alargada
11. Río Llapa	1.57	Oblonga alargada
12. Qda. Honda	1.76	Oblonga alargada
13. Río San Juan-3	1.75	Oblonga alargada
14. Río Llaucano	1.70	Oblonga alargada
<b>Media</b>	<b>1.65</b>	
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.0761</b>	
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0.0461</b>	

\*Modelo de manejo de cuenca piloto, forestación Granja Porcón.

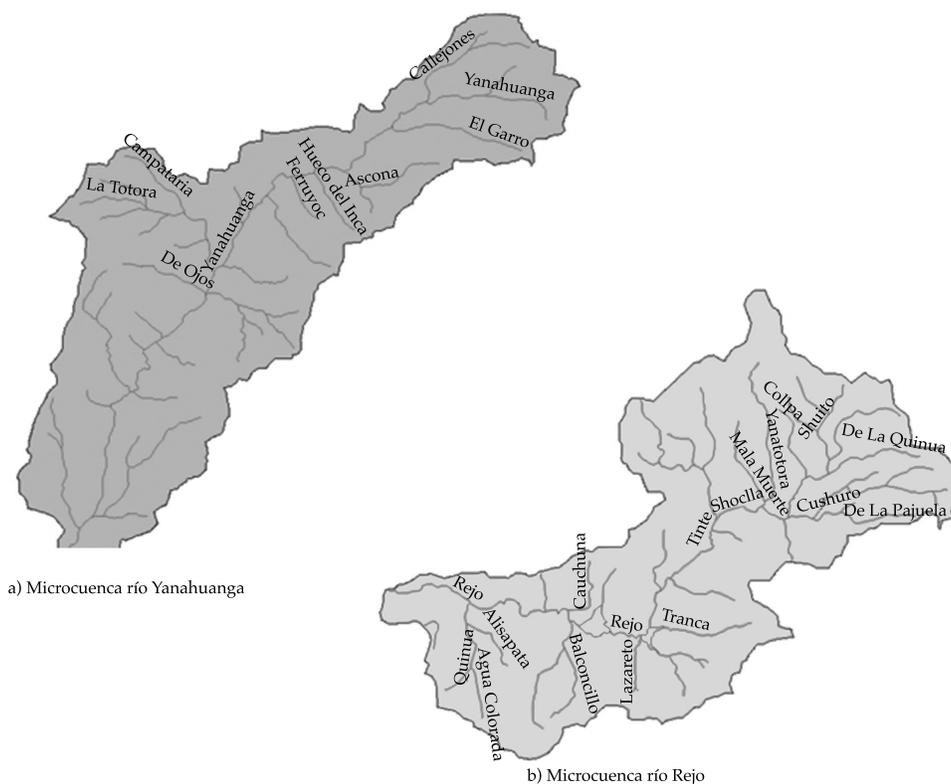


Figura 2. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos en la forma oblonga alargada.

Cuadro 7. Microcuencas altoandinas de la forma oval redonda con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1.00 < K_c \leq 1.25$	Relación de confluencias ( $R_c$ )	Coefficiente orográfico (%) ( $C_o$ )	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Porcón	1.16	1.88	11.83	Oval redonda	Pacífico
2. Río La leche	1.16	1.90	12.04	Oval redonda	Atlántico
3. Qda. Yamulán	1.23	2.25	12.27	Oval redonda	Pacífico
4. Río Asunción	1.24	2.34	10.90	Oval redonda	Pacífico
<b>Media</b>	<b>1.20</b>	<b>2.10</b>	<b>11.76</b>		
<b>Desv. estándar</b>	<b>0.0435</b>	<b>0.2368</b>	<b>0.1941</b>		
<b>Coef. variación</b>	<b>0.0363</b>	<b>0.1128</b>	<b>0.0165</b>		

### Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos de la forma oval oblonga

En este tipo de geometría se identificaron 23 unidades hidrológicas hidráulicamente similares (cuadro 9), equivalentes a 52.3% del total del grupo y a 32.9% de la totalidad de la muestra. Se aprecia claramente la supremacía absoluta

de similitud hidráulica de microcuencas de esta geometría, estadística que no sólo refleja la significativa presencia de unidades hidrológicas de esta geometría, sino también la alta tendencia de similitud hidráulica dentro de su misma clase o grupo.

Es importante destacar que en los tres grupos geométricos, la cantidad porcentual de unidades

Cuadro 8. Microcuencas altoandinas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1.50 < K_c \leq 1.75$	Relación de confluencias ( $R_c$ )	Coefficiente orográfico (%) ( $C_o$ )	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Poclush	1.56	3.20	4.82	Oblonga alargada	Pacífico
2. Río Rejo	1.58	3.16	4.93	Oblonga alargada	Pacífico
3. Qda. Onda	1.60	3.52	4.91	Oblonga alargada	Atlántico
4. Río Magdalena	1.70	4.60	3.98	Oblonga alargada	Pacífico
5. Río Contumazá	1.72	4.20	3.90	Oblonga alargada	Pacífico
6. Qda. Bamba	1.73	4.00	4.03	Oblonga alargada	Pacífico
7. Río San Juan-3	1.7	3.29	4.07	Oblonga alargada	Pacífico
<b>Media</b>	<b>1.66</b>	<b>3.71</b>	<b>4.38</b>		
<b>Desv. estándar</b>	<b>0.0797</b>	<b>0.5614</b>	<b>0.4806</b>		
<b>Coef. variación</b>	<b>0.0479</b>	<b>0.1513</b>	<b>0.1098</b>		

hidrológicas con tendencia a la similitud hidráulica en el mismo grupo de clase está siempre por encima de 33%; porcentaje muy significativo si se hace extensivo a la región de estudio.

### Transferencia de información hidrometeorológica

#### *Sistema hidrológico de origen con información de tormentas máximas*

La simulación del modelo probabilístico Gumbel, calibrado mediante técnicas estadísticas de mejor ajuste, permitió la generación de información con la más diversa gama de probabilidades de ocurrencia; algunos de estos resultados se presentan en el cuadro 10, información que corresponde a la ubicación de la estación pluviométrica Weberbauer en la cuenca baja de la unidad hidrológica río Mashcón (2 536 msnm).

#### *Sistema hidrológico destino sin información de tormentas máximas*

Teniendo como información de partida los datos del cuadro 10, la ubicación de la estación Weberbauer (2 536 msnm) en la cuenca baja del río Mashcón y la altitud media de la microcuenca destino río Jadibamba (3 218 msnm), mediante la aplicación de la función de transferencia de la ecuación(17), considerando que los periodos de

duración estándar de las intensidades se mantienen (escala tiempos,  $t_e = 1$ ), y que la escala de altitudes es  $H_e = 1.27$ , se obtuvieron los datos transferidos del cuadro 11.

### Discusión

#### *De las características morfométricas adimensionales de la muestra*

La muestra está caracterizada por el distinto grado de variabilidad de los parámetros de similitud hidráulica, denotado por los coeficientes de variación de 11.3, 39.1 y 123.8%, correspondientes al índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, respectivamente. Comportamiento que indica el grado de influencia que tiene la forma de la cuenca sobre la configuración de la red de drenaje y los factores de relieve en el mismo orden.

La mayor proximidad entre valores de los coeficientes de variación del índice de Gravelius (11.3%) y relación de confluencias (39.1) es indicador de la mayor influencia que tiene la forma de la cuenca sobre la configuración de la red de drenaje.

Las microcuencas con la más alta vulnerabilidad a la degradación hídrica (mayores valores del coeficiente orográfico) y con elevada capacidad de drenaje superficial (redes de drenaje con mayores bifurcaciones), se concentran

Cuadro 9. Microcuencas altoandinas de la forma oval oblonga con similitud hidráulica.

Microcuenca	Coefficiente de Gravelius $1.25 < K_c \leq 1.50$	Relación de confluencias ( $R_c$ )	Coefficiente orográfico (%) ( $C_o$ )	Forma de microcuenca	Vertiente
1. Río Grande 2	1.27	2.75	2.68	Oval-oblonga	Pacífico
2. Río Cospán	1.28	2.56	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
3. Río Mashcón	1.31	3.45	1.88	Oval-oblonga	Atlántico
4. Río Chonta	1.32	3.73	1.55	Oval-oblonga	Atlántico
5. Qda. Huertas	1.34	2.98	3.87	Oval-oblonga	Pacífico
6. Qda. Chausís	1.38	2.67	3.80	Oval-oblonga	Pacífico
7. Río Pallac	1.34	3.23	2.38	Oval-oblonga	Pacífico
8. Qda. Chiminote	1.36	2.83	1.90	Oval-oblonga	Pacífico
9. Qda. La Ramada 2	1.33	3.00	3.00	Oval-oblonga	Pacífico
10. Río Tumbadén	1.37	3.56	3.71	Oval-oblonga	Pacífico
11. Río Llantén 1	1.26	2.57	2.49	Oval-oblonga	Atlántico
12. Río Cañada	1.40	3.22	2.70	Oval-oblonga	Pacífico
13. Río Puerto Blanco	1.43	3.79	2.32	Oval-oblonga	Atlántico
14. Río Chanta	1.40	3.73	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
15. Río Callalluc	1.42	3.92	2.96	Oval-oblonga	Atlántico
16. Río Llantén 2	1.32	3.49	3.73	Oval-oblonga	Atlántico
17. Río Muyoc	1.41	3.38	3.28	Oval-oblonga	Pacífico
18. Río El Sauce	1.44	4.17	3.43	Oval-oblonga	Atlántico
19. Río Namora	1.43	4.42	2.50	Oval-oblonga	Atlántico
20. Río Sanagorán	1.42	4.35	2.03	Oval-oblonga	Atlántico
21. Río San Pablo	1.29	4.20	3.26	Oval-oblonga	Pacífico
22. Río Chetillano	1.42	4.10	4.40	Oval-oblonga	Pacífico
23. Río Jadibamba	1.49	4.50	4.65	Oval-oblonga	Atlántico
<b>Promedio</b>	<b>1.37</b>	<b>3.50</b>	<b>3.10</b>		
<b>Desv. estándar</b>	<b>0.062</b>	<b>0.617</b>	<b>0.909</b>		
<b>Coef. variación</b>	<b>0.0457</b>	<b>0.1761</b>	<b>0.2932</b>		

mayormente en la cabecera de la vertiente del Pacífico.

#### *De la influencia de la geometría de la cuenca*

El resultado de clasificar las cuencas por su geometría arrojó 12 de la forma oval redonda (17%), 44 de la forma oval oblonga (63%) y 14 de la forma oblonga alargada (20%). La presencia superlativa de la forma oval (80%) en la muestra regional evidencia la primacía de sistemas altamente vulnerables a la erosión hídrica, pérdidas excesivas por escorrentía superficial y capaci-

dades muy altas de erosión y de transporte de sedimentos.

En cada grupo de clasificación, el coeficiente de variación del índice de Gravelius está por debajo de 5%, lo cual evidencia la solidez del criterio de clasificación mediante rangos del índice de Gravelius.

La caída estrepitosa del coeficiente de variación del índice de Gravelius en cada grupo de clasificación (menos del 5%), respecto de su valor muestral (11.3%) corrobora una vez más la gran influencia de la geometría de la cuenca en la similitud hidráulica.

Cuadro 10. Intensidades máximas de precipitación-estación pluviométrica Weberbauer (altitud: 2 536 msnm), microcuenca del río Mashcón.

N	J (%)	Tr (años)	Intensidades máximas (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	∞	-	-	-	-	-
5	1	498.0	156.9	109.6	58.9	36.3	23.8
	2	248.0	147.0	103.2	55.4	34.1	22.2
	5	98.0	133.7	94.7	50.8	31.1	20.0
	10	48.0	123.4	88.2	47.2	28.7	18.4
	15	31.3	117.2	84.2	45.0	27.4	17.3
	20	22.9	112.7	81.3	43.4	26.3	16.6
	25	17.9	109.1	79.0	42.2	25.5	16.0
	30	14.5	106.0	77.0	41.1	24.8	15.5
	40	10.3	100.9	73.8	39.3	23.6	14.7
	50	7.7	96.4	71.0	37.8	22.7	13.9
	60	6.0	92.6	68.5	36.4	21.8	13.3
	70	4.7	88.7	66.0	35.1	20.1	12.7
	80	3.6	84.3	63.2	33.5	19.9	12.0
90	2.7	79.3	60.0	31.8	18.8	11.1	
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00	∞	-	-	-	-	-
10	1	995.5	165.5	115.9	62.4	38.6	25.5
	2	495.4	156.8	109.5	58.9	36.3	23.8
	5	195.5	143.6	101.0	54.2	33.3	21.6
	10	95.4	133.3	94.5	50.6	31.0	20.0
	15	62.0	127.1	90.5	48.5	29.6	19.0
	20	45.3	122.6	87.6	46.9	28.6	18.2
	25	35.3	119.0	85.3	45.6	27.7	17.6
	30	28.5	115.8	83.3	44.6	27.0	17.1
	40	20.1	110.8	80.1	42.8	25.9	16.3
	50	14.9	106.4	77.3	41.2	24.9	15.6
	60	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9
	70	8.8	98.5	72.2	38.5	23.1	14.3
	80	6.7	94.3	69.6	37.0	22.2	13.6
90	4.9	89.4	66.4	25.3	21.1	12.8	
	100	1.0	-	-	-	-	-
	00						
25	1	2 488.0	179.9	124.2	66.9	41.5	27.6
	2	1 238.0	169.9	117.9	63.4	39.3	26.0
	5	487.9	156.6	109.4	58.8	36.3	23.8
	10	237.8	146.4	102.8	55.2	33.9	22.1
	15	154.3	140.2	98.9	53.1	32.5	21.1
	20	112.5	135.6	96.0	51.5	31.5	20.4
	25	87.4	132.0	93.7	50.2	30.7	19.8
	30	70.6	129.0	91.7	49.1	30.0	19.3
	40	49.4	123.8	88.4	47.3	28.8	18.4
	50	36.6	119.5	85.7	45.8	27.9	17.7
	60	27.8	115.5	83.1	44.4	27.0	17.6
	70	21.3	111.6	80.6	43.1	26.1	16.4
	80	16.0	107.4	78.0	41.6	25.1	15.7
90	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9	
	100	1.0	-	-	-	-	-

N es periodo de años consecutivos; J, incertidumbre; Tr, tiempo de retorno.

Cuadro 11. Intensidades máximas de precipitación transferidas a la microcuenca río Jadibamba (altitud media: 3 218 msnm).

N	J (%)	Tr (años)	Intensidades máximas (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	$\infty$	-	-	-	-	-
5	1	498.0	199.3	139.2	74.8	46.1	30.2
	2	248.0	186.7	131.1	70.4	43.3	28.2
	5	98.0	169.8	120.3	64.5	39.5	25.4
	10	48.0	156.7	112.0	59.9	36.4	23.4
	15	31.3	148.8	106.9	57.2	34.8	22.0
	20	22.9	143.1	103.2	55.1	33.4	21.1
	25	17.9	138.6	100.3	53.6	32.4	20.3
	30	14.5	134.6	97.8	52.2	31.5	19.7
	40	10.3	128.1	93.7	49.9	30.0	18.7
	50	7.7	122.4	90.2	48.0	28.8	17.7
	60	6.0	117.6	87.0	46.2	27.7	17.0
	70	4.7	112.6	83.8	44.6	25.5	16.1
	80	3.6	106.9	80.3	42.5	25.3	15.2
90	2.7	100.7	76.2	40.4	23.9	14.1	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00	$\infty$	-	-	-	-	-
10	1	995.5	210.2	147.2	79.2	49.0	32.4
	2	495.4	199.1	139.1	74.8	46.1	30.2
	5	195.5	182.4	128.3	68.8	42.3	27.4
	10	95.4	169.3	120.0	64.3	39.4	25.4
	15	62.0	161.4	114.9	61.6	37.6	24.1
	20	45.3	155.7	111.3	59.6	36.3	23.1
	25	35.3	151.1	108.3	57.9	35.2	22.4
	30	28.5	147.1	105.8	56.6	34.3	21.7
	40	20.1	140.7	101.7	54.4	32.9	20.7
	50	14.9	135.1	98.2	52.3	31.6	19.8
	60	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9
	70	8.8	125.1	91.7	48.9	29.3	18.2
	80	6.7	119.8	88.4	47.0	28.2	17.3
90	4.9	113.5	84.3	32.1	26.8	16.3	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00						-
25	1	2 488.0	228.5	157.7	85.0	52.7	35.0
	2	1 238.0	215.8	149.7	80.5	49.9	33.0
	5	487.9	198.9	138.9	74.7	46.1	30.2
	10	237.8	185.9	130.6	70.1	43.0	28.1
	15	154.3	178.0	125.6	67.4	41.3	26.8
	20	112.5	172.2	121.9	65.4	40.0	25.9
	25	87.4	167.6	119.0	63.8	39.0	25.1
	30	70.6	163.8	116.5	62.4	38.1	24.5
	40	49.4	157.2	112.3	60.1	36.6	23.4
	50	36.6	151.8	108.8	58.2	35.4	22.5
	60	27.8	146.7	105.5	56.4	34.3	22.4
	70	21.3	141.7	102.4	54.7	33.1	20.8
	80	16.0	136.4	99.1	52.8	31.9	19.9
90	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9	
100	1.0	-	-	-	-	-	

N es periodo de años consecutivos; J, incertidumbre; Tr, tiempo de retorno.

### De la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos

La frecuencia con que se da la similitud hidráulica en cada grupo geométrico bajo los límites establecidos es de 52, 50 y 33%, correspondiente a la forma oval oblonga, oblonga alargada y oval redonda, respectivamente, lo que demuestra una tendencia importante a la similitud hidráulica dentro de cada grupo. Sin embargo, respecto a la muestra, estos porcentajes se reducen a 33, 10 y 6% en el mismo orden citado, donde se vuelve a notar el amplio predominio de similitud hidráulica en las cuencas de la forma oval oblonga.

El grado de aproximación de la similitud, en cambio, es mayor en cuencas de forma oval redonda, seguido por la forma oval alargada y oval oblonga respecto al límite fijado para cada parámetro de similitud hidráulica.

### De la transferencia de información hidrometeorológica

En general, la información de intensidades correspondientes a máximas tormentas es muy escasa, pero a su vez muy útil para generar escurrientías máximas partiendo de esta información en microcuencas sin datos hidrométricos de máximas avenidas. Esta metodología resuelve, de manera sencilla, el problema en cuencas con similitud hidráulica.

La selección de la variable de diseño (cuadros 10 y 11) —donde existe una gama muy amplia de opciones en cuanto a periodos de vida útil ( $N$ ), incertidumbre ( $J$ ), tiempos de retorno ( $T_r$ ) y periodo de duración, acorde con el tiempo de concentración de la superficie receptora/colectora— permite adecuarla a la naturaleza e importancia de cualquier proyecto hidráulico.

Finalmente, utilizando otra de las leyes de los sistemas hidrológicos altoandinos, dado el parámetro adimensional de la ecuación (3), de donde se deriva el método Racional, permite convertir o transformar la intensidad de precipitación en escurrientía.

### Conclusiones

Las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos con base en el fenómeno precipitación-escurrientía se rigen por la morfometría adimensional representada por las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), cuyo conjunto constituye la base científica de esta metodología.

El trípode sobre el que descansa la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos está conformado por el índice de Gravelius, relación confluencias y coeficiente orográfico, como garantía de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, respectivamente, bajo niveles de aproximación previamente establecidos.

Para los niveles de aproximación de similitud aceptables para fines prácticos medidos mediante el coeficiente de variación pueden tomarse como máximos referenciales los valores de 0.05, 0.20 y 0.30, para el índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, respectivamente. Sin embargo, esto queda a criterio del investigador, según sus intereses.

La metodología aquí desarrollada, por su naturaleza adimensional, puede aplicarse a cualquier región o interregiones, subnacionales o internacionales, siempre y cuando cumplan las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos (ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5)).

Los estudios de regionalización morfométrica pueden ayudar, en gran medida, a solucionar problemas de escasez de información hidrometeorológica con fines de manejo integral de cuencas hidrográficas piloto, que sean motivo de réplica en cuencas similares, que coadyuven a enfrentar fenómenos de cambio climático global, incluyendo fenómenos extremos de El Niño.

El intercambio de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos similares, mediante técnicas de morfometría adimensional, es un proceso sencillo a diferencia de otras metodologías de análisis regional, las que requieren de mucha información distribuida en espacio y tiempo para conseguir resultados aceptables.

Este estudio muestral de morfometría adimensional de la región Cajamarca reporta un amplio predominio de sistemas hidrológicos con altos potenciales de erosión hídrica (80%), traducido en una excesiva capacidad de drenaje superficial y de transporte de sedimentos y, por tanto, altos riesgos de peligrosidad de inundaciones ante eventos pluviométricos extraordinarios, acrecentándose con la presencia de eventos extraordinarios de fenómenos de El Niño.

## Referencias

- Antigüedad, I. (1980). Estudio morfométrico de la cuenca del río Arratia (Viscaya). *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 66, 31-52.
- Aparicio, M. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie* (303 pp.). Barcelona: Limusa, S. A.
- Askoa-Ibizate, G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGE*, 38, 311-329.
- Chow, V. T. (1993). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill.
- Cruz-Santillán, J., & Tamés, P. (1983). Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río Deba. *Lurralde*, 6, 95-117.
- Docampo, B. G., De Vikeña, E., Rico, E., & Rallo, A. (2009). *Morfometría de las cuencas de la red hidrográfica (País Vasco, España)*. España: Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco.
- Gaspari, F. G. (2002). *Plan de ordenamiento territorial de cuencas degradadas*. Aplicación de SIG (179 pp.). Huelva, España / Buenos Aires: Ediciones Cooperativas.
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Deldado, M. I., & Besterio, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. VII Congreso de Medio Ambiente AUGM, del 22 al 24 de mayo de 2012, UNLP, La Plata, Argentina.
- Gravelius, H. (1914). *Morphometry of Drainage Bassins*. Amsterdam: Elsevier.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisberbert, J. (2005). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Recuperado de [ruinet.upv.es/bitstream/](http://ruinet.upv.es/bitstream/)
- Henaos, J. E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas* (396 pp.). Bogotá: Universidad Santo Tomás, Centro de Enseñanza Desescolarizada.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- ICOLD (2008). *International Commission of Large Dams*, ICOLD. Recuperado de <http://www.icoldcigb.net/>, <http://www.dams.org>.
- Jimenez, O. & Fariás, H. (2005). Problemática de la sedimentación del embalse Valdesia, República Dominicana. Santo Domingo: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI).
- Martínez, J. (1986). Características morfométricas de la red de drenaje de algunas cuencas de la sierra de los Álamos (Moratalla, Murcia). *Papeles de Geografía Física*, 11, 45-51.
- Rocha, A. (2006). *Problemática de la sedimentación de embalses en el aprovechamiento de los ríos peruanos, aplicada al embalse de Poechos*. I Congreso Internacional de Hidráulica, Saneamiento y Medio Ambiente, Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG), Lima, Perú. Recuperado de <http://www.imefen.uni.edu.pe>.
- Rodríguez-Díaz, H. A. (2001). *Hidráulica experimental* (337 pp.). Santafé de Bogotá: Centro Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Senciales, J. (2005). *El Análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico*. Málaga, España: Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. Recuperado de [dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf](http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf).
- Sotelo-Ávila, G. (1977). *Hidráulica general. Vol. I. Fundamentos* (551 pp.). México, DF: Limusa.
- Streeter, V., & Wilie, E. (2000). *Mecánica de fluidos* (9a edición). Santafé de Bogotá: McGraw Hill Internacional, S.A.
- Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín (s.f.) *HidroSIG*. Medellín: Escuela de Ciencias y Medio Ambiente. Recuperado de [www.medellin.unal.edu.co/hidroSIG](http://www.medellin.unal.edu.co/hidroSIG).
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Buenos Aires: Ediciones Alfa Omega.

## Dirección institucional del autor

Mg. Oswaldo Ortiz Vera

Universidad Nacional Agraria La Molina  
Apdo. 456-La Molina, Lima, PERÚ  
Teléfono: +51 (016) 3495 647  
Fax: +51 (016) 3495 670  
[ingoov@gmail.com](mailto:ingoov@gmail.com)  
[pdrh@glamolina.edu.pe](mailto:pdrh@glamolina.edu.pe)  
[pdrh.epg@gmail.com](mailto:pdrh.epg@gmail.com)



Haga clic aquí para escribir al autor

# Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos

• Iván Vilchis-Mata\* • Khalidou M. Bâ • Roberto Franco-Plata •  
• Carlos Díaz-Delgado •

Universidad Autónoma del Estado de México

\*Autor de correspondencia

## Resumen

Vilchis-Mata, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (julio-agosto, 2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 45-60.

En este trabajo se evalúa la integración de datos a nivel diario de precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos, tales como estaciones meteorológicas automáticas (EMA), radar meteorológico banda C de Cerro Catedral y sistemas satélites *PERSIANN* y *CMORPH*, dentro del modelo hidrológico distribuido *CEQUEAU*, con una resolución espacial de  $27 \times 27 \text{ km}^2$ , para el periodo comprendido del año 2003 a 2009, implementado en México, en la cuenca del río Amacuzac. Estas estimaciones permitieron simular caudales a nivel diario, cuyo desempeño de la modelación hidrológica fue evaluado mediante el criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe, técnicas gráficas, calibración y validación. Los resultados indican que los valores de los criterios utilizados son aceptables tanto en la comparativa con las precipitaciones diarias observadas como en las simulaciones de caudales, obteniendo valores de Nash interanuales medios diarios en el caso del radar 0.60, *PERSIANN* 0.81, EMA 0.83 y *CMORPH* 0.85, respecto a los interanuales medios mensuales, para el radar 0.90, *PERSIANN* 0.91, EMA's 0.92 y *CMORPH* 0.95. Por tal motivo es posible afirmar la utilidad de la combinación de estas herramientas tecnológicas como una solución a la escasez de datos de precipitación, estableciendo procesos automatizados y en tiempo real que permitan el desarrollo de análisis y toma decisiones.

**Palabras clave:** estimación de precipitación, radar meteorológico, satélite meteorológico, *CEQUEAU*, *PERSIANN*, *CMORPH*, modelación hidrológica.

## Abstract

Vilchis-Mata, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (July-August, 2015). *Hydrological Modeling based on Rainfall Estimates using Hydrometeorological Sensors*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 45-60.

This work assesses the integration of daily rainfall data from hydrometeorological sensors in the Amacuzac River basin, Mexico, for the period 2003 to 2009. It includes data from automated weather stations (AWS), C-band weather radar in the Cerro Catedral and *PERSIANN* and *CMORPH* satellite systems, in the *CEQUEAU* distributed hydrological model, with a spatial resolution of  $27 \times 27 \text{ km}^2$ . These estimates can be used to simulate daily flow. The performance of the hydrological modeling was evaluated with Nash-Sutcliffe efficiency criteria, graphic techniques, calibration and validation. The results indicate that the values of the criteria used are acceptable when compared with observed daily rainfall as well as flow simulations. The mean daily interannual Nash values obtained were 0.60 with radar, 0.81 with *PERSIANN*, 0.83 with AWS and 0.85 with *CMORPH*. The mean monthly interannual values obtained were 0.90 with radar, 0.91 with *PERSIANN*, 0.92 with AWS and 0.95 with *CMORPH*. Therefore, it can be stated that the combination of the technological tools is a useful solution when little rainfall data is available, providing real-time automated processes that contribute to analyses and decision-making.

**Keywords:** Rainfall estimate, weather radar, weather satellite, *CEQUEAU*, *PERSIANN*, *CMORPH*, hydrological modeling.

Recibido: 08/04/2014

Aceptado: 06/03/2015

## Introducción

Los modelos hidrológicos distribuidos han sido ampliamente desarrollados en las dos últimas

décadas, en cambio, los datos meteorológicos siguen siendo una limitante por insuficiencia de estaciones de medición. La precipitación es la entrada principal de un modelo hidrológico, por

ello la distribución espacial de la precipitación representa la variable principal de estudios sobre hidrología, climatología y agricultura. Los pluviómetros son los instrumentos que se usan de manera tradicional para medir la precipitación. Sin embargo, los pluviómetros proporcionan información puntual y tienen una cobertura muy limitada sobre varias cuencas del mundo y particularmente en los países en desarrollo. Los radares meteorológicos proporcionan información muy valiosa para la estimación de precipitación, pero no cubren muchas cuencas debido principalmente a su costo. La precipitación estimada por radar ha sido utilizada de forma exitosa en varios estudios hidrológicos (Lee, Shin, Kim, & Park, 2014; Magaña-Hernández, Bâ, & Guerra-Cobián, 2013; Guerra-Cobián, Bâ, Quentin-Joret, Díaz-Delgado, & Cârsteanu, 2011; Eleuch *et al.*, 2010; Bedient, Anthony, Benavides, & Vieux, 2003; Bedient, Hoblit, Gladwell, & Vieux, 2000). Por su parte, Fattorelli, Casale, Borga y Da Ros (1999) indican que una eficiente y temprana adquisición de información sobre la precipitación en grandes áreas es esencial para una pronta y efectiva alerta de crecientes. Las imágenes provenientes de radares terrestres y plataformas satelitales permiten visualizar de forma simultánea y frecuente grandes regiones. En efecto, el uso de datos de radar y satélite al interior de un sistema de pronóstico hidrológico ofrece la oportunidad de producir una mejor y temprana alerta respecto a sistemas basados sólo en datos de pluviógrafos.

Las dos técnicas satelitales más usadas para la estimación de la precipitación están basadas sobre sensores pasivos de microondas y el infrarrojo. Los sensores pasivos de microondas proporcionaron estimaciones pluviométricas más exactas que los datos de sensores de luz visible o infrarroja (Ebert, Janowiak, & Kidd, 2007).

Actualmente, un número cada vez mayor de productos satelitales de precipitación está disponible en tiempo casi real a través de Internet. Con el avance de las comunicaciones por Internet de alta velocidad es posible descargar mapas digitales de precipitación proporciona-

dos por los centros meteorológicos nacionales, las instituciones gubernamentales y grupos de investigación universitarios, en cuestión de segundos.

Por ejemplo, el International Precipitation Working Group (IPWG, <http://www.isac.cnr.it/~ipwg/>) recopiló 23 algoritmos para la estimación de precipitación por satélite que provienen de Estados Unidos, Europa, Japón y China, y estableció un programa para validar precipitación diaria. Para verificar la calidad de la información satelital utilizan precipitación registrada en pluviómetros y radares meteorológicos existentes en Australia, Estados Unidos y el norte de Europa. De los algoritmos disponibles, por el fácil acceso de información para México, se han seleccionado *CMORPH* y *PERSIANN* para su aplicación en una cuenca mexicana.

*CMORPH* (*Climate Prediction Center Morphing Technique*) es un algoritmo de estimación de precipitación desarrollado en Estados Unidos por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). El producto integra mediciones de sensores de microondas pasivas, interpoladas en el tiempo, usando información de advección de sensores infrarrojos termales para interpolar entre los barridos de los satélites con sensores de microondas (Joyce, Janowiak, Arkin, & Xie, 2004). La precipitación estimada con *CMORPH* está disponible desde diciembre de 2002 a diferentes resoluciones espaciales y temporales (8 x 8 km<sup>2</sup>; 0.25° x 0.25°; 30 min, 3 h y diaria) para regiones localizadas entre 60° norte y 60° sur.

El algoritmo *PERSIANN* (Hsu, Gao, Sorooshian, & Gupta, 1997; Sorooshian *et al.*, 2000) ha sido desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Percepción Remota de la Universidad de California en Irvine (CHRS por sus siglas en inglés). El algoritmo utiliza mediciones de sensores infrarrojos que se ajustan con mediciones de sensores de microondas y son calibrados con el radar del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) cuando éstos están disponibles. *PERSIANN* es un algoritmo basado en una función de redes neuronales con procedimientos de aproximación y clasificación

para estimar la intensidad de la lluvia con una resolución de pixel de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Los datos se encuentran disponibles desde Marzo de 2000, con resoluciones temporales de 3 y 6 h, y una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Existe otra versión de este algoritmo, llamado *PERSIANN-CCS* (Hong, Hsu, Sorooshian, & Gao, 2004), que está basado en una técnica de clasificación de nubes para poder establecer relaciones entre temperatura de la parte superior de las mismas y la precipitación.

Joyce *et al.* (2004) validaron la precipitación estimada por *CMORPH* y otros algoritmos (a nivel diario, con resolución  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) sobre Australia y Estados Unidos, utilizando celdas que cuentan con pluviómetros. Reportan que *CMORPH* dio mejores resultados. Dinku, Ceccato, Cressman y Connor (2010) mostraron que *CMORPH* subestima ligeramente la precipitación de un periodo de 10 días con una resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , comparado con otros algoritmos con los que fue contrastado. Ebert *et al.* (2007) reportaron que a nivel diario y con una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , *CMORPH*, en general, subestima el número de días de lluvia en Australia; sin embargo, la precipitación diaria estimada tiene una correlación más elevada que otros algoritmos satelitales de estimación de precipitación. Serrat-Capdevila *et al.* (2013) compararon los algoritmos *CMORPH* y *PERSIANN* a nivel diario sobre el río Senegal en África y encontraron que el algoritmo *CMORPH* da mejores resultados. Además, estos algoritmos han formado parte de análisis comparativos de estimación de precipitación en varios estudios, como de Behrangi *et al.* (2014); Habib, Haile, Tian y Joyce (2012a); Joyce y Xie (2011); Habib, Elsaadani y Haile (2012b), y Stisen y Sandholt (2010).

En México, Bâ y Serrat-Capdevilla (2012), Vilchis-Mata (2013) y Magaña-Hernández *et al.* (2013) evaluaron diferentes métodos de estimación de precipitación por sensores remotos, entre ellos *CMORPH* y *PERSIANN*, y concluyeron que el primero da mejores resultados a nivel diario. El objetivo de esta investigación es usar la precipitación estimada por los algoritmos

*CMORPH* y *PERSIANN* para evaluar la oportunidad de utilizar esta fuente de información en la modelación de escurrimientos diarios en una cuenca de México.

### Modelo hidrológico CEQUEAU

Este modelo fue desarrollado en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU, ahora INRS-ETE) de la Universidad de Quebec, Canadá, para reproducir el escurrimiento de una cuenca (Morin, Sochanski, & Paquet, 1998; Singh & Frevert, 2002; Morin & Paquet, 2007). Ha sido empleado en diferentes países para simulaciones continuas de caudales o para la previsión hidrológica con fines de gestión de embalses (Bâ *et al.*, 2013; Bâ & Serrat-Capdevila, 2012; Eleuch *et al.*, 2010; Llanos, Bâ, & Castiella, 1999; Ayadi & Bargaoui, 1998; Bâ, Díaz, & Rodríguez, 2001). Además, este modelo ha sido comparado con varios modelos hidrológicos por la Organización Meteorológica Mundial en diferentes cuencas del mundo (WMO, 1986, 1992). La compañía Río Tinto Alcan (RTA) utiliza este modelo de manera operacional para la gestión de sus embalses y ha financiado los desarrollos más recientes de este modelo (<http://ete.inrs.ca/ete/publications/cequeau-hydrological-model>).

El modelo es de parámetros distribuidos; en este sentido, la cuenca se divide en superficies elementales de forma cuadrada (parcelas) y se calculan los caudales para cada una de ellas, tomando en cuenta las variaciones espacio-temporales de las características fisiográficas. Esta discretización hace que este tipo de modelo sea compatible con el uso de precipitación estimada por satélite.

El modelo consta de dos partes para simular el flujo vertical y horizontal del agua en cada cuadro (figura 1); la primera de ellas se denomina función de producción y la segunda, función de transferencia.

La función de producción se refiere al modelado del flujo vertical del agua (lluvia, evapotranspiración, infiltración, etc.) y está orientada a obtener un volumen de agua en

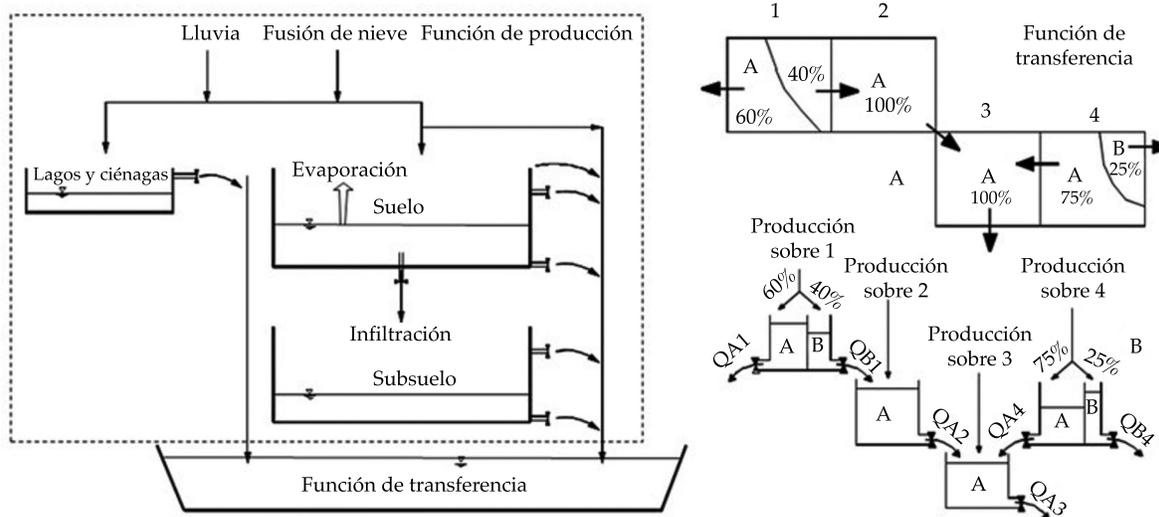


Figura 1. Función de producción (izquierda) y función de transferencia (derecha) del modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU (modificada de Morin & Paquet, 2007).

cada uno de los tres recipientes que considera el modelo: lagos y ciénagas, suelo y acuífero. El volumen de agua se calcula para cada elemento parcial, multiplicando la lámina producida en el cuadro entero por la superficie del elemento parcial considerado. La función de transferencia analiza la manera en que se transfiere el flujo en la red de drenaje; tiene en cuenta la influencia de lagos, ciénagas, presas y derivaciones. El modelo examina cada parcela a intervalos de tiempo definidos, los cuales pueden ser de un día o incluso de una hora.

La evapotranspiración se estima a partir de la fórmula de Thornthwaite modificada (Morin & Paquet, 2007), los cálculos se realizan a intervalos de tiempo indicados por el usuario. De acuerdo con la ilustración de la figura 1, los escurrimientos superficial y retardado dependen del nivel de agua en los recipientes, de los coeficientes conceptuales de vaciado y de las propias cotas de vaciado de dicho recipiente; esto se simula por medio de ecuaciones donde intervienen los parámetros del modelo. Tales parámetros gobiernan el comportamiento del flujo de agua en los tres recipientes (lagos y ciénagas, suelo y acuífero), fusión de nieve, evapotranspiración y transferencia. Los datos

de entrada requeridos por el modelo son de dos tipos: fisiográficos e hidrometeorológicos.

El modelo cuenta con una aplicación para la optimización de los parámetros; el algoritmo está basado en el método de Powell (1964), cuya función objetivo es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (ecuación (1)) o el error relativo entre los caudales observados y simulados. Además, el modelo cuenta con criterios gráficos, como comparación de hidrogramas y de caudales clasificados, entre otros.

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (1a)$$

$$NTD^* = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{NNE} \sum_{i=1}^{365} (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{n=1}^{NNE} \sum_{i=1}^{365} (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (1b)$$

Donde:

$NTD$  = criterio de Nash-Sutcliffe anual, adimensional, de  $-\infty$  a 1.

$NTD^*$  = criterio de Nash-Sutcliffe interanual, adimensional, de  $-\infty$  a 1.

$Q_{Ci}$  = caudales calculados en el día  $i$ , en  $m^3/s$ .

$Q_{oi}$  = caudales observados en el día  $i$ , en  $m^3/s$ .

$\overline{Q_o}$  = promedio de los caudales observados en los  $n$  días.

$NNE$  = número de años.

## Materiales y método

El desarrollo del trabajo consta de una secuencia lógica de siete procedimientos, que permiten realizar la preparación de los insumos requeridos, correspondientes a la adquisición y pre-procesamiento, seguido de la validación de datos medidos en terreno por las EMA y los estimados por los sistemas de teledetección, generación de parámetros de entrada al modelo hidrológico *CEQUEAU*; posteriormente, la modelación hidrológica y su calibración en el nivel de cuenca hidrográfica, y por último el análisis de resultados entre los distintos tipos de escenarios (radar, satélites), como se detalla a continuación:

1. **Adquisición de datos:** consiste en la recopilación y almacenamiento de insumos de datos pluviométricos derivados de las tres fuentes principales: estaciones meteorológicas automáticas (EMA); radar meteorológico de Cerro Catedral, y sensores satelitales (*PERSIANN* y *CMORPH*) con base en un análisis de disponibilidad y calidad de dicha información.
2. **Preprocesamiento de datos:** referente a la generación de bases de datos acumuladas a nivel diario (24 h) derivados de las EMA, así como la importación, validación, adecuación y análisis en el SIG-IDRISI, para la obtención de estimación acumulada diaria de precipitación, derivada de imágenes en formato ráster del radar meteorológico e imágenes de satélite. Lo anterior apoyado en el módulo de importación y preprocesamiento desarrollado por el CRI-Ecuador y con base en el desarrollo metodológico propuesto por Vilchis-Mata, Quentin, Bâ y Díaz-Delgado (2011).

3. **Validación de datos pluviométricos:** proceso de análisis interpretado como una validación puntual entre los datos pluviométricos observados en las EMA ( $x$ ) y los estimados ( $y$ ) con los sensores de teledetección (radar, *CMORPH* y *PERSIANN*), con base en una medida adimensional, como es el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), como medida del grado de fiabilidad o bondad del ajuste, y variación del conjunto de datos (ecuación (2)).

$$r^2 = \left( \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

4. **Preparación de parámetros fisiográficos:** se realiza la delimitación de la cuenca hidrográfica y se obtienen sus parámetros de cuenca de manera automatizada (cuadro 1), aplicando el módulo hidrogeomático implementado en el SIG-IDRISI por Franco-Plata (2008) y mejorado por Franco-Plata *et al.* (2013). Dicha información de la cuenca (figura 2) se obtiene con base en información topográfica del modelo numérico de altitud (MNA) de la Misión Topográfica de Radar (SRTM-NASA), con una resolución espacial base aproximada de 90 metros, misma que debe ser ajustada a la resolución espacial de los datos de precipitación proporcionados por las imágenes de satélite (unos 27 km). La información de ocupación del suelo correspondiente al porcentaje de lagos, ciénagas y cobertura forestal se obtiene con datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (Conabio) o bien por clasificación supervisada de imágenes satelitales según su disponibilidad. Posteriormente se crea una malla en donde se divide la cuenca en cuadros enteros, donde cada cuadro se identifica por las coordenadas (I, J), divididos a su vez en hasta cuatro elementos parciales definidos por la delimitación del parteaguas al interior del cuadro entero. En el caso de la presente

Cuadro 1. Características fisiográficas de la cuenca.

Superficie y perímetro	$A = 8\,927.61\text{ km}^2$ $P = 755.46\text{ km}$
Coefficiente de compacidad	$Kc = 2.25$
Relación de circularidad	$Rci = 0.2$
Relación hipsométrica y elevación media	$Rh = 3.36$ $H = 1\,708.2$
Pendiente de la cuenca	$S^\circ = 10.54$ $S\% = 19.15$
Características del río principal	$Lc = 219.2\text{ km}$ $La = 133.27\text{ km}$ $Sc = 0.012$ $Sh = 1.64$ $Hmáx = 3\,179\text{ msnm}$ $Hmín = 627\text{ msnm}$
Tiempo de concentración	$Tc1 = 23.24\text{ horas (Kirpich)}$ $Tc2 = 23.36\text{ horas (CHPW)}$

investigación, dichos cuadros corresponden a la resolución espacial de 27 km, indicando el sentido del flujo de cada cuadro hacia el cuadro vecino, lo anterior con la finalidad de hacer coincidir con la información de base obtenida de los satélites. Los archivos con extensión .PHY (fisiográficos) y .BV (información de la cuenca) son el resultado de este proceso.

- 5. Preparación de archivos hidrometeorológicos:** en este proceso se analiza y estructura la información de caudales diarios observados en la estación hidrométrica de Atenango del Río administrada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los datos de temperatura (mínima y máxima) obtenida de las EMA inmersas en la cuenca y los datos de precipitación contenida en las bases de datos generadas a diario tanto del radar como de fuentes satelitales (*CMORPH* y *PERSIANN*), en un programa de manejo de base de datos denominado *SEDHIM* (Chávez & Galicia, 2002), y disponer de dicha información en los formatos requeridos para su incorporación al modelo *CEQUEAU*. El resultado son los archivos por sensor (radar, *CMORPH* y *PERSIANN*) con extensión .MET (meteorológicos) y .CAU (caudales). Es importante

señalar que el archivo con extensión .DHM contiene la definición del periodo de preparación de datos hidrometeorológicos para las simulaciones, así como las rutas de acceso a los archivos mencionados.

- 6. Modelación hidrológica:** corresponde al cálculo de los caudales en la cuenca con base en los archivos generados y requeridos en el modelo *CEQUEAU* (.PHY, .BV, .DHM, .CAU), así como la edición de un archivo de parámetros con extensión .PAH, el cual contiene algunos parámetros determinados según la física del fenómeno; otros están en función de las características hidrológicas y fisiográficas de la cuenca, así como también algunos que son definidos en el proceso de calibración.
- 7. Calibración y validación:** la calibración es la etapa que permite la atribución de valores a los parámetros conceptuales que intervienen en las ecuaciones del balance, tal como se indica en la figura 1. En este caso, tales parámetros se refieren a la altura de los recipientes, los coeficientes de vaciado, el exponente e índice de Thornthwaite, etcétera. Este proceso se puede llevar a cabo por: a) prueba y error, b) por optimización

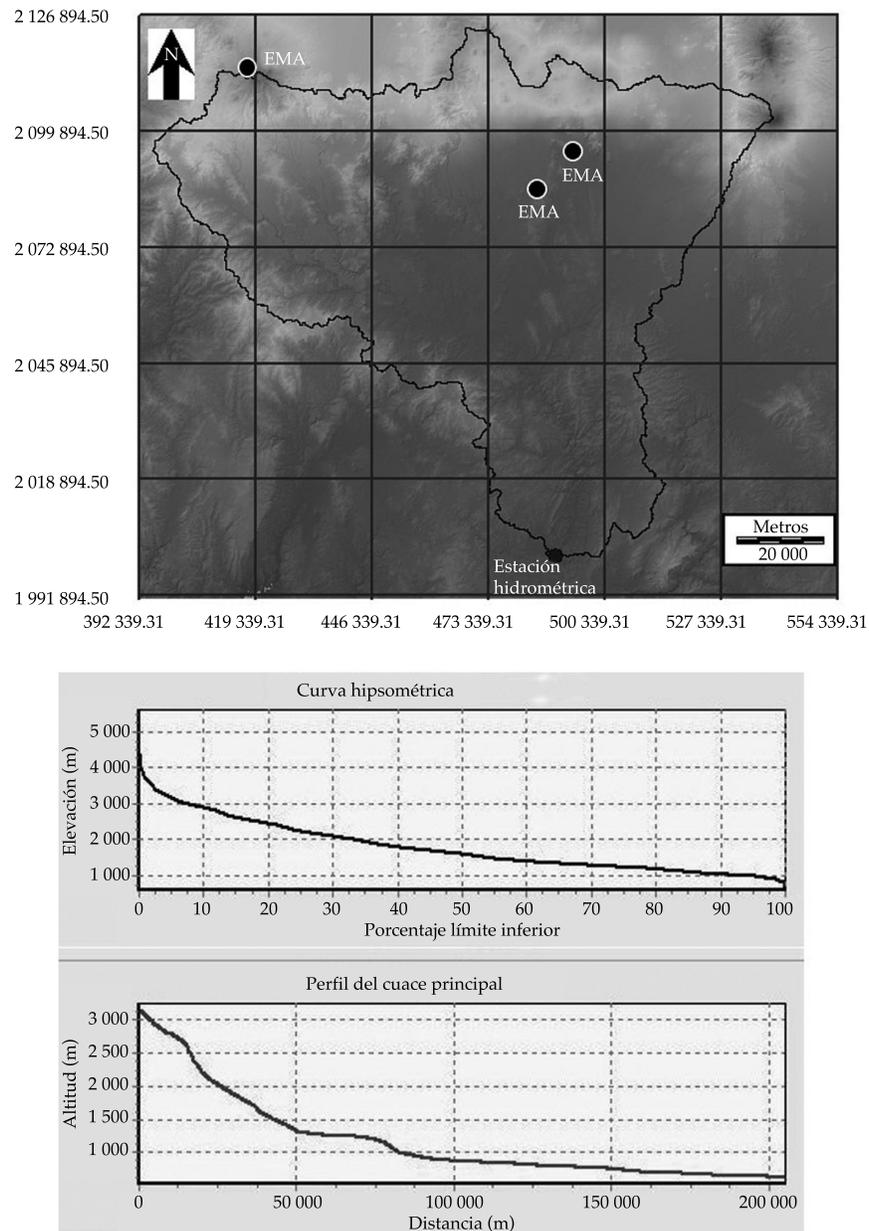


Figura 2. Delimitación, ubicación de EMA, curva hipsométrica y perfil de la cuenca hasta la estación hidrométrica Atenango del Río.

o c) por la combinación de los dos primeros. En este proceso, los parámetros iniciales incluidos en el archivo con extensión PAH se cambian de manera automática (optimización), o por prueba y error hasta encontrar el mejor valor de NTD más cercano a 1. La calibración es la etapa más crucial de todas

las etapas de la modelación. Sorooshian y Arfi (1982) subrayan que es principalmente en la calibración que radica el arte de la modelación y, por otro lado, en el mejor modelo, por muy sofisticado y realista que sea, si la calibración no está bien hecha, producirá siempre resultados falsos.

Por otra parte, la calidad de un modelo se mide por los resultados de su validación. Esta etapa consiste en comparar los resultados de los simulaciones obtenidas con los parámetros que resultaron del proceso de calibración y los hidrogramas observados a través de criterios numéricos (NTD, en este caso) o criterios gráficos.

## Resultados

El cálculo de los parámetros fisiográficos de la cuenca (cuadro 1) es necesario para la modelación de los escurrimientos. Este proceso permitió la obtención del área de la cuenca y del tiempo de concentración de la misma, que son parámetros físicos requeridos por el modelo *CEQUEAU*. El modelo ha sido calibrado utilizando la precipitación observada en las estaciones EMA, la precipitación estimada por radar y por satélite (*CMORPH* y *PERSIANN*).

En el caso del radar de Cerro Catedral, Vilchis-Mata *et al.* (2011) identificaron un bloqueo orográfico del haz, correspondiente a los edificios volcánicos y sistemas montañosos inmersos en la zona de influencia del mismo, como es el caso del volcán Jocotitlán, Nevado de Toluca, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, así como también el sistema de laderas NW del volcán Nevado de Toluca, y del Ajusco, los cuales generan, por un lado, zonas apantalladas (subdetección) en su parte posterior y, por el otro, presencia de ecos del suelo debido a lóbulos secundarios y con ello una ausencia de datos (figura 3). Para corregir esta situación es necesario realizar para cada una de las imágenes un proceso de interpolación entre los valores de los píxeles aledaños y los píxeles afectados, en el supuesto de que los campos de precipitación son relativamente homogéneos. El resultado corresponde a una imagen producto que representa el acumulado de precipitación a nivel diario con corrección orográfica, factible de aplicar de manera operacional dentro de un modelo hidrológico distribuido, al representar la distribución espacial de precipitación sobre la zona de estudio. Además, un beneficio potencial de la información radica

de modo particular en una amplia cobertura de zonas donde es difícil instalar y operar dispositivos manuales (Hossain, Anagnostou, Dinku, & Borga, 2004).

Considerando las limitaciones de las redes de pluviómetros y de radar, los sensores satelitales representan el único medio viable para poder estimar la precipitación sobre el globo terrestre. En efecto, el empleo de técnicas basadas en la integración de datos de microondas, visible e infrarrojo, potencializan su uso, al resolverse problemas (microfísica de nubes y propiedades termodinámicas) que afectan a dichas técnicas consideradas de manera individual. Sin embargo, las estimaciones cuantitativas de precipitación utilizando sensores remotos presentan un grado de incertidumbre asociada con la naturaleza de la medición.

Los valores de  $r^2$  considerados en los escenarios de subestimación y sobreestimación resultaron complementarios al análisis general. Respecto al primero corresponde un pequeño porcentaje atribuible a precipitaciones inferiores a 2.0 mm, así como eventos locales que no son cuantificados en su totalidad por los sensores de teledetección; por su parte, la sobreestimación es un fenómeno generalizado que se aprecia y afecta en mayor manera en los resultados de la modelación hidrológica.

Respecto a los resultados obtenidos de la modelación hidrológica (cuadros 2, 3, 4 y 5), es posible observar una considerable variación con respecto a las diferentes fuentes de información (*EMA*, radar, *PERSIANN* y *CMORPH*), considerando la variabilidad espacial de la precipitación y la no linealidad del proceso de transferencia de masa y de energía al interior de la cuenca, considerándose como datos confiables.

Desde la cuenca del río Amacuzac hasta la estación hidrométrica de Atenango del río se observó una alta pluviosidad para el lapso comprendido entre los meses de mayo a octubre, donde los picos (crecidas) del hidrograma para este periodo no se ajustaron de modo adecuado. Sin embargo, respecto al periodo de estiaje, los caudales se mantuvieron uniformes. A nivel diario, los valores del criterio de Nash-Sutcliffe

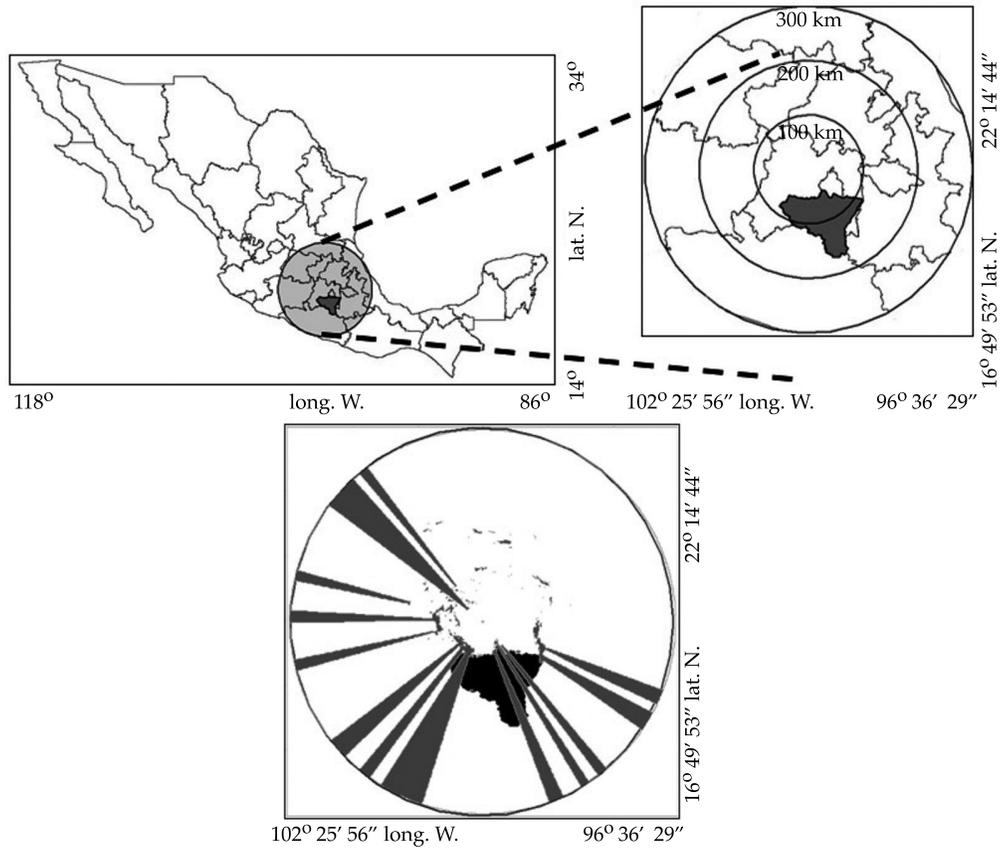


Figura 3. Ubicación de la cuenca en el radio de influencia del radar de Cerro Cathedral y afectaciones por bloqueos orográficos.

Cuadro 2. Caudales interanuales medios diarios.

Fuente de información	Caudal observado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal calculado (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo (%)	Lámina observada (mm)	Lámina calculada (mm)	Error relativo (%)	Criterio de Nash-Sutcliffe
EMA	50.6	49.5	-2.2	193	189	-2.2	0.831
Radar	57.1	57.1	0.0	218	217	-0.5	0.600
PERSIANN	50.6	50.1	-1.0	193	191	-1.0	0.807
CMORPH	50.6	50.6	0.0	193	193	0.0	0.851

Cuadro 3. Caudales interanuales medios mensuales.

Escenario	Caudal observado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal calculado (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo (%)	Lámina observada (mm)	Lámina calculada (mm)	Error relativo (%)	Criterio de Nash-Sutcliffe
EMA	50.6	49.5	-2.2	193	189	-2.2	0.923
Radar	57.1	57.0	-0.2	218	217	-0.5	0.902
PERSIANN	50.6	50.1	-1.0	193	191	-1.0	0.912
CMORPH	50.6	50.6	0.0	193	193	0.0	0.950

Cuadro 4. Caudales interanuales acumulados medios diarios.

Escenario	Caudal observado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal calculado (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo (%)	Lámina observada (mm)	Lámina calculada (mm)	Error relativo (%)	Criterio de Nash-Sutcliffe
EMA	7 255.7	6 978.3	-3.8	27 654	26 597	-3.8	0.995
Radar	8 151.9	8 010.2	-1.8	31 070	30 530	-1.8	0.997
PERSIANN	7 255.7	6 628.6	-8.6	27 654	25 264	-8.6	0.986
CMORPH	7 255.7	6 883.0	-5.1	27 654	26 234	-5.1	0.994

Cuadro 5. Caudales interanuales acumulados medios mensuales.

Escenario	Caudal observado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal calculado (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo (%)	Lámina observada (mm)	Lámina calculada (mm)	Error relativo (%)	Criterio de Nash-Sutcliffe
EMA	262.4	252.2	-3.9	1000	961	-3.9	0.995
Radar	294.2	289.1	-1.8	1121	1102	-1.7	0.997
PERSIANN	262.4	240.8	-8.2	1000	918	-8.2	0.986
CMORPH	262.4	249.8	-4.8	1000	952	-4.8	0.994

Nota: en los cuadros 2, 3, 4 y 5, los valores para el escenario radar comprende sólo el periodo 2008-2009, por ello la diferencia del caudal observado respecto a los otros escenarios para el periodo 2003-2009.

en las simulaciones con EMA superaron a las de PERSIANN, que a su vez superó en precisión a las de radar; respecto a las simulaciones a nivel mensual, el orden de los valores para EMA fue el mismo; sin embargo, los valores del radar superaron a los obtenidos con PERSIANN. Cabe resaltar que las simulaciones realizadas con datos CMORPH tanto de forma diaria como mensual fueron ampliamente satisfactorias, presentando los valores del criterio de Nash-Sutcliffe más altos de este análisis (Figuras 4, 5, 6 y 7).

## Conclusiones

En este trabajo, el objetivo perseguido consistió en el análisis del empleo de información de precipitación obtenida a partir de sensores de percepción remota como entrada a un modelo hidrológico distribuido. Sin duda alguna, este acercamiento redundó en una mejor percepción de la realidad debido a la mejor representación espacio temporal de la variable precipitación en una región. Los resultados obtenidos reflejan que entre los métodos analizados, las mejores

simulaciones de caudal fueron las correspondientes al uso del algoritmo CMORPH, incluso aquellos obtenidos con estaciones EMA. Sin embargo, se recalca que en este trabajo se dispuso sólo de tres estaciones EMA en una cuenca de unos 9000 km<sup>2</sup>, las cuales no reflejan con precisión la distribución de la precipitación. Por otro lado, de acuerdo con la literatura especializada, las estimaciones de precipitación por radar a nivel diario producen resultados satisfactorios comparados con los estimados por satélite; sin embargo, en la cuenca estudiada no fue el caso. Lo anterior puede ser explicado por la ausencia parcial de información debido al bloqueo orográfico de la señal del radar, que se completó por interpolación.

Cabe mencionar que antes de utilizar información de precipitación estimada por sensores de percepción remota, se necesita llevar a cabo una validación con pluviómetros y, en su caso, aportar correcciones a partir de criterios estadísticos, zona geográfica y comportamiento climático regional.

Por último, se resalta que México cuenta con una red de radares en los que se requiere siste-

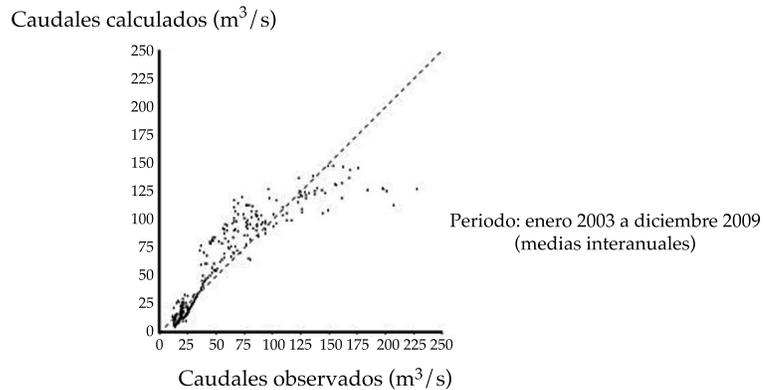
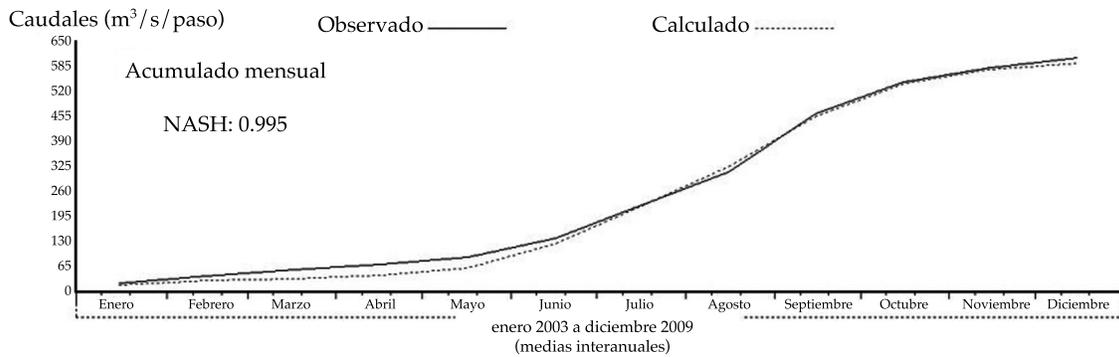
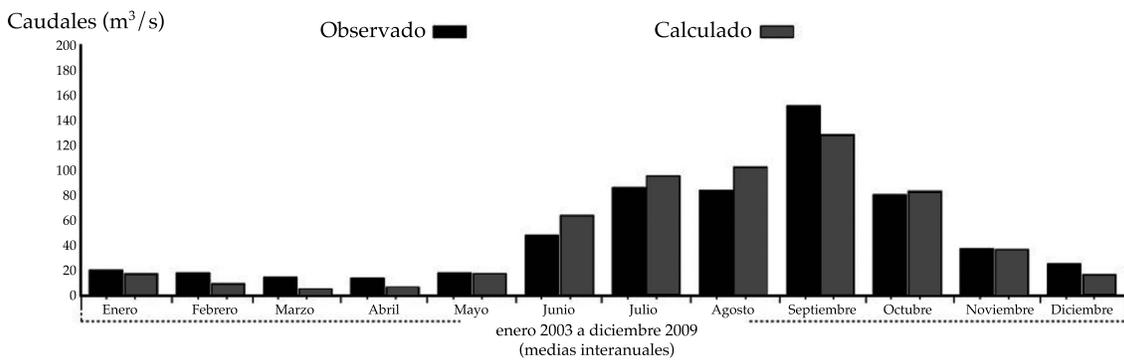
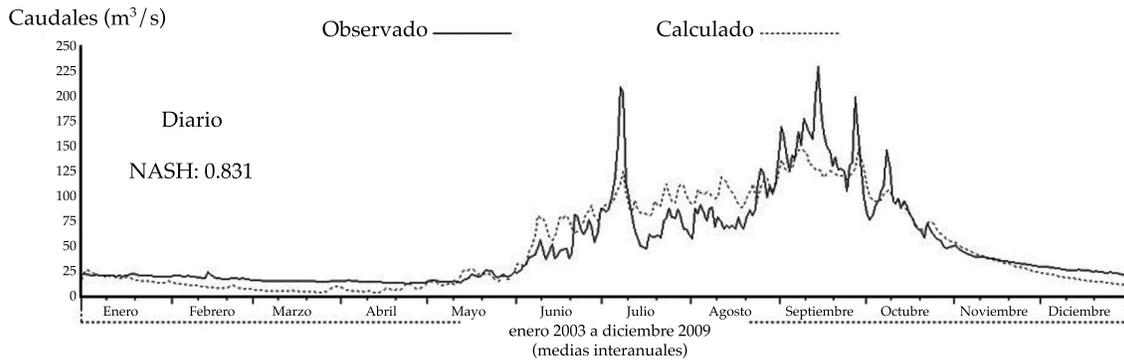


Figura 4. Histogramas e hidrogramas con EMA.

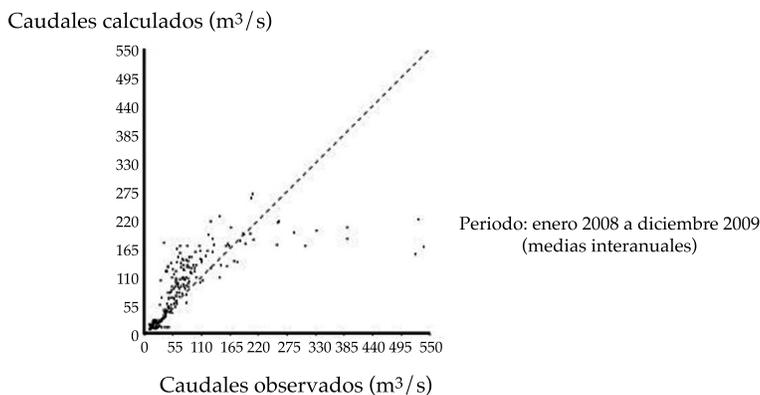
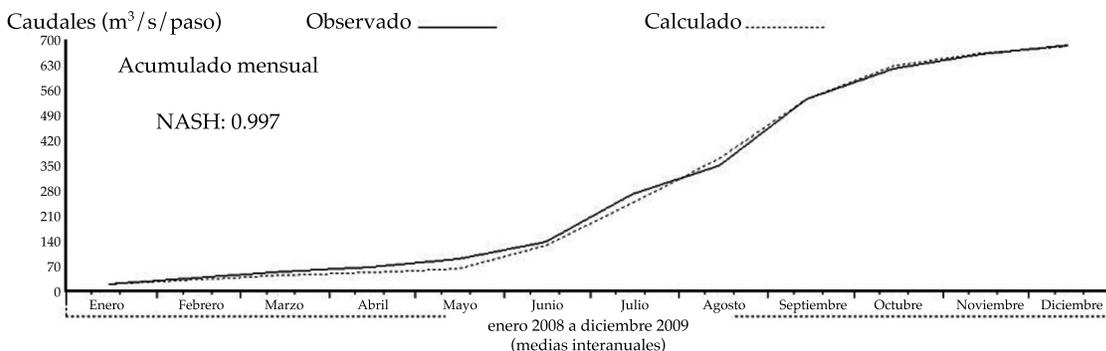
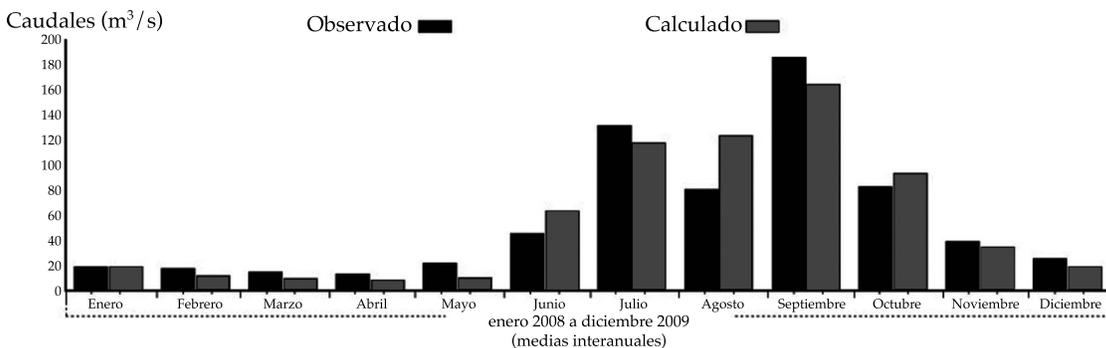
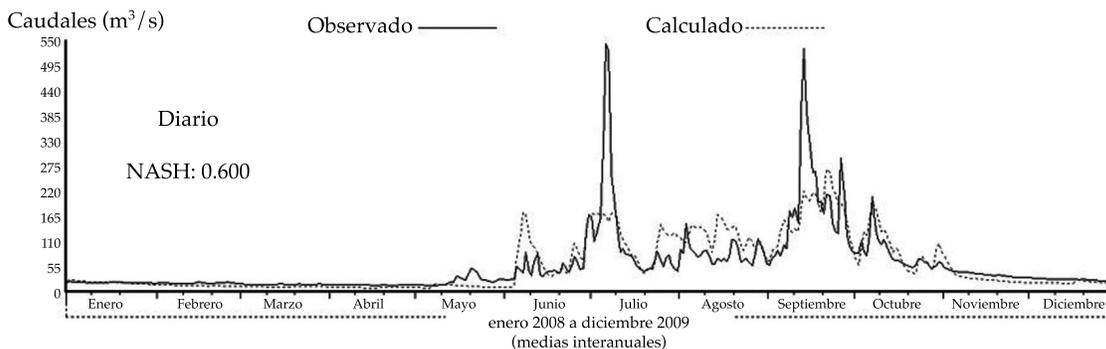


Figura 5. Histogramas e hidrogramas con imágenes radar (interanuales, 2008-2009).

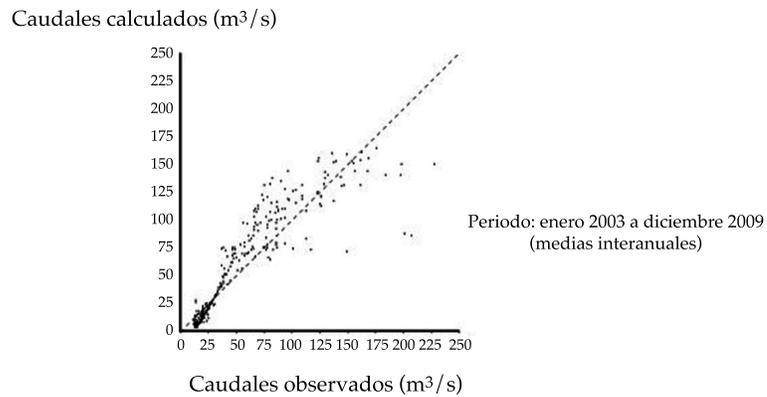
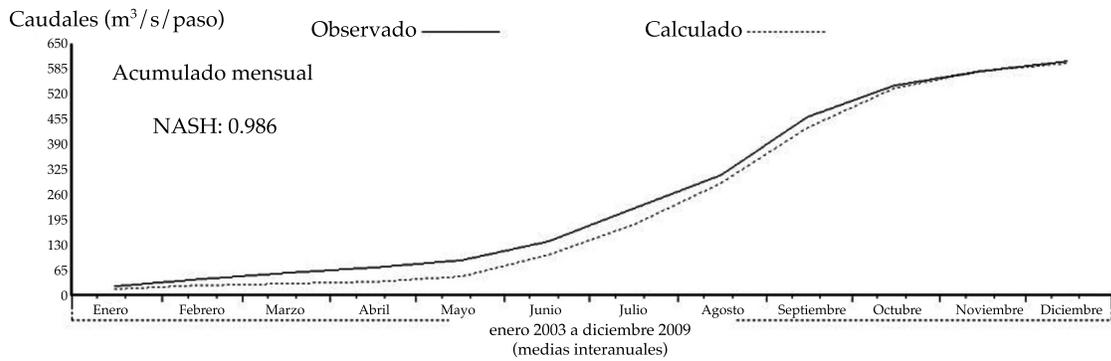
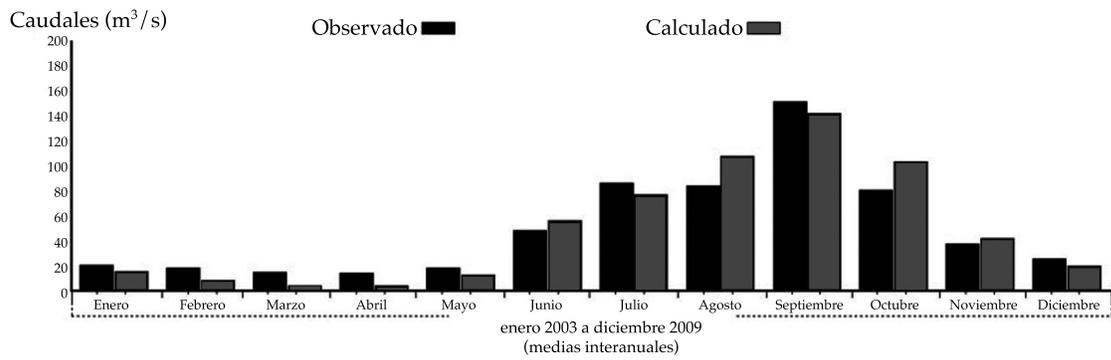
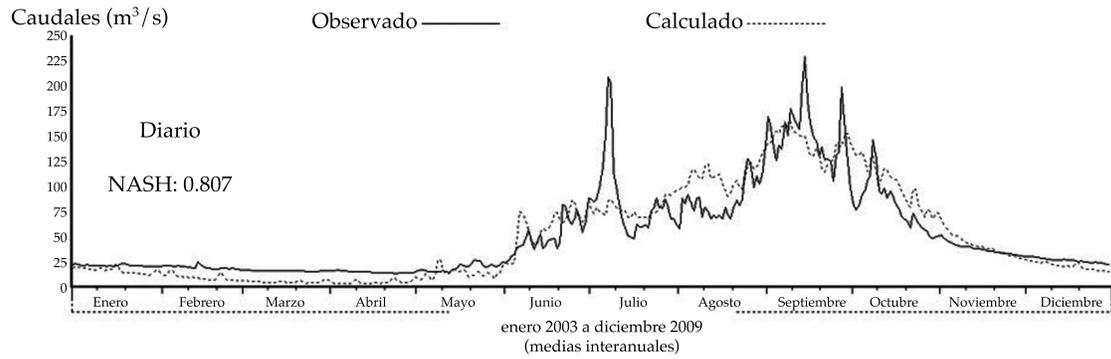


Figura 6. Histogramas e hidrogramas con imágenes *PERSIANN* (interanuales, 2003-2009).

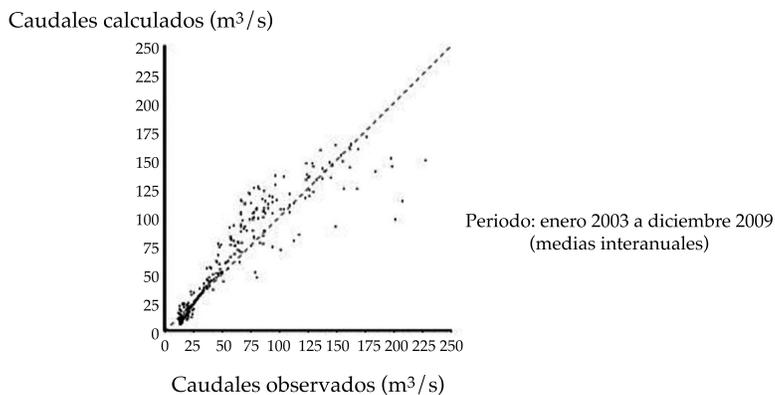
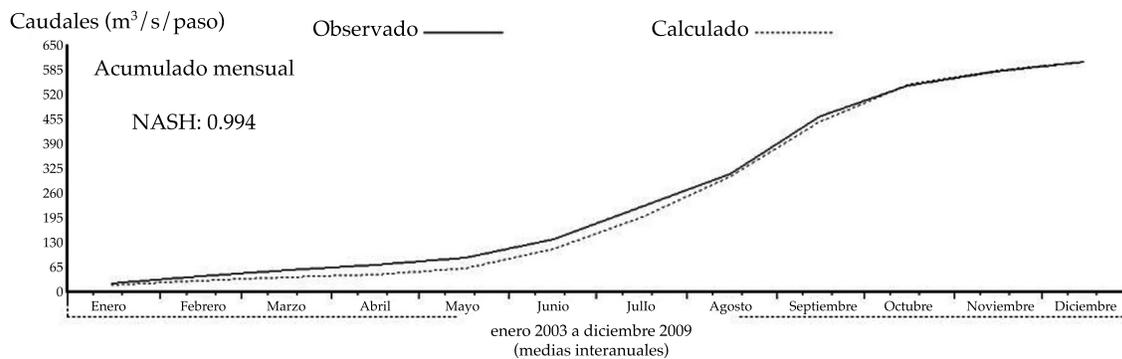
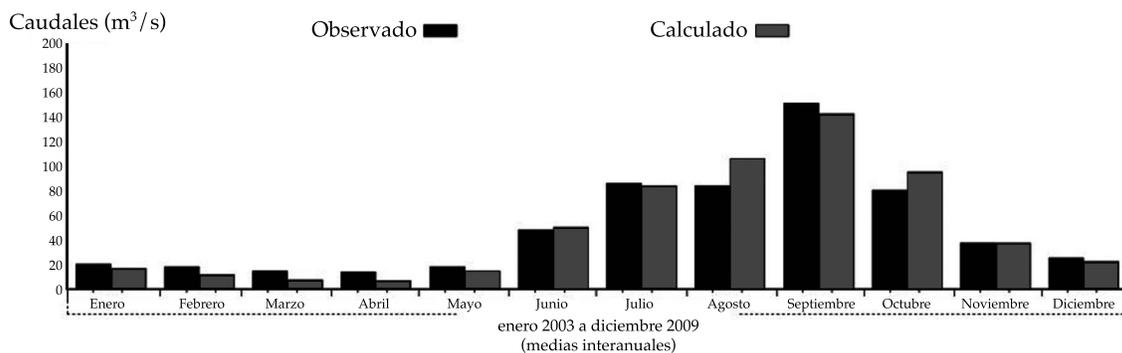
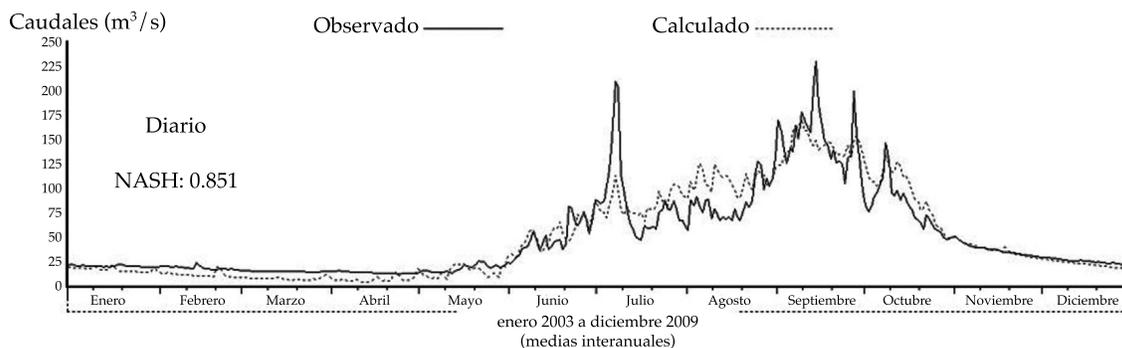


Figura 7. Histogramas e hidrogramas con imágenes CMORPH (interanuales, 2003-2009).

matizar el uso de esta información en estudios hidrológicos.

## Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de México por el financiamiento otorgado en el marco del proyecto de investigación 3459/2013CH. Así como a los árbitros, por sus atinadas observaciones y recomendaciones.

## Referencias

- Ayadi, M., & Bargaoui, Z. (1998). Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 43(5), 741-758.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., Quentin, E., Ojeda, C. I., Guerra-Cobián, V. H., Carsteanu, A., & Franco, P. R. (2013). Modelación de grandes cuencas con SIG-IDRISI y CEQUEAU: caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 129-136.
- Bâ, K. M., & Serrat-Capdevila, A. (2012). Modelación hidrológica con precipitación estimada por imágenes satelitales: el caso del río La Sierra (México) (pp. 261-287). En *La importancia de las inundaciones en la gestión integrada de los recursos hídricos*. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bâ, K. M., Díaz, C., & Rodríguez, V. (2001). Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 16(4), 117-126.
- Bedient, P. B., Anthony, H., Benavides, J. A., & Vieux, B. E. (2003). Radar-Based Flood Warning System Applied to Tropical Storm Allison. *Journal Hydrologic Engineering*, 8(6), 308-318.
- Bedient, P. B., Hoblit, B. C., Gladwell, D. C., & Vieux, B. E. (2000). NEXRAD Radar for Flood Prediction in Houston. *Journal Hydrologic Engineering*, 5(3), 269-277.
- Chávez, C. R., & Galicia, J. A. (2002). *Diseño e implementación de una herramienta computacional para el manejo de bases de datos hidrométricas y meteorológicas para el modelo hidrológico CEQUEAU*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería de Computación. Toluca, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Behrangi, A., Andreadis, K., Fisher, J. B., Turk, F. J., Granger, S., Painter, T., & Das, N. (2014). Satellite-Based Precipitation Estimation and its Application for Streamflow Prediction over Mountainous Western U.S. Basins. *American Meteorological Society*, 53, 2823-2842.
- Dinku, T., Ceccato, P., Cressman, K., & Connor, S. J. (2010). Evaluating Detection Skills of Satellite Rainfall Estimates over Desert Locust Recession Regions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 1322-1332.
- Ebert, E. E., Janowiak, J. E., & Kidd, C. (2007). Comparison of Near-Real-Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88, 47-64.
- Eleuch, S., Carsteanu, A., Ba, K. M., Magagi, R., Goitia, K., & Diaz-Delgado, C. (2010). Validation and Use of Rainfall Data to Simulate Water Flows in the Rio Escondido Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Journal*, 24(5), 559-565. Online, September 3, 2009.
- Fattorelli, S., Casale, R., Borga, M., & Da Ros, D. (1999). *Integración de técnicas radar y sensores remotos para la estimación de lluvias en aplicaciones hidrológicas y mitigación de riesgos de inundación*. Comisión Europea/Asociación Italiana de Hidronomía (AIDI)/Programa Europeo del Medio Ambiente/UNESCO/PHI. Recuperado de <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/Fattorelli.pdf>.
- Franco-Plata, R. (2008). *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos* (185 pp.). Tesis doctoral. Toluca, México: Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Facultad de Ingeniería de la UAEM.
- Franco-Plata, R., Miranda, V. C., Solares, H. H., Manzano, L. R., Bâ, K. M., & Exposito, J. L. (2013). Implementing into GIS a Tool to Automate the Calculation of Physiographic Parameters of River Basins. *Open Journal of Modern Hydrology (OJMH)*, 3, 67-74. Published Online April, 2013. Recuperado de <http://scirp.org/journal/ojmh>.
- Guerra-Cobián, V. H., Bâ, K. M., Quentin-Joret, E., Díaz-Delgado, C., & Cârsteanu, A. A. (julio-septiembre de 2011). Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente. *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes Ingeniería hidráulica en México, 2(3), 35-48.
- Habib, E., Haile, A. T., Tian, Y., & Joyce, R. (2012a). Evaluation of the High-Resolution CMORPH Satellite Rainfall Product Using Dense Rain Gauge Observations and Radar-Based Estimates. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 1784-1798.
- Habib, E., Elsaadini, M., & Haile, A. T. (2012b). Climatology-Focused Evaluation of CMORPH and TMPA Satellite Rainfall Products over the Nile Basin. *American Meteorological Society*, 51, 2105-2121.
- Hong, Y., Hsu, K. L., Sorooshian, S., & Gao, X. G. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *J. Appl. Meteor.*, 43, 1834-1852.
- Hossain, F., Anagnostou, E. N., Dinku, T., & Borga, M. (2004). Hydrological Model Sensitivity to Parameter and Radar Rainfall Estimation Uncertainty. *Hydrological Processes*, 18, 3277-3291.
- Hsu, K. L., Gao, X. G., Sorooshian, S., & Gupta, H. V. (1997). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1176-1190. Recuperado de <http://ete.inrs>.

- ca/ete/publications/cequeau-hydrological-model (01/2015).
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave And Infrared Data At High Spatial And Temporal Resolution. *J. Hydrometeorol.*, 5, 487-503.
- Joyce, R., & Xie, P. (2011). Kalman Filter –Based CMORPH. *American Meteorological Society*, 12, 1547-1563.
- Lee, Y. R., Shin, D. B., Kim, J. H., & Park, H. S. (2014). Precipitation Estimation over Radar Gap Areas Based On Satellite And Adjacent Radar Observations. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 7, 6299-6325.
- Llanos, H., Bâ, K. M., & Castiella, A. (1999). Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (País Vasco y Navarra). *Ingeniería del Agua*, 6(3), 241-250.
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M., & Guerra-Cobián, V. H. (diciembre, 2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 745-755.
- Morin, G., Sochanski, W., & Paquet, P. (1998). *Le modèle de simulation de quantité CEQUEAU-ONU, Manuel de référence* (252 pp). Rapport de recherche No 519. Saint-Foy, Quebec: Organisation des Nations-Unies et INRS-Eau.
- Morin, G., & Paquet, P. (2007). *Le modèle hydrologique CEQUEAU* (458 pp.). Rapport de recherche no R000926. Saint-Foy, Quebec: INRS-ETE.
- Powell, M. J. D. (1964). An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives. *Computer Journal*, 7, 155-162.
- Serrat-Capdevila, A., Valdes, J., Bâ, K. M., Durcik, M., Merino, M., & Demaria, E. M. (2013). *Hydrologic Simulations of Three Poorly Gauged Watersheds of the Senegal River Using a Lumped and a Distributed Model with Different Inputs*. American Geophysical Union, Meeting of the Americas, Cancun, Mexico, May, 14-17.
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. (2002). *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, USA: Water Resources Publications. LLC..
- Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of American Meteorology Society*, 81, 2035-2046.
- Sorooshian, S., & Arfi, F. (1982). Response Surface Parameter Sensitivity Analysis Methods For Postcalibration Studies. *Water Resources Research*, 18(5), 1531-1538.
- Stisen, S., & Sandholt, I. (2010). Evaluation of Remote-Sensing-Based Rainfall Products through Predictive Capability in Hydrological Runoff Modeling. *Hydrol. Process.*, 24, 879-891.
- Vilchis-Mata, I., Quentin, E., Bâ, K. M., & Díaz-Delgado, C. (octubre-diciembre de 2011). Estimación de precipitación diaria a través de un SIG con imágenes de radar meteorológico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 167-174.
- Vilchis-Mata, I. (2013). *Estimación y validación de precipitación derivada de imágenes de satélite y radar para uso en modelos hidrológicos* (150 pp.). Tesis doctoral. Toluca, México: Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Facultad de Ingeniería de la UAEM.
- WMO (1992). *Simulated Real-Time Intercomparison of Hydrological Models*. Operational Hydrology Report No. 38. Genoa: World Meteorological Organization.
- WMO (1986). *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff*. Operational Hydrology Report No. 23. Genoa: World Meteorological Organization.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Iván Vilchis-Mata  
Dr. Roberto Franco-Plata

Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Geografía  
Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria  
50110 Toluca, México, México  
Teléfono: +52 (722) 215 0255  
ivilchism@uaemex.mx  
rfplata@gmail.com

Dr. Khalidou M. Bâ  
Dr. Carlos Díaz-Delgado

Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Ingeniería  
Carretera Toluca Atlacomulco k. 14.5, Unidad San Cayetano  
50200 Toluca, Estado de México, México  
Teléfonos: +52 (722) (296) 555 051 y 1806 191 y 92 # 111  
khalidou@uaemex.mx  
cdiazd@uaemex.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

# Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala

• Rafaela María Laino-Guanes\* •  
*El Colegio de la Frontera Sur, México*

\*Autor de correspondencia

• Ricardo Bello-Mendoza •  
*University of Canterbury, New Zealand*

• Mario González-Espinosa • Neptalí Ramírez-Marcial •  
*El Colegio de la Frontera Sur, México*

• Francisco Jiménez-Otárola •  
*Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica*

• Karim Musálem-Castillejos •  
*El Colegio de la Frontera Sur, México*

## Resumen

Laino-Guanes, R. M., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Jiménez-Otárola, F., & Musálem-Castillejos, K. (julio-agosto, 2015). Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 61-74.

Se presenta una evaluación sobre la concentración de metales pesados en la cuenca alta del río Grijalva en microcuencas cuyos ríos abastecen de agua a comunidades de la región fronteriza México-Guatemala por sus posibles riesgos para la salud humana. Además, en virtud de las acciones actuales de prospección y del interés por el desarrollo de la minería en el futuro próximo, este estudio puede brindar valores de referencia sobre los cuales se pueda evaluar el impacto ambiental de tales actividades en la región. Se evaluó el contenido de metales (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) en agua superficial y en sedimentos durante la época de lluvias (agosto de 2011 y junio de 2012) y en época seca (enero de 2012 y diciembre de 2012) en las cuencas de los ríos Xelajú y Bacantón, así como en las subcuencas de los ríos Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal. Los resultados fueron contrastados con las normativas correspondientes de México y Canadá, y también, en el caso de los sedimentos, con los niveles de fondo de referencia para los Estados Unidos de América. Las concentraciones de Hg rebasaron los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en ambas normas y niveles de referencia revisados tanto en época de lluvias como en la seca. Los resultados sugieren que la descarga de aguas residuales de la ciudad de Motozintla de Mendoza al río Xelajú explica parcialmente el incremento de la concentración de Hg tanto en las aguas como en los sedimentos. Las concentraciones detectadas de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn fueron mínimas y no sobrepasaron los LMP en la norma mexicana; sin embargo, en algunos casos rebasaron los LMP establecidos en la norma canadiense y en los valores de referencia de los Estados Unidos.

**Palabras clave:** mercurio, ríos, minería, Motozintla de Mendoza.

## Abstract

Laino-Guanes, R. M., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Jiménez-Otárola, F., & Musálem-Castillejos, K. (July-August, 2015). Metal Concentrations in Water and Sediments in the Upper Grijalva River Basin, Mexico-Guatemala border. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 61-74.

This work presents an evaluation of heavy metal concentrations in the upper Grijalva River basin, in micro-basins with rivers that supply water to communities on the Mexico-Guatemala border, representing a possible risk to human health. In addition, given current prospecting activities and interest in developing mining in the near future, this study can provide reference values with which to evaluate the environmental impact of these activities in the region. Metal contents (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) were evaluated in surface water and in sediments during the rainy season (August 2011 and June 2012) as well as the dry season (January 2012 and December 2012) in the Xelaju and Bacanton River basins, as well as in the sub-basins of the Allende, Buenos Aires, Molino and Carrizal Rivers. The results were compared with norms corresponding to Mexico and Canada, and in the case of sediments, also with background reference levels in the United States. Concentrations of Hg exceeded the maximum allowable limits established by both norms and the reference levels mentioned, during both the rainy and dry seasons. The results suggest that wastewater from the city of Motozintla de Mendoza discharged into the Xelaju River partially explains the increase in Hg concentrations in the water and sediments. The concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn detected were minimal and did not exceed maximum limits allowed by Mexican norms, although in some cases they exceeded those established by Canadian norms and the United States reference values.

**Keywords:** Mercury, rivers, mining, Motozintla de Mendoza.

Recibido: 28/03/2014  
Aceptado: 31/03/2015

## Introducción

A pesar de que algunos metales son esenciales para los seres vivos, en altos niveles de exposición provocan efectos dañinos a la salud humana, así como a la flora y fauna (García-García, Pedraza-Garciga, Montalvo, Martínez, & Leyva, 2012; Jiménez-Cisneros, 2001; White & Rasmussen, 1998). Debido a su alto potencial tóxico, el As, Cd, Cr, Hg y el Pb son tomados en cuenta de forma particular y están considerados como contaminantes altamente peligrosos; sin embargo, otros metales como el Cu y el Zn también pueden resultar tóxicos si exceden ciertos niveles de concentración (Esteves, Gil, & Harvey, 1996; García-García *et al.*, 2012; Soto-Cruz, Carrillo-Chávez, & Suárez-Sánchez, 2011). Algunos metales tienden a acumularse en organismos acuáticos (“bioacumulación”) y alcanzan concentraciones sucesivamente mayores al ascender los niveles tróficos, lo que representa un riesgo para la salud de las personas que los consumen (Pérez-Cruz, Rangel-Ruiz, & Gamboa-Aguilar, 2013). Se ha observado, por ejemplo, que los efectos del Hg pueden verse intensificados al acumularse este metal en los tejidos de los peces (Jiménez-Cisneros, 2001). Estudios realizados con especies marinas advierten sobre tal efecto acumulativo y su transferencia en la cadena trófica, y afirman que varios metales pesados pueden ser considerados como agentes genotóxicos (Haesloop & Schirmer, 1985; Sánchez-Galan, Linde, Ayllon, & García-Vázquez, 2001). Un ejemplo de la transferencia de metales en la cadena trófica se reporta en la parte media de la cuenca del río Pilcomayo, en Bolivia, donde se detectaron altas concentraciones de metales en el cabello de los habitantes de las orillas de la cuenca, atribuibles al consumo de pescado y del agua del río; este río sufre contaminación por la explotación de minerales en la parte alta de la cuenca (Smolders, Archer, Stassen, Llanos-Cavero, & Hudson-Edwards, 2006).

Los desechos domésticos, agrícolas e industriales constituyen también fuentes principales de contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua (Castro & Valdés, 2012). La

determinación de las concentraciones naturales y de los aportes de origen antrópico de los metales pesados permite evaluar el nivel en que se encuentra afectada una zona determinada. Para este propósito es indispensable analizar tanto el agua como los sedimentos (Villanueva & Botello, 1992), debido a que los metales tienden a depositarse en los sedimentos de los ríos (Soto-Cruz *et al.*, 2011), aun cuando las concentraciones en agua sean bajas (Leal-Ascencio, Miranda, Sánchez, Prieto-García, & Gordillo, 2009; Szalinska, Haffner, & Drouillard, 2007). Los ríos constituyen una de las principales vías de transporte de metales a las zonas costeras, al ser transportados en el arrastre de materiales desde la cuenca media y alta (Zhang *et al.*, 1992). Los efectos de los metales pesados en los ecosistemas marinos son de particular interés, porque son contaminantes que persisten en los sedimentos y pueden ser liberados en el agua, quedando disponibles para la biota marina, lo cual representa una potencial amenaza para el funcionamiento del ecosistema (Visviki & Rachlin, 1991).

Estudios realizados en la cuenca media y baja del río Grijalva confirman la presencia de metales pesados tanto en las aguas como en los sedimentos de ríos y lagos que conforman la cuenca (Leal-Ascencio *et al.*, 2009; Pérez-Cruz *et al.*, 2013), así como en la desembocadura de este río en el Golfo de México (Rosales-Hoz, Carranza-Edwards, Santiago-Pérez, Méndez-Jaime, & Doger-Badillo, 1994; Vázquez, Elias, Aguayo, & Baeza, 1996; Villanueva & Botello, 1992). Sin embargo, existen muy pocos estudios sobre la presencia de metales en la parte alta de la cuenca (Alvarado-Arcia, Ilizaliturri-Hernández, Martínez-Salinas, & Torres-Dosal, 2014), lo cual es relevante para comprender el origen de dichos contaminantes y su dinámica a lo largo de toda la cuenca.

Por otra parte, en la cuenca alta del río Grijalva, tanto en México como en Guatemala, existen recursos minerales de gran interés para las empresas mineras (Copae, 2010; Roblero-Morales, 2011). En el Programa Nacional de Desarrollo Minero 2001-2006 de México, publicado en el

*Diario Oficial de la Federación* el 24 de noviembre de 2003, se afirma que en Chiapas existe un vasto potencial minero sin aprovechar. Durante 2010 se otorgaron 112 concesiones mineras en territorio chiapaneco (Roblero-Morales, 2011). Según el Sistema de Administración Minera de México, las concesiones en la parte alta del río Grijalva serían para la explotación de oro, plata, plomo, cobre y fosfato trisódico (SIAM, 2015). La extracción de estos minerales podría causar contaminación por mercurio, arsénico, plomo y otros productos asociados con la minería, dependiendo del proceso utilizado y del manejo de los residuos (Alpers, Myers, Millsap, & Regnier, 2014; Pinedo-Hernández, Marrugo-Negrete, & Diez, 2014; PNUMA, 2002; UNEP, 2013).

Ante este panorama, Alvarado-Arcia *et al.* (2014) advierten sobre la posibilidad de que la actividad minera aumente en los próximos años y con ella las repercusiones ambientales inherentes. La extracción minera provoca riesgos para la salud humana y disturbios al ambiente, generando suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de la vegetación y otros organismos (Puga, Sosa, Lebgue, Quintana, & Campos, 2006). La minería a cielo abierto es una de las industrias de más alto riesgo en el mundo tanto para quienes trabajan en ella, por los insumos que utiliza, como para las personas que viven en las comunidades aledañas, por el uso irracional de algunos recursos naturales como el agua, así como por los impactos extremos que genera (Copae, 2010; Osoreo-Plenge, Rojas-Jaimes, & Manrique-Lara-Estrada, 2012). Además de lo anterior, una vez que cesan las explotaciones mineras, a menudo los sitios quedan abandonados e impactan de manera negativa en la calidad de las aguas, suelos y aire de los ecosistemas que los contienen y la afectación al medio ambiente continúa en tanto no se tomen las medidas de remediación y saneamiento de los sitios (Kirschbaum, Murray, Arnosio, Tonda, & Cacciabue, 2012).

Este estudio pretende establecer una línea base en relación con la concentración de metales pesados, situación poco estudiada en la región. Como la presencia de metales en los ecosistemas

responde también a causas naturales, los valores presentados en este estudio podrían aportar al entendimiento de los niveles de fondo (o *background levels*) y construir un punto de referencia que pueda ser utilizado para evaluar si ha ocurrido o no una liberación de alguna sustancia contaminante en el futuro, en previsión de las posibles explotaciones mineras.

Los objetivos de este estudio son: (1) evaluar la presencia de metales en agua y sedimentos en seis tributarios del río Grijalva en la parte alta de la cuenca (frontera entre México y Guatemala); y (2) identificar si las aguas residuales de Motozintla de Mendoza (Chiapas), principal centro urbano en el área de estudio, contribuyen a la contaminación por metales pesados en el río receptor de estos desechos y si esto puede representar un riesgo potencial para las comunidades aguas abajo de la cuenca. Para ello se analiza la presencia de metales en los tributarios más importantes del río Xelajú, tres de los cuales constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para la población de Motozintla de Mendoza.

## Métodos

### Área de estudio

El área de estudio está conformada por las cuencas del río Xelajú y del río Bacantón, ubicadas en la frontera entre México y Guatemala, en la parte alta de la cuenca del río Grijalva (figura 1). La cuenca del río Xelajú se localiza en territorio mexicano, y ocupa parte de los municipios de Motozintla de Mendoza y de Mazapa de Madero en el estado de Chiapas. El río Bacantón nace en Guatemala, en el municipio Tacaná, departamento de San Marcos, y atraviesa la frontera con México en el municipio de Mazapa de Madero en Chiapas. Estos ríos son tributarios del río Grijalva, que desemboca en el Golfo de México, en el estado de Tabasco. La ciudad de Motozintla de Mendoza está ubicada en el centro de la cuenca del río Xelajú, cuyos principales tributarios son los ríos Allende, Buenos Aires y La Mina, que nacen al sur de la ciudad, y los

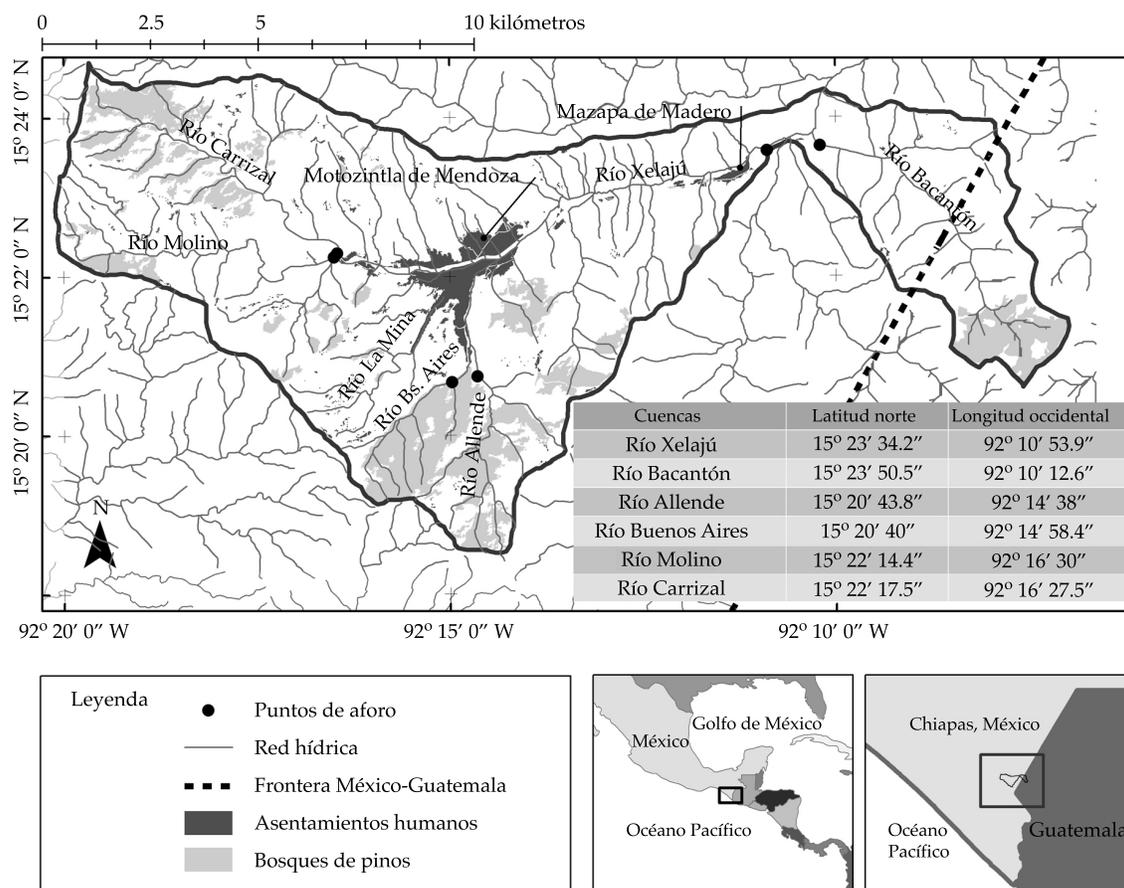


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, coordenadas geográficas de los puntos de aforo de las cuencas de los ríos Xelajú y Bacantón, y de las subcuencas de los ríos Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal, en la frontera entre México y Guatemala.

ríos Molino y Carrizal, que nacen al oeste de la misma. Dentro de la cuenca del río Xelajú se delimitaron las subcuencas de los ríos Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal, con el objetivo de detectar la presencia de metales pesados en sedimentos y en agua, antes y después de que los cauces hídricos atravesasen la ciudad de Motozintla de Mendoza.

La cuenca del río Xelajú tiene una superficie de 9 728 hectáreas y cerca de 33 068 habitantes (incluye a la ciudad de Motozintla de Mendoza con 23 755 habitantes). La cuenca del río Bacantón tiene 1 968 hectáreas y una población estimada de 2 321 habitantes (746 del lado mexicano y 1 575 del lado guatemalteco). Las subcuencas de los ríos Allende, Buenos Aires,

Molino y Carrizal tienen superficies de 884, 532, 1 146 y 1 693 hectáreas, y poblaciones estimadas de 563, 179, 1 498 y 1 751 habitantes, respectivamente (Laino-Guanes, Musálem-Castillejos, González-Espinosa, & Ramírez-Marcial, 2014).

La ciudad de Motozintla de Mendoza se abastece de agua superficial, principalmente de los ríos Allende, Buenos Aires y Carrizal, en tanto que las aguas residuales municipales son vertidas al río Xelajú sin recibir ningún tipo de tratamiento. Las otras comunidades de menor población, por lo general también se abastecen de fuentes superficiales de agua y vierten sus aguas residuales domésticas en terrenos propios contiguos a sus viviendas o en arroyos cercanos, y depositan las aguas negras de origen sanitario

en fosas sépticas. La mayor parte de las familias de Motozintla de Mendoza y el resto de las poblaciones rurales que habitan la zona de estudio viven en condiciones de alta pobreza, marginación y fuerte deterioro de los recursos naturales (Caballero *et al.*, 2006; Ordóñez, 2010).

La zona de estudio es de alta sismicidad debido a fallas geológicas (Plascencia-Vargas, González-Espinosa, Ramírez-Marcial, Álvarez-Solis, & Musálem-Castillejos, 2014). El sistema de fallas de Polochic-Motagua cruza a través del valle de Motozintla, donde aflora un complejo vulcano-plutónico que descansa tectónicamente sobre sedimentos mesozoicos parcialmente erosionados (Carfantan, 1977). La litología superficial de la zona está constituida por rocas sedimentarias, vulcano-sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, y metamórficas (INEGI, 1980; MAGA, 2005).

La temporada de lluvias se extiende desde mayo hasta octubre, y la temporada seca ocurre entre noviembre y abril. La precipitación media anual en la estación meteorológica de Motozintla de Mendoza (15° 22' 00" latitud norte; 92° 15' 30" longitud oeste; 1 210 m de altitud) es de 822 mm y en la estación de Buenos Aires (15° 19' 57" latitud norte; 92° 16' 03" longitud oeste; 1 720 m de altitud) es de 1 278 mm, de acuerdo con datos históricos (desde el año 1978 para la estación de Motozintla de Mendoza y desde el año 1982 para la de Buenos Aires) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2011).

#### *Obtención de muestras y determinación de metales pesados*

Se realizó la determinación cuantitativa de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn en agua y en sedimentos en el punto de aforo de las dos cuencas y de las cuatro subcuencas, cuyas coordenadas geográficas se presentan en el mapa de ubicación del área de estudio (figura 1). Se recolectaron en total 19 muestras simples de agua, usando para ello recipientes de plástico (polipropileno) de un litro con cierre hermético. Primero, se tomaron muestras en época de lluvias (agosto de 2011 y junio de 2012) y en

época de secas (enero de 2012) para el análisis de todos los metales. Posteriormente, como los resultados indicaron ausencia o cantidades ínfimas de estos elementos, con excepción del Hg, solamente este elemento fue analizado una vez más en diciembre de 2012. La obtención de las muestras en época de lluvias se realizó con un mínimo de 48 horas después de la última precipitación, con el fin de asegurar caudales base en todos los casos y prevenir mediciones provenientes de caudales pico en las cuales el arrastre de sedimentos podría ocasionar distorsión en los resultados.

Los cauces de dos de los ríos estudiados (Molino y Carrizal) se secaron por completo en la época de estiaje, por lo que no se obtuvieron muestras de agua. Asimismo, al borde de los mismos sitios donde se tomaron las muestras de agua, se realizó la recolección de las muestras de sedimentos en época de lluvias (junio de 2012), cuando todos los ríos presentaron caudal; se obtuvieron muestras con predominancia de arcillas o limo debido a que los metales tienden a acumularse en las partículas de menor tamaño depositadas en los lechos de los ríos (Pérez-Carreras, Moreno-García, & González-Parra, 1995; Singh, Hasnain, & Banerjee, 1999). Las muestras de sedimento fueron colectadas en recipientes de vidrio borosilicato con cierre hermético. En cada punto de aforo se colectó una muestra de un litro de sedimento superficial entre 0 y 15 cm de profundidad, compuesta por cinco submuestras. Las muestras de agua y de sedimentos se mantuvieron refrigeradas durante su traslado a los laboratorios.

La determinación analítica de Cr, Cu, Ni, Pb y Zn se hizo siguiendo la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. En los muestreos de agosto de 2011 y enero de 2012 se utilizó el método espectrofotométrico de absorción atómica con atomización con flama; los límites de cuantificación (LC) para los análisis de agua fueron los siguientes: para el Cr, Cu y el Ni de 200 µg/l; para el Pb de 190 µg/l, y para el Zn de 340 µg/l. Para el muestreo de junio de 2012 se utilizó un horno de grafito con mayor precisión; en este caso, los LC para los análisis de agua

fueron los siguientes: para el Cr de 10 µg/l, para el Cu y el Pb de 5 µg/l, para el Ni de 20 µg/l; la determinación del Zn no se realizó pues no se alcanzó la sensibilidad necesaria en el equipo. Los LC para los análisis de sedimento fueron para el Cr y el Ni de 5 mg/kg, para el Cu de 10 mg/kg, para el Pb de 0.2 mg/kg y para el Zn de 2 mg/kg. El espectrofotómetro de absorción atómica usado fue de marca VARIAN modelo SpectrAA220 y el horno de grafito VARIAN modelo GTA110. Para el control de calidad se utilizaron tres procedimientos: (1) uso de material de referencia certificado WasteWater™ Trace Metals, lote P192-500 de la marca ERA, (2) análisis de muestra por triplicado y (3) análisis de blanco de reactivo.

Los análisis de As, Cd y Hg fueron realizados con un espectrofotómetro de absorción atómica, marca GBC modelo AVANTA PM, con flama y generador de hidruros marca GBC, modelo HG 3000. Las muestras fueron previamente procesadas con un digestor semi-micro Kjeldahl de seis plazas marca LABCONCO. Los LC para los análisis de agua fueron para el As y el Hg de 0.05 µg/l, y para el Cd de 0.4 µg/l. Los LC para los análisis de sedimento fueron para el As de 0.18 mg/kg, para el Cd de 1.73 mg/kg y para el Hg de 0.25 mg/kg. Para cada parámetro se analizaron cuatro blancos de tratamiento y un triplicado para control de calidad. Asimismo, se hizo un triplicado de material de referencia certificado. Se siguieron los procedimientos según ET-QU03 de determinación de metales pesados por EAA (2008).

Además, se recolectaron muestras de agua en cada punto de muestreo para medir la du-

reza total (mg CaCO<sub>3</sub>/l) a través de la técnica volumétrica por titulación ácido-base según el método 2340 C de la APHA (1998).

#### Límites máximos permisibles por las normas mexicana y canadiense, y niveles de referencia para EEUU

Las concentraciones de metales en agua se compararon con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 (1994) que fija los Límites Máximos Permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano; esta legislación no incluye al Ni. También se consideraron las Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG, por sus siglas en inglés, *Canadian Environmental Quality Guidelines*), que establece parámetros de calidad de agua para la protección de la vida acuática referentes a la presencia de metales en aguas continentales. Las guías canadienses no incluyen al Cr total y para el caso del Cu, Ni y Pb proponen utilizar fórmulas basadas en la dureza del agua para calcular los valores guía (ver LMP y fórmulas en el cuadro 1).

En México no existen normas que establezcan LMP para metales en sedimentos; por lo tanto, los resultados de este estudio se compararon con la Norma Oficial Mexicana de Criterios para la Determinación de Suelos Contaminados por Metales Pesados (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004). Esta legislación no incluye valores de Cr total (sólo hexavalente), Cu ni Zn. También se utilizaron las guías canadienses CEQG que establecen valores de referencia de metales en sedimentos de cuerpos de agua continental.

Cuadro 1. Límites permisibles para metales en agua establecidos por la norma mexicana (NOM) y canadiense (CEQG).

Norma	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	(µg/l)							
NOM	50	5	50	2000	1	-	25	5 000
CEQG	5	0.09	-	$e^{0.8545 [\ln(\text{dureza})]} - 1.465 * 0.2 \mu\text{g/l}$	0.026	$e^{0.76 [\ln(\text{dureza})]} + 1.06 \mu\text{g/l}$	$e^{1.273 [\ln(\text{dureza})]} - 4.705 \mu\text{g/l}$	30

NOM: Norma Oficial Mexicana-127-SSA1-1994, que fija límites permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano.

CEQG: Guías de Calidad Ambiental Canadiense (por sus siglas en inglés, *Canadian Environmental Quality Guidelines*), que establecen parámetros de calidad de agua para la protección de la vida acuática referentes a la presencia de metales en aguas continentales.

Estas guías no incluyen al Ni y para el As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn establece dos valores: (1) el llamado Guía Provisional de Calidad del Sedimento (ISQG, por sus siglas en inglés, *Interim Sediment Quality Guideline*), que representa la concentración por debajo de la cual no se espera que ocurran efectos biológicos adversos, y (2) el llamado Nivel de Efecto Probable (PEL, por sus siglas en inglés, *Probable Effect Level*), que es la concentración sobre la cual aparecen con frecuencia efectos biológicos adversos. Finalmente, se compararon los resultados de metales en sedimentos con los niveles de fondo (*background levels*) establecidos en la tabla de referencia (*Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment*) emitida por la Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés, *National Oceanic and Atmospheric Administration*). Ver LMP y niveles de referencia en el cuadro 2.

## Resultados y discusión

Se detectó la presencia de Hg en todas las cuencas (cuadro 3). En la época de lluvias, en agosto de 2011, las concentraciones resultaron no cuantificables; el LC (límite de cuantificación) del método de análisis utilizado fue inferior al LMP (límite máximo permisible) establecido por

la norma mexicana, pero superior al LMP de la norma canadiense. En junio de 2012, las concentraciones de Hg en todos los ríos, excepto en el río Molino, sobrepasaron el LMP, según la norma mexicana y la canadiense. En época seca, los ríos Molino y Carrizal no presentaron caudal, mientras que en los ríos Allende y Buenos Aires las concentraciones de Hg resultaron no cuantificables según el método de análisis. En enero de 2012 se encontraron las concentraciones de Hg más elevadas en los ríos Xelajú y Bacantón, 3.26  $\mu\text{g/l}$  y 2.58  $\mu\text{g/l}$ , respectivamente; estos valores sobrepasan los LMP de las normas mexicana y canadiense. En diciembre de 2012, los valores de Hg encontrados en los ríos Xelajú y Bacantón sobrepasaron el LMP de la norma canadiense, pero no el de la norma mexicana (ver LMP en el cuadro 1).

En todas las cuencas, las concentraciones de Cu, Pb y Zn resultaron no cuantificables según el método de análisis, con excepción de: (1) junio de 2012, cuando en el río Carrizal se detectó 21  $\mu\text{g/l}$  de Cu; este valor es inferior al LMP de la norma mexicana, pero superior al LMP de la norma canadiense, calculado a partir de la dureza del agua; (2) junio de 2012, cuando en los ríos Xelajú y Carrizal se detectaron 10 y 12  $\mu\text{g/l}$  de Pb, respectivamente; estos valores son inferiores a los LMP de la norma mexicana, pero superiores a los LMP

Cuadro 2. Límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por la norma mexicana (NOM) y canadiense (CEQG), y niveles de fondo de referencia para Estados Unidos (NOAA, 1999).

Norma		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
		(mg/kg)							
NOM		22	37	-	-	23	1 600	400	-
CEQG	ISQG	5.9	0.6	37.3	35.7	0.17	-	35	123
	PEL	17	3.5	90	197	0.486	-	91.3	315
NOAA		1.1	0.1-0.3	7-13	10-25	0.004-0.051	9.9	4-17	7-38

NOM: Norma Oficial Mexicana-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar suelos contaminados por metales.  
CEQG: Guías de Calidad Ambiental Canadiense (por sus siglas en inglés, *Canadian Environmental Quality Guidelines*) para sedimentos de cuerpos de agua continental.

ISQG: Guía Provisional de Calidad del Sedimento (por sus siglas en inglés, *Interim Sediment Quality Guideline*).

PEL: Nivel de Efecto Probable (por sus siglas en inglés, *Probable Effect Level*).

NOAA: Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (por sus siglas en inglés, *National Oceanic and Atmospheric Administration*), niveles de fondo (*background levels*) de la tabla de referencia (*Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment*).

Cuadro 3. Concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y de Zn en agua de los ríos Xelajú, Bacantón, Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal en época de lluvias (agosto de 2011 y junio de 2012) y en época seca (enero de 2012 y diciembre de 2012 para el caso del Hg).

Cuenca	As ( $\mu\text{g/l}$ )		Cd ( $\mu\text{g/l}$ )		Cr ( $\mu\text{g/l}$ )		Cu ( $\mu\text{g/l}$ )	
	Ago. 2011	Ene. 2012	Ago. 2011	Jun. 2012	Ago. 2011	Ene. 2012	Ago. 2011	Ene. 2012
Río Xelajú	0.55	1.48	< 0.4	< 0.4	< 200	< 200	< 200	< 200
Río Bacantón	0.42	0.70	< 0.4	< 0.4	< 200	< 200	< 200	< 200
Río Allende	< 0.05	0.16	< 0.4	< 0.4	< 200	< 200	< 200	< 200
Río Buenos Aires	0.21	0.96	< 0.4	< 0.4	< 200	< 200	< 200	< 200
Río Molino	< 0.05	Cauce seco	< 0.4	< 0.4	Cauce seco	< 10	< 200	Cauce seco
Río Carrizal	< 0.05	Cauce seco	< 0.4	< 0.4	Cauce seco	< 10	< 200	Cauce seco

Cuadro 3 (continuación). Concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y de Zn en agua de los ríos Xelajú, Bacantón, Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal en época de lluvias (agosto de 2011 y junio de 2012) y en época seca (enero de 2012 y diciembre de 2012 para el caso del Hg).

Cuenca	Hg ( $\mu\text{g/l}$ )		Ni ( $\mu\text{g/l}$ )		Pb ( $\mu\text{g/l}$ )		Zn ( $\mu\text{g/l}$ )	
	Ago. 2011	Ene. 2012						
Río Xelajú	< 0.05	3.26	< 200	< 200	< 190	< 190	< 340	< 340
Río Bacantón	< 0.05	2.58	< 200	< 200	< 190	< 190	440	< 340
Río Allende	< 0.05	< 0.05	< 200	< 200	< 190	< 190	< 340	< 340
Río Buenos Aires	< 0.05	< 0.05	< 200	< 200	< 190	< 190	< 340	< 340
Río Molino	< 0.05	Cauce seco	< 200	Cauce seco	< 190	Cauce seco	< 340	Cauce seco
Río Carrizal	< 0.05	Cauce seco	< 200	Cauce seco	< 190	Cauce seco	< 340	Cauce seco

de la norma canadiense, calculados a partir de la dureza del agua; cabe señalar que el LC del método de análisis del Pb utilizado en agosto de 2011 y enero de 2012 supera el LMP de la norma mexicana; y (3) agosto de 2011, cuando en el río Bacantón se detectó 440 µg/l de Zn, valor inferior al LMP de la norma mexicana, pero superior al de la norma canadiense; el LC del método de análisis del Zn supera el LMP de la norma canadiense.

En todas las cuencas, las concentraciones de Cd, Cr y Ni resultaron no cuantificables, según los métodos de análisis. El LC del método de análisis utilizado para el Cd es superior al LMP de la norma canadiense. En el caso del Cr, en agosto de 2011 y enero de 2012, el LC del método de análisis fue superior al LMP de la norma mexicana; sin embargo, en junio de 2012 el método tuvo mayor precisión y permitió detectar concentraciones inferiores a este límite.

Tanto en época de lluvias como en estiaje, las concentraciones de As encontradas estuvieron por debajo de los LMP de las normas mexicana y canadiense, o resultaron no cuantificables según el método de análisis utilizado.

En los sedimentos de los ríos Xelajú, Bacantón, Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal, las concentraciones de Hg detectadas no superaron el LMP de la norma mexicana (cuadro 4). Sin embargo, de acuerdo con la norma canadiense, estos valores se encuentran por encima del PEL y del ISQG, con excepción de los ríos Carrizal y Bacantón, donde las concentraciones de Hg detectadas fueron inferiores al PEL (ver LMP en el cuadro 2). En los sedimentos del río

Bacantón, el Hg resultó no cuantificable; el LC del método sobrepasa los valores del ISQG y de la NOAA. Las concentraciones de Hg detectadas en los sedimentos de todas las cuencas superan los niveles de la NOAA.

Las concentraciones de As, Cu, y Cr en los sedimentos de todos los ríos resultaron inferiores a los LMP de las normas mexicana y canadiense; sin embargo, en algunos casos superaron los niveles de la NOAA.

Las concentraciones de Cd y Pb en los sedimentos de todas las cuencas resultaron no cuantificables; en el caso del Cd, el LC del método fue superior a los valores del ISQG y de la NOAA. Las concentraciones de Ni y Zn en los sedimentos de todos los ríos resultaron inferiores a los LMP de las normas mexicana, canadiense y de la NOAA.

La falta de normas para metales en sedimentos es una tarea pendiente en México y otros países latinoamericanos; la legislación debe considerar los aspectos prioritarios sobre las condiciones geográficas y ambientales de los cuerpos de agua en la región (Leal-Ascencio *et al.*, 2009).

### Mercurio y la ciudad de Motozintla de Mendoza

Los resultados de los análisis de metales pesados sugieren que las concentraciones de Hg detectadas en la zona de estudio superan los LMP de las normas mexicana y canadiense en el caso del agua; y los LMP de la norma canadiense y de la NOAA en el caso de los sedimentos.

Cuadro 4. Concentraciones de Cd, As, Hg, Cu, Cr, Ni, Pb y de Zn en sedimentos de los ríos Xelajú, Bacantón, Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal en época de lluvias (junio de 2012).

Cuenca	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	(mg/kg)							
Río Xelajú	1.04	< 1.73	8.45	28.09	1.29	7.12	< 0.2	3.29
Río Bacantón	0.37	< 1.73	5.62	21.96	< 0.25	9.36	< 0.2	2.25
Río Allende	1.31	< 1.73	9.63	25.33	0.74	6.73	< 0.2	3.36
Río Buenos Aires	0.53	< 1.73	32.58	23.13	0.52	7.58	< 0.2	2.72
Río Molino	0.56	< 1.73	19.03	22.98	0.81	7.37	< 0.2	4.67
Río Carrizal	0.92	< 1.73	24.08	29.68	0.31	7.10	< 0.2	2.61

Por el contrario, las concentraciones de los otros metales analizados (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) resultaron inferiores a los LMP de la norma mexicana (aunque en algunos casos superiores a los LMP de la norma canadiense y/o de la NOAA) o no cuantificables, según el método de análisis utilizado. Por esta razón, en este apartado se analiza sólo la presencia de Hg en agua y en sedimentos de los ríos antes y después de su paso por la ciudad de Motozintla de Mendoza. Antes de la ciudad se consideraron los resultados obtenidos en los puntos de aforo de los ríos Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal (tributarios del río Xelajú), y después de la ciudad se consideraron los resultados obtenidos en el punto de aforo del río Xelajú (figura 1).

Se analizaron los resultados de los cuatro muestreos de Hg en agua: dos en época de lluvia y dos en época seca, en la cual dos de los cauces se secaron por completo (cuadro 3); los datos no presentaron relación clara entre la presencia de Hg con la época del año. Sin embargo, los resultados sugieren que la presencia de Hg se detecta con mayor concentración en el caudal de salida de la ciudad de Motozintla de Mendoza,

al menos en cantidades superiores al LC, según el método de análisis. Debido a la irregularidad del comportamiento en cuanto a la aparición de Hg en agua durante los diferentes muestreos, nos enfocamos en los resultados del mes de junio de 2012, cuando hubo presencia detectable en todos los puntos muestreados, situación que no sucedió en ninguna de las otras tres épocas de muestreo.

La cantidad de Hg en agua aumentó luego de su paso por la ciudad de Motozintla de Mendoza (figura 2), aunque en ambos casos (antes y después de la ciudad), los valores detectados superaron los LMP de la norma mexicana (NOM-127) y canadiense (CEQG).

Del mismo modo, la concentración de Hg en sedimentos en junio de 2012 fue superior luego de que el río atravesó la ciudad (figura 3) y, en ambos casos, los valores detectados sobrepasaron los LMP de la norma canadiense (ISGG y PEL) y la NOAA, a pesar de que no alcanzaron el LMP de la norma mexicana (NOM-147) para suelos contaminados por metales (23 mg/kg).

Las fuentes de Hg pueden ser de origen natural o antropogénico. Las actividades volcánicas, evaporación de superficies terrestres y

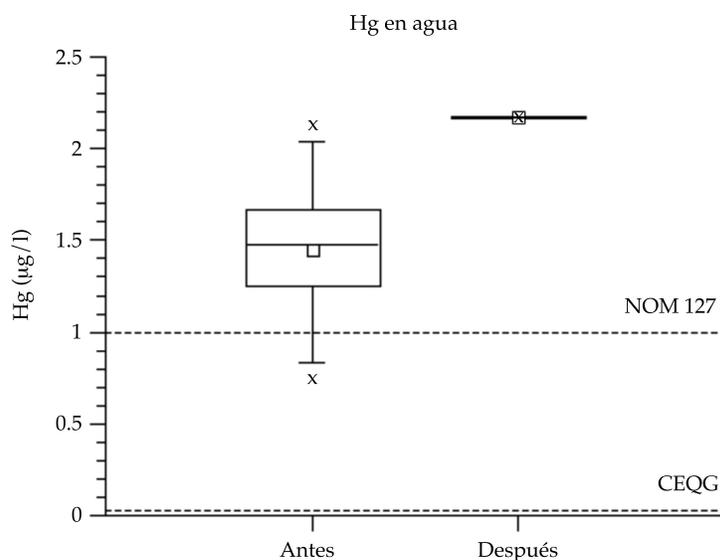


Figura 2. Concentración de Hg en agua en junio de 2012 (mediana  $\pm$  cuartil inferior y superior) antes (incluye los ríos tributarios Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal) y después (punto de aforo del río Xelajú) de su paso por la ciudad de Motozintla de Mendoza. Límites máximos permisibles por la norma mexicana (NOM-127) y la canadiense (CEQG).

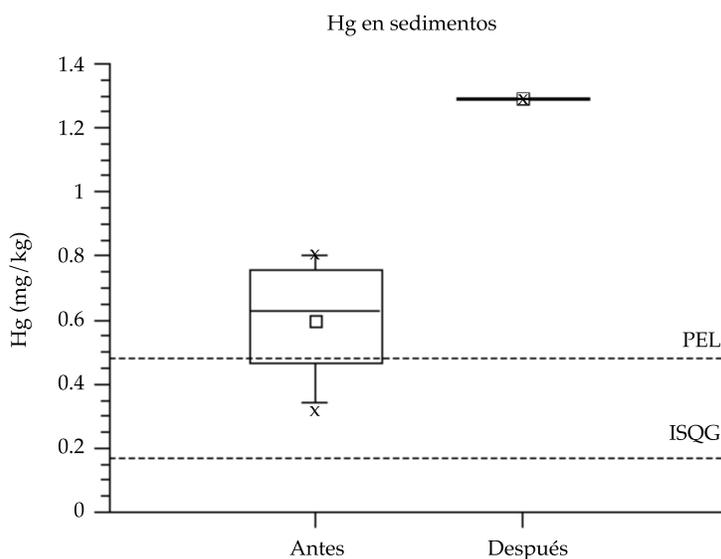


Figura 3. Concentración de Hg en los sedimentos en junio de 2012 (mediana  $\pm$  cuartil inferior y superior) antes (incluye los ríos tributarios Allende, Buenos Aires, Molino y Carrizal) y después (punto de aforo del río Xelajú) de que los ríos atraviesen la ciudad de Motozintla de Mendoza. Valores guías de calidad ambiental canadiense (ISQG y PEL).

acuáticas, degradación de minerales, incendios forestales y erosión de las rocas constituyen fuentes naturales de Hg (Pirrone *et al.*, 2010; PNUMA, 2002). También existen varias fuentes de origen antropogénico, como generación de energía y calor a partir del carbón; producción de cemento; uso de lámparas fluorescentes, faros de automóviles, manómetros, termostatos, termómetros y otros instrumentos y su rotura accidental; interruptores eléctricos; amalgamas dentales; incineración de desechos (municipales, médicos y peligrosos); vertederos de basura; crematorios; y minería, que incluye la extracción de Hg como producto principal o subproducto de la extracción de otros metales, como oro, plata o zinc (Pirrone *et al.*, 2010; UNEP, 2013).

Parte de las cantidades de Hg detectadas en la zona de estudio podría ser de origen geológico natural, teniendo en cuenta la presencia de volcanes en la región, principalmente las menores cantidades detectadas antes de que el río atraviese la ciudad de Motozintla de Mendoza. Luego de su paso por la ciudad, el aumento de

las concentraciones de Hg podría ser tanto de origen natural como de origen antropogénico, como la recepción de aguas municipales residuales sin previo tratamiento, así como debido a la remoción y acarreo de sedimentos. Sin embargo, es necesario obtener mayor cantidad de datos para confirmar lo anterior.

## Conclusiones

El metal detectado en mayor frecuencia y concentración fue el Hg tanto en agua como en sedimentos. Las concentraciones de Hg aumentan luego de que el río Xelajú atraviesa la ciudad de Motozintla de Mendoza. Se detectaron otros elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn), aunque en concentraciones muy bajas o por debajo de los LMP establecidos en las normas mexicana y canadiense. Se necesita mayor información para concluir que tales metales no están afectando de manera negativa al ecosistema y la salud de las comunidades aguas abajo de la cuenca.

## Agradecimientos

Agradecemos a los responsables de los laboratorios de El Colegio de la Frontera Sur, Juan Jesús Morales, en San Cristóbal de Las Casas, y Adriana Zavala Mendoza, en Chetumal, por las determinaciones de metales pesados. Reconocemos el apoyo de Anahí Hernández García, Abel Roblero Vázquez, Hugo Santacreu, Juan Suárez, Diana Norriero, Romeo Jiménez, Alejandro Alcudia y Pedro Santiago, por su colaboración en la recolección de las muestras de agua y sedimentos. Agradecemos a Andrés Sierra-Soler por su apoyo en la toma de muestras, así como por su ayuda en la obtención de información geográfica relevante del área de estudio y procesamiento de los límites de las subcuencas en la fase inicial de esta investigación. Este trabajo ha sido posible gracias al respaldo del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (Fordecyt) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) mediante el convenio 143303 "Gestión y estrategias de manejo sustentable para el desarrollo regional en la cuenca hidrográfica transfronteriza Grijalva", apoyado entre 2010 y 2012 por fondos concurrentes de la entonces Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental (Sernapam) del estado de Tabasco.

## Referencias

- Alpers, C. N., Myers, P. A., Millsap, D., & Regnier, T. B. (2014). Arsenic Associated with Gold Mining in the Sierra Nevada Foothills: Case Study and Field Trip Guide for Empire Mine State Historic Park, California. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79, 553-587.
- Alvarado-Arcia, A., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Martínez-Salinas, R. I., & Torres-Dosal, A. (2014). Riesgos ambientales y de salud por metales (cadmio y mercurio) presentes en suelos y sedimentos del río Grijalva (pp. 240-256). Cap. 9. En M. González-Espinosa, & M. C. Brunel-Manse (Eds.). *Montañas, pueblos y agua. Dimensiones y realidades de la Cuenca Grijalva*. Vol. 1. México, DF: El Colegio de la Frontera Sur y Editorial Juan Pablos.
- APHA Standard Methods (1998). *Método 2340 C* (pp. 2-37) (20 ed.). Washington, DC: APHA.
- Caballero, L., Macías J. L., García-Palomo, A., Saucedo, G. R., Borselli, L., Sarocchi, D., & Sánchez, J. M. (2006). The September 8-9, 1998 rain-triggered flood events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Natural Hazards*, 39, 103-126.
- CEQG (2003). *Canadian Council of Miners of the Environment*. Canadian Environmental Quality Guidelines. Recuperado de [www.st-ts.cmce.ca](http://www.st-ts.cmce.ca).
- Carfantan, J.Ch. (1977). La cobijadura de Motozintla - Un paleoarco volcánico en Chiapas. Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología, Revista*, 1(2), 133-137.
- Castro, G., & Valdés, J. (2012). Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimentos de una playa artificial, en la bahía San Jorge 23°S, norte de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(2), 267-281.
- Conagua (2011). *Atlas del agua en México 2011*. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Copae (2010). *Situación actual del agua de los ríos Tzalá y Quivichil en el área de influencia de la mina Marlin, ubicada en los municipios de San Miguel Ixtahuacán y Sipacapa, departamento de San Marcos, Guatemala. Tercer informe anual del monitoreo y análisis de la calidad del agua*. Comisión Pastoral Paz y Ecología. Recuperado de <http://goldcorpoutofguatemala.files.wordpress.com/2010/07/tercer20informe20anual20del20monitoreo.pdf>
- Esteves, J. E., Gil, M., & Harvey, M. (1996). *Evaluación de la contaminación por metales en sedimentos y materiales en suspensión de la cuenca Turbio - Gallegos*. Puerto Madryn, Argentina: Fundación Patagonia Natural.
- García-García, N., Pedraza-Garciga, J., Montalvo, J. F., Martínez, M., & Leyva, J. (2012). Evaluación preliminar de riesgos para la salud humana por metales pesados en las bahías de Buenavista y San Juan de los Remedios, Villa Clara, Cuba. *Revista Cubana de Química*, 24(2), 126-135.
- Haesloop, U., & Schirmer, M. (1985). Accumulation of Orally Administered Cadmium by the Eel (*Anguilla anguilla*). *Chemosphere*, 14(10), 1627-1634.
- INEGI (1980). *Conjunto de datos vectoriales de las cartas temáticas de Geología*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jiménez-Cisneros, B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México, DF: Editorial Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
- Kirschbaum, A., Murray, J., Arnosio, M., Tonda, R., & Cacciabue, L. (2012). Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 248-264.
- Laino-Guanes, R. M., Musálem-Castillejos, K., González-Espinosa, M., & Ramírez-Marcial, N. (2014). El uso del agua en Motozintla de Mendoza, Chiapas: conflictos, contaminación y posibles soluciones (pp. 445-462). Cap. 17. En M. González-Espinosa, & M. C. Brunel-Manse (Eds.). *Montañas, pueblos y agua. Dimensiones y realidades de la Cuenca Grijalva*. Vol. 2. México, DF: El Colegio de la Frontera Sur y Editorial Juan Pablos.

- Leal-Ascencio, M. T., Miranda, S., Sánchez, E., Prieto-García, F., & Gordillo, A. (2009). Metals Pollution in the El Limon Lagoon, Chiapas, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3), 415-421.
- MAGA (2005). *Mapa geológico*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
- NOAA (1999). *United States. Screening Quick Reference Tables*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <http://response.restoration.noaa.gov/cpr/sediment/squirt/squirt.html>
- NMX-AA-051-SCFI Norma Oficial Mexicana – Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (2001). México, DF: Secretaría de Economía.
- NOM-127-SSA1 Norma Oficial Mexicana - Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (1994). México, DF: Secretaría de la Salud.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1 Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio (2004). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Ordóñez, C. E. (2010). Modos de vida de la población rural en microcuencas de las partes altas de los ríos fronterizos de México y Guatemala (pp. 14-17). En *Red de espacios de innovación socioambiental. Innovación socioambiental y desarrollo en la frontera sur de México*. México, DF: El Colegio de la Frontera Sur.
- Osores-Plenge, F., Rojas-Jaimes, J. E., & Manrique-Lara-Estrada, C. H. (2012). Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: un problema de salud pública [versión electrónica]. *Acta méd. Peruana*, 29(1), 38-42. Recuperado de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1728-59172012000100012&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1728-59172012000100012&lng=es&nrm=iso).
- Pérez-Carreras, L., Moreno-García, A. M., & González-Parra, J. (1995). Influencia de las fracciones arcilla y arena en el contenido y disponibilidad de metales pesados en suelos. *Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*, 1, 83-89.
- Pérez-Cruz, Y. G., Rangel-Ruiz, L., & Gamboa-Aguilar, J. (2013). Metales en almejas y sedimentos en la Reserva de la Biosfera "Pantanos de Centla" Tabasco, México. *Hidrobiológica*, 23(1), 1-8.
- Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J., & Diez, S. (2014). Speciation and Bioavailability of Mercury in Sediments Impacted by Gold Mining in Colombia. *Chemosphere*, 119, 1289-1295.
- Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R. B., Friedli, H. R., Leaner, J., Mason, R., Mukherjee, A. B., Stracher, G. B., Streets, D. G., & Telmer, K. (2010). Global Mercury Emissions to the Atmosphere from Anthropogenic and Natural Sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5951-5964.
- Plascencia-Vargas, H., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Álvarez-Solis, D., & Musálem-Castillejos, K. (2014). Características físico-bióticas de la cuenca del río Grijalva (pp. 29-79). Cap. 1. En M. González-Espinosa, & M. C. Brunel-Manse (Eds.). *Montañas, pueblos y agua. Dimensiones y realidades de la Cuenca Grijalva*. Vol. 1. México, DF: El Colegio de la Frontera Sur y Editorial Juan Pablos.
- PNUMA (2002). *Evaluación mundial sobre el mercurio. Productos químicos - División de Tecnología, Industria y Economía*. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Programa Nacional de Desarrollo Minero 2001-2006 [en línea]. *Diario Oficial de la Federación*, 24 de noviembre de 2003. Recuperado de <http://www.economia.gob.mx/files/transparencia/PRG4.pdf>.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5(1-2), 149-155.
- Roblero-Morales, M. (2011). *El despertar de la serpiente, la Sierra Madre de Chiapas en riesgo: extracción minera y comunidades en resistencia en Chicomuselo, Chiapas*. Tesis de maestría. San Cristóbal de Las Casas, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Santiago-Pérez, S., Méndez-Jaime, C., & Doger-Badillo, R. (1994). Study of Anthropogenically Induced Trace Metal on the Continental Shelf in the Southeastern Part of the Gulf of Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 9-13.
- Sánchez-Galan, S., Linde, A., Ayllon, F., & García-Vázquez, E. (2001). Induction of Micronuclei in Eel (*Anguilla anguilla* L.) by Heavy Metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 49(2), 139-143.
- Singh, A. K., Hasnain, S. I., & Banerjee, D. K. (1999). Grain Size and Geochemical Partitioning of Heavy Metals in Sediments of the Damodar River – A Tributary of the Lower Ganga, India. *Environmental Geology*, 39(1), 90-98.
- SIAM (2015). Sistema de Administración Minera [en línea]. Secretaría de Economía de México. Recuperado de <http://www.cartografia.economia.gob.mx/cartografia/#>.
- Smolders, A., Archer, J., Stassen, M., Llanos-Cavero, J. C., & Hudson-Edwards, K. (2006). Concentraciones metálicas en cabellos de habitantes de las orillas de la cuenca media del río Pilcomayo. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 19, 13-22.
- Soto-Cruz, O., Carrillo-Chávez, J., & Suárez-Sánchez, J. (2011). Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos del río Zahuapan, Tlaxcala, México. En R.

- Jiménez-Guillen, & M. L. Hernández-Rodríguez (Eds.). *Zahuapan: río-región-contaminación* (pp. 57-78). Tlaxcala, México: El Colegio de Tlaxcala, A.C.
- Szalinska, E., Haffner, G., & Drouillard, K. (2007). Metals in the Sediments of the Huron-Erie Corridor in North America: Factors Regulating Metal Distribution and Mobilization. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 12(4), 217-236.
- UNEP (2013). *Mercury, Time to Act. Chemical Branch - Division of Technology, Industry and Economics*. Geneva: United Nations Environment Programme.
- Vázquez, G. F., Elias, D. M., Aguayo, J. E., & Baeza, A. (1996). Trace Metal Species in Aquatic Samples of the Tabasco Lagoons, Mexico. *Environment International*, 22(3), 377-382.
- Villanueva, F. S., & Botello, A. V. (1992). Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 47-61.
- Visviki, I., & Rachlin, J. W. (1991). The Toxic Action and Interactions of Copper and Cadmium to the Marine Alga *Dunaliella minuta*, in Both Acute and Chronic Exposure. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(2), 271-275.
- White, P. A., & Rasmussen, J. B. (1998). The Genotoxic Hazards of Domestic Wastes in Surface Waters. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 410(3), 223-236.
- Zhang, J., Huang, W., Liu, S., Liu, M., Yu, Q., & Wang, J. (1992). Transport of Particulate Heavy Metals towards the China Sea: A Preliminary Study and Comparison. *Mar. Chem.*, 40, 161-178.

## Dirección institucional de los autores

M.C. Rafaela María Laino-Guanes

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)  
Departamento de Conservación de la Biodiversidad  
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora  
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 2122 4845  
rafilaino@gmail.com

Dr. Ricardo Bello-Mendoza

University of Canterbury  
Department of Civil and Natural Resources Engineering  
8140 Christchurch, NEW ZEALAND

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)  
Departamento de Conservación de la Biodiversidad  
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora  
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (962) 6289 800, extensión 5440  
rbello@ecosur.mx

Dr. Mario González-Espinosa

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)  
Departamento de Conservación de la Biodiversidad  
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora  
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (967) 6749 000, extensión 1100  
mgonzale@ecosur.mx

Dr. Neptalí Ramírez-Marcial

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)  
Departamento de Conservación de la Biodiversidad  
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora  
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (967) 6749 000, extensión 1321  
neptalirm@gmail.com

Dr. Francisco Jiménez-Otárola

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)  
30501 Cartago, Turrialba, COSTA RICA  
Teléfono: +506 2558 2651  
fjimenez@catie.ac.cr

Dr. Karim Musálem-Castillejos

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)  
Departamento de Conservación de la Biodiversidad  
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora  
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 98122 3778  
k.musalem@gmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor

# Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango, México

• Palmira Bueno-Hurtado\* •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México*

\*Autor de correspondencia

• Armando López-Santos •

*Universidad Autónoma Chapingo, México*

• Ignacio Sánchez-Cohen • Miguel Agustín Velásquez-Valle •

• José Luis González-Barrios •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México*

## Resumen

Bueno-Hurtado, P., López-Santos, A., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., & González-Barrios, J. L. (julio-agosto, 2015). Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI en el estado de Durango, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 75-84.

En el mundo se están tomando acciones para evaluar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en distintos países. Acorde a lo indicado en el Plan Nacional de Desarrollo en México se han realizado ya varios inventarios nacionales de GEI en distintos sectores. En el presente trabajo se realizó una cuantificación de las emisiones y absorciones de GEI debido al cambio de uso de suelo en el estado de Durango. Se aplicó la metodología del IPCC, mediante el programa *Greenhouse Gas Inventory Software* versión 1.3.1. Se calcularon las emisiones de gases distintos al CO<sub>2</sub> producto de quema. El grupo de vegetación que perdió la mayor cantidad de biomasa y por ende emitió mayor CO<sub>2</sub> fue coníferas, por otro lado, el abandono de tierras agrícolas provocó la captura de CO<sub>2</sub> en mayor medida por la recuperación de matorral xerófilo y latifoliadas. En cuanto a las emisiones de GEI distintas al CO<sub>2</sub> producto de quema, las mayores cantidades se emiten en las zonas donde se encuentran coníferas.

**Palabras clave:** conversión, bosques, agricultura, quema.

## Abstract

Bueno-Hurtado, P., López-Santos, A., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., & González-Barrios, J. L. (July-August, 2015). *Land Use Changes and their Effects on GHG Dynamics in the State of Durango*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 75-84.

Actions are being taken worldwide to evaluate greenhouse gas (GHG) emissions in different countries. According to reports by the National Development Plan in Mexico, several national GHG inventories have been performed by different sectors. The present work quantifies the emissions and absorption of GHG resulting from land use changes in the state of Durango. The IPCC method was applied using the *Greenhouse Gas Inventory Software*, version 1.3.1. Emissions of gases other than CO<sub>2</sub> produced by burning were calculated. Coniferous vegetation lost the largest amount of biomass and therefore emitted the most CO<sub>2</sub>, while abandoned agricultural land resulted in a capture of CO<sub>2</sub>, mostly from the recuperation of xeric shrubs and hardwoods. Most of the GHG emissions (other than CO<sub>2</sub> produced by burning) were emitted in regions containing coniferous vegetation.

**Keywords:** Conversion, forest, agriculture, burning.

Recibido: 14/05/2014

Aceptado: 09/04/2015

## Introducción

Los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) se encuentran en el Artículo 12 del protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones

Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), cuyo objetivo es asistir a los países no Anexo I, que en esencia son países en desarrollo. Los proyectos de MDL son más de 7 450, de los cuales 53 se refieren a proyectos de forestación y refo-

restación, que son pocos si se comparan con los de agricultura (219), manejo de residuos (944) o emisiones derivadas de combustibles fósiles (236) (UNFCCC, 2014). Los MDL se enfocan en reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), lo que implica en primera instancia, realizar una cuantificación de gases emitidos hacia la atmósfera, por lo que el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (PICC), genera metodologías; una de estas metodologías es la que se expone en las Directrices del IPCC para los inventarios de GEI, versión revisada en 1996. Estas Directrices del IPCC exponen la realización de inventarios de GEI en 5 Módulos, uno de los cuales es el Cambio de uso de suelo y silvicultura.

Los cambios de uso del suelo y en particular la deforestación, contribuyen en la emisión de GEI (Mas y Flamenco-Sandoval, 2011), que se refleja en el sector cambio de uso de suelo y silvicultura al emitir alrededor de 1.6 Gt de carbono (C) anualmente (CGE, 2005). Cabe resaltar, que las actividades de cambios de uso de suelo no solo originan emisiones sino también secuestro (Rootzén et al., 2010). Además de CO<sub>2</sub>, el cambio de uso de suelo también implica liberación de metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y monóxido de carbono (CO) (EPA, 2010; Manso, 2003; PNUMA, 2005).

En México, la Ley General de Cambio Climático (2012) establece la integración y actualización de inventarios de GEI, tanto a nivel nacional como estatal, esto para las distintas categorías emisoras, dentro de las que se encuentra la categoría de bosques y usos de suelo. Es por esto, que el objetivo del presente estudio es realizar un inventario de la emisión y captura de GEI debido a los cambios de uso de suelo, mediante la metodología del IPCC en el estado de Durango.

## Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó para el estado de Durango, que se encuentra ubicado entre los paralelos 22° 19' y 26° 48' de latitud norte y entre los meridianos 107° 11' y 102° 28' de longitud

oeste. Se utilizó el programa *Greenhouse Gas Inventory Software* versión 1.3.1; la metodología de cálculo fue la propuesta en las Directrices del IPCC para los inventarios de gases efecto invernadero, versión revisada en 1996 (IPCC, 1996).

Se consideró que el cambio de uso de suelo emite y captura GEI, la emisión se produce a partir del cambio de bosques y selvas hacia tierras de cultivo y pastizal inducido, y la captura a partir de tierras de cultivo abandonadas con regeneración de vegetación leñosa.

Para calcular la superficie de las existencias de vegetación, se procesaron las cartas de INEGI de Uso de Suelo y Vegetación (USyV) serie IV (2007), serie III (2002), serie II (1993) y serie I (1985) escala 1:250000 con el programa *ArcMap* 9.3.

Para el cálculo se utilizaron algunos valores por defecto que se muestran en el Cuadro 1, obtenidos del INEGI, 2006 y de la guía de las buenas prácticas del IPCC (SEMARNAT e INE, 2006; GPG-LULUCF, 2003).

La metodología del IPCC calcula la dinámica de GEI como se describe a continuación:

## CO<sub>2</sub> liberado por conversión de tierras forestal a otros usos

Estimación de la pérdida de biomasa:

$$PB = SC * (BAC - BDC)$$

Donde *PB* = pérdida anual de biomasa (kt ms); *SC* = superficie convertida anualmente (kha); *BAC* = biomasa antes de la conversión (t ms ha<sup>-1</sup>); *BDC* = biomasa después de la conversión (t ms ha<sup>-1</sup>).

Estimación del carbono liberado por la quema de biomasa aérea *in situ*:

$$\Delta CI = ((PB * FQI) * FOI) * CF$$

Donde  $\Delta CI$  = cantidad de carbono liberado de la biomasa quemada *in situ* (kt C); *PB* = pérdida anual de biomasa (kt ms); *FQI* = fracción de biomasa quemada *in situ*; *FOI* = fracción

Cuadro 1. Valores por defecto tomados del IPCC (GPG-LULUCF, 2003) e Inventario Nacional de GEI (Semarnat & INE, 2006).

Valor por defecto	Grupo de vegetación	
Biomasa antes de la conversión		<b>t ms* ha</b>
	Coníferas	93
	Latifoliadas	61.6
	Selva subcaducifolia	104.1
	Selva baja	37.31
	Matorral xerófilo	37
Biomasa después de la conversión		<b>t ms ha</b>
	Coníferas	28.2
	Latifoliadas	28.0
	Selva subcaducifolia	32.4
	Selva baja	23.3
	Matorral xerófilo	17.2
		<b>Adimensional</b>
Fracción de la biomasa quemada en el sitio	Todos	0.5
Fracción de biomasa oxidada en el sitio	Todos	0.9
Fracción de carbono quemada debajo del suelo	Todos	0.5
Fracción de la biomasa quemada fuera del sitio	Todos	0.5
Fracción de biomasa oxidada fuera del sitio	Todos	0.9
Fracción de carbono de la biomasa por debajo del suelo	Todos	0.5

\*Materia seca.

de biomasa oxidada *in situ*;  $CF$  = fracción de carbono de la biomasa aérea.

Estimación del carbono liberado por la quema de la biomasa aérea fuera del bosque:

$$BQF = PB * fbq$$

Donde  $BQF$  = cantidad de biomasa quemada fuera del bosque (kt ms);  $PB$  = pérdida anual de biomasa (kt ms);  $fbq$  = fracción de biomasa quemada fuera del bosque.

Carbono liberado debido a la quema fuera del bosque:

$$\Delta CF = (BQF * fbo) + CF$$

Donde  $\Delta CF$  = cantidad de carbono liberado de la biomasa quemada fuera del bosque (kt C);  $BQF$  = cantidad de biomasa quemada fuera del bosque (kt ms);  $fbo$  = fracción de biomasa oxidada fuera del bosque;  $CF$  = fracción de carbono

de la biomasa aérea quemada fuera del bosque.

Estimación del carbono total liberado por la combustión de la biomasa aérea *in situ* y fuera del bosque:

$$\Delta CIF = \Delta CI + \Delta CF$$

Donde  $\Delta CIF$  = carbono total liberado de la quema *in situ* y fuera del bosque (kt C);  $\Delta CI$  = cantidad de carbono liberado por quema *in situ* (kt C);  $\Delta CF$  = cantidad de carbono liberado de la biomasa quemada fuera del bosque (kt C).

Estimación del  $CO_2$  liberado por la descomposición de la biomasa aérea:

$$\Delta CD = ((SM * (BAC - BDC)) * FAD) * CF$$

Donde  $\Delta CD$  = carbono liberado de la biomasa aérea por descomposición (kt C);  $SM$  = superficie media convertida (promedio de 10 años)

(kha);  $BAC$  = biomasa antes de la conversión ( $t\ ms\ ha^{-1}$ );  $BDC$  = biomasa después de la conversión ( $t\ ms\ ha^{-1}$ );  $FAD$  = fracción abandonada que se descompone;  $CF$  = fracción de carbono de la biomasa aérea.

Estimación del total de emisiones de  $CO_2$  procedentes de la conversión de bosques y praderas:

$$\Delta CTC = (\Delta CIF + \Delta CD) * (44 / 12)$$

Donde  $\Delta CTC$  = total anual de  $CO_2$  liberado por causa de conversión de bosques y praderas ( $Gg\ de\ CO_2$ );  $\Delta CIF$  = carbono liberado por quema *in situ* y fuera del bosque ( $kt\ C$ );  $\Delta CD$  = carbono liberado de la biomasa aérea por descomposición ( $kt\ C$ );  $44/12$  es la relación entre el peso molecular del  $CO_2$  y el  $C$ .

### CO<sub>2</sub> capturado por conversión debido al abandono de tierras agrícolas

Las tasas de regeneración disminuyen con el tiempo, es por eso que se consideran los periodos de los 20 años anteriores al del inventario y de 20 a 100 años atrás.

Cálculo de la absorción anual de carbono en la biomasa aérea (tierras abandonadas en los últimos veinte años):

$$\nabla BA = (SA * TC) * CF$$

Donde  $\nabla BA$  = absorción anual de carbono en la biomasa aérea ( $kt\ C$ );  $SA$  = superficie total abandonada y en etapa de regeneración en los últimos 20 años ( $k\ ha$ );  $TC$  = tasa anual de crecimiento de la biomasa aérea ( $t\ ms\ ha^{-1}$ );  $CF$  = fracción de carbono de la biomasa aérea.

Para realizar el cálculo de la superficie abandonada en los últimos 20 años, se compararon las superficies de vegetación de las cartas de Uso de Suelo y Vegetación series II y IV de INEGI; la tasa anual de crecimiento de la biomasa por regeneración natural se obtuvo del INEGI (2010) (Semarnat & INE, 2009) y se muestra en el cuadro 1.

Cálculo de la absorción anual de carbono de la biomasa aérea (tierras abandonadas durante más de veinte años):

$$\nabla BA_{>20} = (SA_{>20} * TC) * CF$$

Donde  $\nabla BA_{>20}$  = absorción anual de carbono en la biomasa aérea en tierras con más de 20 años de abandono ( $kt\ C$ );  $SA_{>20}$  = superficie total abandonada y en etapa de regeneración durante más de 20 años ( $k\ ha$ );  $TC$  = tasa anual de crecimiento de la biomasa aérea ( $t\ ms\ ha^{-1}$ );  $CF$  = fracción de carbono de la biomasa aérea.

Para el caso de las tierras abandonadas en más de 20 años se tomó como referencia las superficies de vegetación de las cartas de Uso de Suelo y Vegetación series I y IV del INEGI. La tasa anual de crecimiento se muestra en el cuadro 1.

Cálculo del total de las remociones de  $CO_2$  en las tierras abandonadas.

Solo se suman los resultados obtenidos de las formulas anteriores, tal como lo indica la fórmula siguiente:

$$\nabla VCTA = \nabla BA + \nabla BA_{>20}$$

Donde  $\nabla VCTA$  = absorción total de carbono de las tierras abandonadas ( $kt\ C$ );  $\nabla BA$  = absorción anual de carbono de la biomasa aérea en los primeros 20 años ( $kt\ C$ );  $\nabla BA_{>20}$  = absorción anual de carbono de la biomasa aérea durante más de 20 años ( $kt\ C$ ).

### Gases distintos al CO<sub>2</sub> liberados por quema

Estimación de nitrógeno liberado:

$$\Delta N = \Delta CIF * N:C$$

Donde  $\Delta N$  = total de nitrógeno liberado ( $kt\ N$ );  $\Delta CIF$  = carbono total liberado de la quema *in situ* y fuera del bosque ( $kt\ C$ );  $N:C$  = relación nitrógeno-carbono. La relación  $N:C$  es de 0.01 de

acuerdo con el valor por defecto propuesto en el libro de trabajo del IPCC (IPCC, 1996).

Estimación de las emisiones de gases distintos del CO<sub>2</sub>:

$$\Delta GD = \Delta CIF * RE$$

Donde:  $\Delta GD$  = emisiones de gases distintos de CO<sub>2</sub> (Kt C);  $\Delta CIF$  = carbono liberado de la quema *in situ* y fuera del bosque (kt C);  $RE$  = relaciones de emisión de gases distintos del CO<sub>2</sub>.

Las relaciones de emisión se obtuvieron del libro de trabajo (IPCC, 1996) y son de 0.012 para CH<sub>4</sub>, 0.06 para CO, 0.007 para N<sub>2</sub>O y de 0.121 para NO<sub>x</sub>.

Finalmente, para calcular las emisiones distintas del CO<sub>2</sub>, se realiza una conversión de acuerdo a las distintas relaciones de conversión que tiene cada tipo de gas.

$$\Delta Q = \Delta GD * RC$$

Donde  $\Delta Q$  = emisiones de la quema bosques (Gg CH<sub>4</sub>, Gg CO, Gg N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>);  $\Delta GD$  = emisiones de gases distintos de CO<sub>2</sub> (Kt C);  $RC$  = relación de conversión; CO (28/12), CH<sub>4</sub> (16/12) N<sub>2</sub>O (44/28), NO<sub>x</sub> (46/12).

### Análisis de incertidumbre

El porcentaje de incertidumbre se calculó con las siguientes ecuaciones, la primera se aplicó a las cantidades inciertas que se combinaron por multiplicación y la segunda cuando las cantidades inciertas se combinaron por adición y sin correlacionarse:

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Donde  $U_{total}$  = incertidumbre porcentual en el producto de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza de 95% dividida entre el total);  $U_i$  = incertidumbres porcentuales asociadas con cada una de las cantidades:

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n}$$

Donde  $U_{total}$  = incertidumbre porcentual en la suma de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95% dividido entre el total);  $X_i$  = cantidades inciertas, y  $U_i$  = incertidumbres porcentuales asociadas con ellas.

Debe señalarse que las incertidumbres de los valores por defecto les corresponde una incertidumbre que se cita en las guías de buenas prácticas del IPCC (GPG-LULUCF, 2003), en cuanto a las incertidumbres de los datos en los que se tomó como referencia el nivel nacional, estas se obtuvieron del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (Semarnat & INE, 2006). Respecto a la incertidumbre del cálculo de las superficies de uso de suelo, se obtuvo con la ecuación siguiente:

$$\% \text{ de incertidumbre} = \frac{1}{\mu} \frac{(4\sigma)}{2} (100)$$

Donde  $\sigma$  = desviación estándar;  $\mu$  = media de la distribución.

## Resultados y discusión

### CO<sub>2</sub> liberado por conversión de tierras forestal a otros usos

La superficie con vegetación leñosa y que cambió a un uso agrícola en el estado de Durango se muestra en la figura 1, lo cual equivale a una pérdida anual de biomasa de 8 292.52 kt de materia seca (ms), de este total, 4 146.25 kt ms se quema y 3 731.65 kt ms se oxida *in situ*. El grupo de vegetación en la que se presentó mayor pérdida de biomasa fue coníferas, en contraparte selva subcaducifolia perdió la menor cantidad de biomasa (cuadro 2).

Las pérdidas de biomasa mencionadas en el párrafo anterior, significan una liberación total de carbono producto de la descomposición de 2 067.7 kt C (7 581.52 Gg de CO<sub>2</sub>) y 3 731.65 kt C (13 682.67 Gg de CO<sub>2</sub>) por concepto de quema (figura 2).

Al respecto, en el país se emiten 52 180 Gg de CO<sub>2</sub> y 62 321 Gg CO<sub>2</sub> por combustión

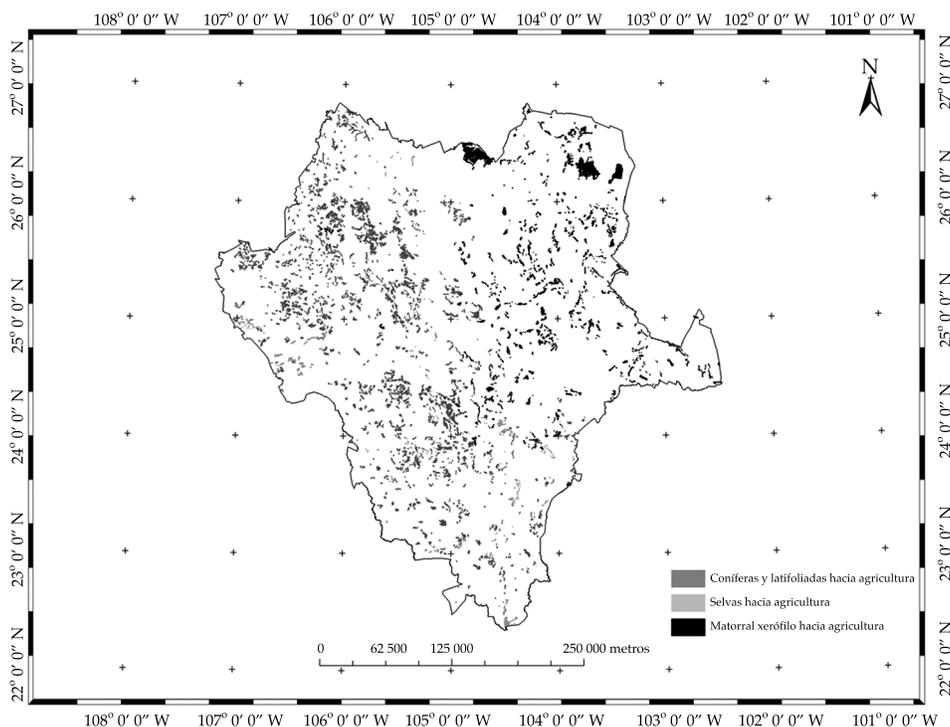


Figura 1. Pérdidas de vegetación de 1993 al 2007.

Cuadro 2. Carbono liberado por la quema de biomasa en el sitio y fuera de bosque.

Vegetación de 2002	PAB (kt ms)	BQS (kt ms)	BOS (kt ms)
Coníferas	6 623.79	3 311.90	2 980.71
Latifoliadas	366.37	183.19	164.87
Selva baja	103.08	51.54	46.39
Selva subcaducifolia	60.90	30.45	27.41
Matorral xerófilo	1 138.38	569.19	512.27
Total, Durango	8 292.52	4 146.25	3 731.65

PAB Pérdida anual de biomasa; BQS Biomasa quemada en el sitio; BOS Biomasa oxidada en el sitio.

y descomposición de biomasa (Semarnat & INE, 2009); es decir, que el estado de Durango contribuye en un 26.22% con emisiones producidas por quema y con 12.16% debido a la descomposición. Al respecto, el estado de Sinaloa, emite 664.47 Gg de CO<sub>2</sub> por quema y 1 993.38 Gg de CO<sub>2</sub> por descomposición (IEGEIE-Sinaloa, 2005), esto es, 4.85% y 26.29%, de las emisiones de Durango. Otro estado con resultados sobre emisiones de CO<sub>2</sub> por cambio de uso de suelo es Chiapas, que presenta

emisiones de 2 133 Gg, producto del cambio de tierras agrícolas y praderas a uso forestal (IEGEIC, 2011), que significan un 10% de total de emisiones de Durango.

Se debe tener en cuenta que en las comparaciones del párrafo anterior, los estados cuentan con distintas proporciones de vegetación; en Durango, 31% del territorio estatal, está constituido por bosques de coníferas y encinos, en Sinaloa dominan las selvas secas y en Chiapas predominan las selvas húmedas (INEGI, 2014).

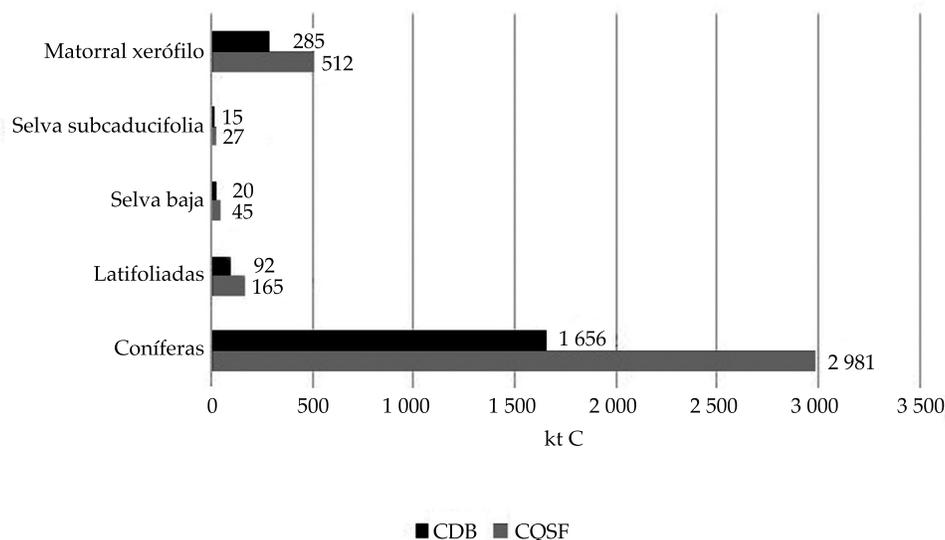


Figura 2. Carbono liberado por quema dentro y fuera del bosque (CQSF); carbono liberado por descomposición de la biomasa sobre el suelo (CDB).

### Gases distintos al CO<sub>2</sub> liberados por quema

Por concepto de quema de biomasa, los gases distintos al CO<sub>2</sub> liberados fueron de 261.21 Gg de CO, 0.21 Gg de N<sub>2</sub>O, 7.42 Gg de NO<sub>x</sub> y 29.85 Gg de CH<sub>4</sub> (figura 3). Al comparar estos resultados, el estado de Sinaloa emite 10% de CH<sub>4</sub>, 10% de CO, 9.52% de N<sub>2</sub>O y 10.24% de NO<sub>x</sub> de los totales emitidos por Durango (IEGEI-Sinaloa, 2005). El estado de Guanajuato emite 2.88% de CH<sub>4</sub>, 2.87% de CO, 4.76% de N<sub>2</sub>O y 2.83% de NO<sub>x</sub> de los totales emitidos por el estado de Durango (IEGEI-Guanajuato). Lo anterior se debe a que aparentemente existe mayor quema en Durango que en los otros dos estados.

### CO<sub>2</sub> capturado por conversión debido al abandono de tierras agrícolas

Los grupos de vegetación en regeneración debido a superficies abandonadas a partir del año 1985 fueron matorral xerófilo con 324.44 kha y latifoliadas con 85.57 kha, mientras que a partir de 1993, fueron latifoliadas con 117.76 kha seguido de matorral xerófilo con 70.95 kha (cuadro 3).

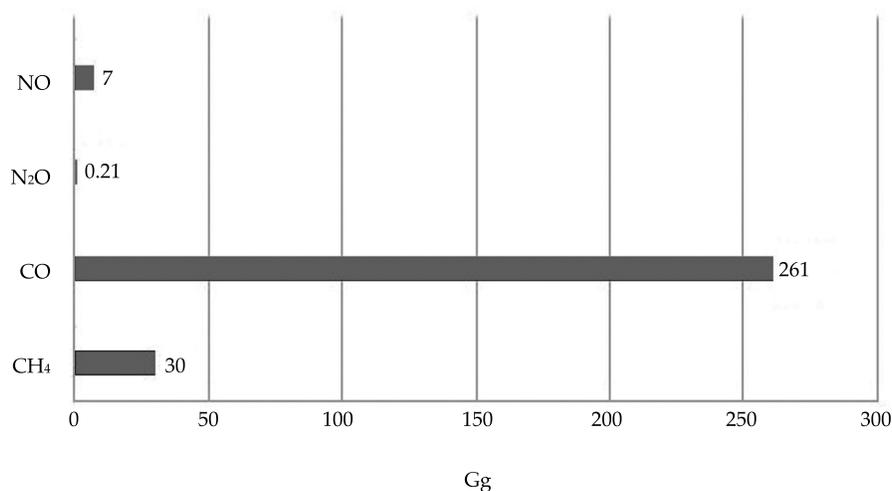
El total de absorción de CO<sub>2</sub> para Durango fue de 872.06 Gg de CO<sub>2</sub>, estas absorciones son 52% menores en el estado de Chiapas y del orden del 200% y 300% más en Guanajuato y Sinaloa, respectivamente (IEGEIC, 2011; IEGEI-Guanajuato, 2005; IEGEIE-Sinaloa, 2005).

### Resumen de dinámica de CO<sub>2</sub>

Por concepto de cambio de uso de suelo forestal y agrícola, se capturan anualmente en el estado de Durango 872.06 Gg de CO<sub>2</sub> y se liberan hacia la atmósfera 21 264.2 Gg de CO<sub>2</sub> (figura 4). La incertidumbre asociada a los resultados de abandono de tierras agrícolas y de conversión de tierras forestales de fueron de 20.57% y 36.94%, respectivamente.

### Conclusiones

Se realizó una estimación de la emisión y captura de GEI debido al cambio de uso de suelo forestal y agrícola en el estado de Durango. El grupo de vegetación que perdió la mayor cantidad de biomasa y por ende emitió la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> fue el de coníferas seguido

Figura 3. Emisiones de gases distintos al CO<sub>2</sub> producto de quema en el estado de Durango.

Cuadro 3. Conversión de áreas agrícolas y pastizales de los años 1985 y 1993 (pérdidas) a grupos de vegetación en 2007 (ganancias).

Grupo de vegetación	AAM (kha)	CAC* (kt C)	AAP (kha)	CAC' (kt C)
Coníferas	14.83	9.63	42.45	27.59
Latifoliadas	85.57	55.62	117.76	76.54
Selva subcaducifolia	16.72	2.17	5.18	2.85
Selva baja	53.49	6.95	9.2	5.06
Matorral xerófilo	324.44	42.17	70.95	9.22
Carbono total (kha)				237.83
CO <sub>2</sub> total capturado (Gg)				872.06

\*Para más de 20 años; • para los primeros 20 años; AAM área abandonada por más de 20 años; AAP área abandonada en los primeros 20 años; CAC captura anual de carbono.

de matorral xerófilo, latifoliadas, selva baja y selva subcaducifolia. Las mayores cantidades emitidas de CO<sub>2</sub> son por el concepto de quema y las menores por la descomposición de la biomasa. Por otro lado, el abandono de tierras agrícolas provoca en mayor medida la captura de CO<sub>2</sub> por la recuperación de matorral xerófilo y latifoliadas. En cuanto a las emisiones de GEI distintas al CO<sub>2</sub> producto de quema, las mayores cantidades se emiten en las zonas donde se encuentran coníferas.

## Referencias

- CGE (2005). *Handbook on Land-Use Change and Forestry Sector* (600 pp.). Consultative Group of Experts on National Communications from Parties not included in Annex I to the Convention. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- EPA (2010). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Source [on line]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Office of Atmospheric Programs. Citado el 1 de septiembre de 2011. Recuperado de World Wide Web: <http://www.epa.gov/outreach/>

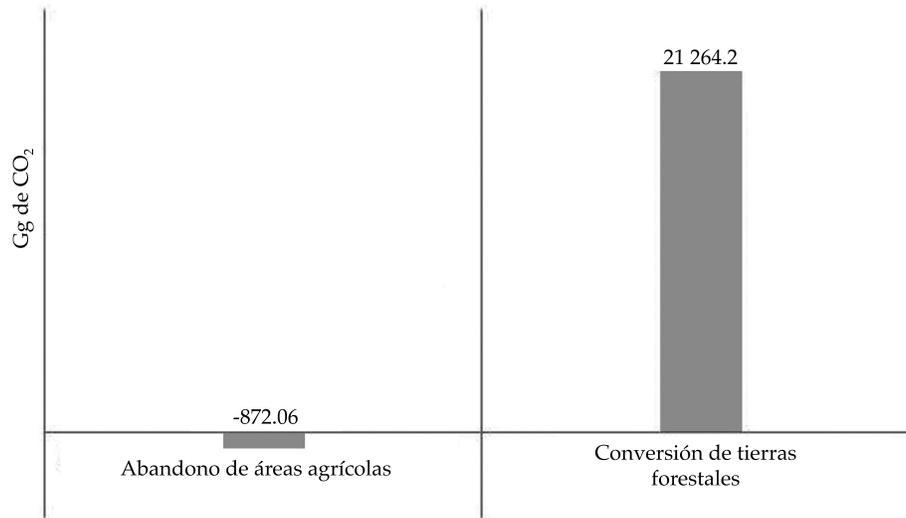


Figura 4. CO<sub>2</sub> liberado y capturado en el estado de Durango.

pdfs/Methane-and-Nitrous-Oxide-Emissions-From-Natural-Sources.pdf.

GPG-LULUCF (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (600 pp.). Intergovernmental Panel on Climate Change.

IEGEI (2005). *Guanajuato. Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Guanajuato*. Guanajuato.

IEGEIC (2011). *Inventario Estatal de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Chiapas. Programa de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas* (72 pp.). México, DF: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, El Colegio de la Frontera Sur, Colegio de Posgraduado, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Medio Ambiente Vivienda e Historia Natural, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Conservation International Mexico A.C.

IEGEIE (2005). *Sinaloa. Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Sinaloa* (196 pp.). Culiacán, México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de Sinaloa, Dirección General de Educación en Ciencia y Tecnología del Mar, Universidad Politécnica de Sinaloa.

INEGI (2011). *Flora y fauna de Durango*. Citado el 3 de mayo 2011. Recuperado de [http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/dur/territorio/recursos\\_naturales.aspx?tema=me&e=10](http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/dur/territorio/recursos_naturales.aspx?tema=me&e=10).

INEGI (2014). *Información por entidad*. Citado el 15 de mayo 2014. Recuperado de <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/dur/>.

IPCC (1996). *Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996: Libro de trabajo*. Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

Kaul, M., Dadhwal, V. K., & Mohren, G. M. J. (2009). Land Use Change and Net C flux in Indian Forests. *Forest Ecology and Management*, 258, 100-108.

Mas, J. F., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*, 5(1), 1-24.

Manso, J. R. (2003). Emisiones de gases y partículas producto de los incendios forestales en Cuba entre 1989 y 1999. Sitio Argentino de Producción Animal. Citado el 1 de mayo de 2011. Recuperado de [http://www.produccion-animal.com.ar/incendios\\_y\\_uso\\_del\\_fuego/41-gases.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/incendios_y_uso_del_fuego/41-gases.pdf).

PNUMA (2005). *Emisiones de dioxinas y furanos por quema incontrolada de biomasa* (42 pp.). Ginebra: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals.

Rootzén, J. M., Berndes, G., Ravindranath, N. H., Somashekar, H. I., Murthy, I. K., Sudha, P., & Ostwald, M. (2010). Carbon Sequestration versus Bioenergy: A Case Study from South India Exploring the Relative Land-Use Efficiency of Two Options for Climate Change Mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 34, 116-123.

Semarnat-INE (2006). *México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (254 pp.). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.

Semarnat-INE (2009). *Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (274 pp.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF: Instituto Nacional de Ecología.

Semarnat (2009). *Cambios en el uso del suelo en México*. Citado el 1 de septiembre de 2011. Recuperado de [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen\\_2009/02\\_ecosistemas/cap2\\_2.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/02_ecosistemas/cap2_2.html).

UNFCCC (2014). *Clean Development Mechanism (CDM)*. Citado el 1 de septiembre de 2014. CDM Project Search. Recuperado de <http://cdm.unfccc.int/>.

## Dirección institucional de los autores

M.C. Palmira Bueno Hurtado

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera  
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango, México  
[bueno.palmira@inifap.gob.mx](mailto:bueno.palmira@inifap.gob.mx)

Dr. Armando López Santos

Universidad Autónoma Chapingo  
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas  
25330 Bermejillo, Durango, México  
[armando.lopezsantos@gmail.com](mailto:armando.lopezsantos@gmail.com)

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera  
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango, México  
[sanchez.ignacio@inifap.gob.mx](mailto:sanchez.ignacio@inifap.gob.mx)

Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera  
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango, México  
[velasquez.agustin@inifap.gob.mx](mailto:velasquez.agustin@inifap.gob.mx)

Dr. José Luis González Barrios

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera  
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango, México  
[gonzalez.barrios@inifap.gob.mx](mailto:gonzalez.barrios@inifap.gob.mx)



Haga clic aquí para escribir al autor

# Elasticidad-precio de corto y largo plazos de la demanda de agua residencial de una zona árida. Caso de estudio: La Paz, B.C.S., México

• Gerzaín Avilés-Polanco\* •

*Universidad Autónoma de Baja California Sur, México*

Autor de correspondencia

• Marco A. Almendarez-Hernández •

*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México*

• Víctor Hernández-Trejo •

*Universidad Autónoma de Baja California Sur, México*

• Luis Felipe Beltrán-Morales •

*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México*

## Resumen

Avilés-Polanco, G., Almendarez-Hernández, M. A., Hernández-Trejo, V., & Beltrán-Morales, L. F. (julio-agosto, 2015). Elasticidad-precio de corto y largo plazos de la demanda de agua residencial de una zona árida. Caso de estudio: La Paz, B.C.S., México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 85-99.

La sobrexplotación, intrusión salina y limitaciones en la oferta hídrica constituyen los principales problemas de zonas áridas costeras. Considerando que la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México, presenta estas condiciones, nos hemos propuesto estimar la elasticidad-precio de corto y largo plazos de la demanda de agua residencial para medir el impacto que tiene la estructura de precios en bloque en el uso eficiente. Los resultados revelan una elasticidad de largo plazo mayor a la de corto plazo. Este trabajo contribuye con evidencia empírica sobre el ajuste en el consumo ante incrementos permanentes en los precios.

**Palabras clave:** demanda de agua residencial, precios en bloque, elasticidad precio, corto y largo plazos.

## Abstract

Avilés-Polanco, G., Almendarez-Hernández, M. A., Hernández-Trejo, V., & Beltrán-Morales, L. F. (July-August, 2015). Short-and Long-Term Price Elasticity of Residential Water Demand in an Arid Region. Case Study of La Paz, BCS, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 85-99.

Overexploitation, saline intrusion and limited water supplies are the main problems faced by coastal arid zones. Since these conditions occur in the city of La Paz, we have proposed that the short- and long-term price elasticity of residential water demand be estimated in order to measure the impact of block pricing on efficient use. The results demonstrate that long-term elasticity is greater than short-term. This work contributes to the empirical evidence regarding adjustments in consumption in response to permanent increases in prices.

**Keywords:** Residential water demand, block prices, price elasticity, short-term and long-term.

---

Recibido: 30/10/2013

Aceptado: 24/04/2015

---

## Introducción

Uno de los principales retos de las grandes áreas urbanas en zonas áridas costeras consiste en enfrentar el problema de sustentabilidad del servicio de provisión de agua, ya que éstas cada vez requieren mayores volúmenes para satis-

facer la demanda que con frecuencia excede la capacidad de oferta (Soto & Bateman, 2006). La ausencia de adecuados instrumentos económicos de mercado, como estructuras de precios en bloque que contribuyan en el manejo de la demanda, puede llevar al uso ineficiente del recurso y su agotamiento. La evidente necesidad de encontrar

estos instrumentos ha motivado un rápido crecimiento en investigaciones sobre estructuras de precios (Howe & Linaweaver, 1967; Cavanagh, Hanemann, & Stavins, 2001).

Las entidades responsables de suministrar el servicio de agua local en México son los Organismos Operadores Municipales de Agua Potable y Alcantarillado (OOMSAPAS). De acuerdo con Elnaboulsi (2009), éstos deben diseñar estructuras tarifarias conforme a cuatro criterios básicos: eficiencia, equidad, viabilidad financiera y simplicidad. En condiciones de escasez y restricciones para poder incrementar la oferta hídrica, los OOMSAPAS deben fomentar el uso eficiente mediante precios que incentiven el uso más racional del agua para evitar su agotamiento (Bartoszczuk & Nakamori, 2004). En este sentido, Klawitter (2003) señala que el diseño del precio sustentable del agua urbana, además debe satisfacer y conciliar las necesidades actuales y de futuras generaciones mediante el uso eficiente del recurso, recuperar los costos totales (incluyendo costos de suministro, costos de oportunidad y externalidades), así como lograr equidad y justicia para diferentes usuarios. Dalhuisen, Florax, De Groot y Nijkamp (2001) agregan que la estructura de precios debe ser justa, inducir al uso eficiente y ser administrativamente factible. Considerando lo anterior, es importante probar si las estructuras de precios cumplen o no con estos objetivos; en caso de cumplirlos, también es relevante analizar en qué magnitud lo logran. Para ello resulta necesario estimar la variación porcentual que experimenta la demanda de agua como consecuencia de una variación porcentual del precio denominada elasticidad-precio de la demanda de agua. Ésta será inelástica si la variación porcentual en la cantidad demandada es menos que proporcional a la variación porcentual del precio. Será unitaria si la variación es igualmente proporcional y será elástica si la variación resulta más que proporcional. Por otra parte, la importancia de contrastar si existen diferencias entre la elasticidad de corto plazo y largo plazo radica en conocer si existen cambios en el nivel de consumo en el largo plazo derivado de incrementos

permanentes en el tiempo sobre la estructura de precios, lo que implica que los usuarios ajustan su consumo uno más periodos posteriores a la factura actual. La utilidad de estimar las elasticidades de corto y largo plazos para los OOMSAPAS consiste en conocer los parámetros necesarios para diseñar estructuras tarifarias que les permitan cumplir metas determinadas en la reducción de la demanda de agua.

## Antecedentes

En muchos países, las estructuras de precios de los mercados de agua residencial y electricidad están basadas en sistemas de precios en bloque debido a políticas de distribución del ingreso mediante sistemas de precios progresivos, donde los hogares pobres, que consumen menos, pagan precios más bajos. Los organismos responsables del suministrar estos servicios no sólo buscan la eficiencia económica, sino también otros objetivos, como equidad y aceptación local (Ruijs, 2009). Actualmente existe una extensa literatura acerca de estimaciones de funciones de demanda en estos sistemas, donde hay consenso en que la demanda de agua residencial es inelástica, como lo muestran Dalhuisen *et al.* (2003), en un meta-análisis de elasticidades precio de estudios que datan de 1963 a 1998, en el que se encontró una elasticidad media de -0.41. La elasticidad varía entre lugares, tiempo y técnicas de estimación, que van desde mínimos cuadrados ordinarios (MCO) hasta variables instrumentales y modelos de elección discreta continua (DCC, por sus siglas en inglés), con la finalidad de confrontar problemas de simultaneidad de los precios en bloques (Hewitt & Hanemann, 1995). Los datos utilizados en estas técnicas básicamente consisten en micro-datos aplicados en sección cruzada o panel de datos.

En estudios que utilizan macro-datos, o datos agregados, las técnicas de estimación consisten en MCO, Método Generalizado de Momentos (MGM) (Ruijs, 2009) y modelos de cointegración con corrección de error; mediante este método, Martínez-Espiñeira (2005) encontró que el consumo, precio e ingreso virtual

resultaron no estacionarias en nivel, no así en primeras diferencias, indicando un orden de integración  $I(1)$ , aspecto importante al considerarse el proceso de generación de información al momento de la especificación econométrica. La literatura, además de los precios, considera como determinantes de la demanda el factor climático, demográficos (de composición y tamaño de los hogares), socioeconómicos (nivel de ingreso), nivel cultural, etc. (Howe & Linaweaver, 1967; Billings & Agthe, 1980; Renzetti, 1992), entre otros. Recientemente en México se ha desarrollado un interés particular por el estudio de las funciones de la demanda de agua para uso residencial; a partir de microdatos, Jaramillo (2005) estimó sensibilidades de la demanda precio de -0.22 mediante el Método de Elección Discreta Continua y de -0.58 con variables instrumentales (VI). García-Salazar y Mora (2008) encontraron elasticidades de -0.18 a -0.2, para la región de Torreón Coahuila, mediante VI. En otro estudio, desarrollado por Sisto (2010), para la Zona Metropolitana de La Laguna, encuentra elasticidades entre -0.47 y -0.53 mediante modelos estimados por mínimos cuadrados ordinarios. Mientras que Salazar y Pineda (2010) encontraron una elasticidad de -0.33 con datos agregados a escala local con 134 localidades, mediante VI y mínimos cuadrados generalizados (MCG), elasticidad de demanda precio mayor en términos absolutos a las reportadas con micro-datos en la literatura empírica sobre demanda de agua residencial en México.

En este sentido, la evidencia empírica sugiere que la medición y una estructura de precios en bloque reducen el uso del agua. No obstante, la diferencia en la dotación en infraestructura de medición en países desarrollados y subdesarrollados es considerable; Yepes y Dianderas (1996) encuentran que en países desarrollados es de 85 a 90%, mientras que en países en desarrollo es menor que 50%. En el caso de México, la información de micromedición es limitada. Sin embargo, un dato importante de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2008), es que de una muestra de 39 ciudades con población mayor a 50 000 habitantes, sólo 46% de

las tomas de agua cuenta con medición, mientras que 54% es nula. Este rezago de la inversión en infraestructura de micromedición cuestiona los principios de eficiencia económica y equidad del suministro de agua en México debido a la discriminación de precios entre hogares con medición y sin medición; esta situación podría originar subsidios al consumo, ya que el precio por metro cúbico de los hogares sin micromedición podría ser muy inferior al precio que pagan los hogares con medición, dando lugar a inequidad y falta de incentivos para el uso eficiente del recurso. Por otra parte, el rezago en medición sugiere déficit financiero de operación. Lo anterior ha motivado la estimación de la demanda de agua de uso residencial de corto y largo plazos en la ciudad de La Paz, Baja California Sur (B.C.S.), debido a que cuenta con escasa micromedición (40%) y déficit financiero del organismo operador (estas dos características son representativas de la realidad nacional), así como problemas de sustentabilidad del servicio hidrológico de provisión causado por la sobreexplotación del acuífero (única fuente de provisión), con intrusión salina. Por estas razones, el objetivo de este trabajo es estimar la elasticidad del precio de corto y largo plazos de la demanda de agua residencial de la ciudad de La Paz, para medir el impacto que tiene la estructura de precios en bloque en el uso eficiente. Para ello, se plantearon las siguiente hipótesis: partiendo del aumento en la micromedición, un adecuado diseño de estructura tarifaria de precios en bloque puede contribuir como instrumento de manejo de la demanda mediante señales de precios que logren un uso eficiente del recurso (disminuir su consumo) y así lograr los objetivos de equidad, eficiencia económica y sustentabilidad del uso de agua residencial.

## Materiales y métodos

### Área de estudio y descripción de los datos

El área urbana de la ciudad de La Paz fue seleccionada debido a que: a) se encuentra localizada en una región semiárida, donde no existen cuer-

pos de agua superficiales y la precipitación es escasa, lo cual ha llevado a la necesidad de sustraer agua subterránea mediante el bombeo en pozos costeros, generando la sobreexplotación del acuífero y provocando indirectamente intrusión de agua de mar; b) los hogares representan el sector con mayor demanda, con 60.86% del total de agua concesionada del acuífero (30 018 597 m<sup>3</sup>). De acuerdo con Cruz-Falcón (2007), la superficie del acuífero es de 200 km<sup>2</sup>, presenta un déficit hídrico de 9 millones de metros cúbicos anuales y la velocidad de infiltración de agua de mar oscila entre 150 y 200 metros anuales. La localización se puede apreciar en la figura 1.

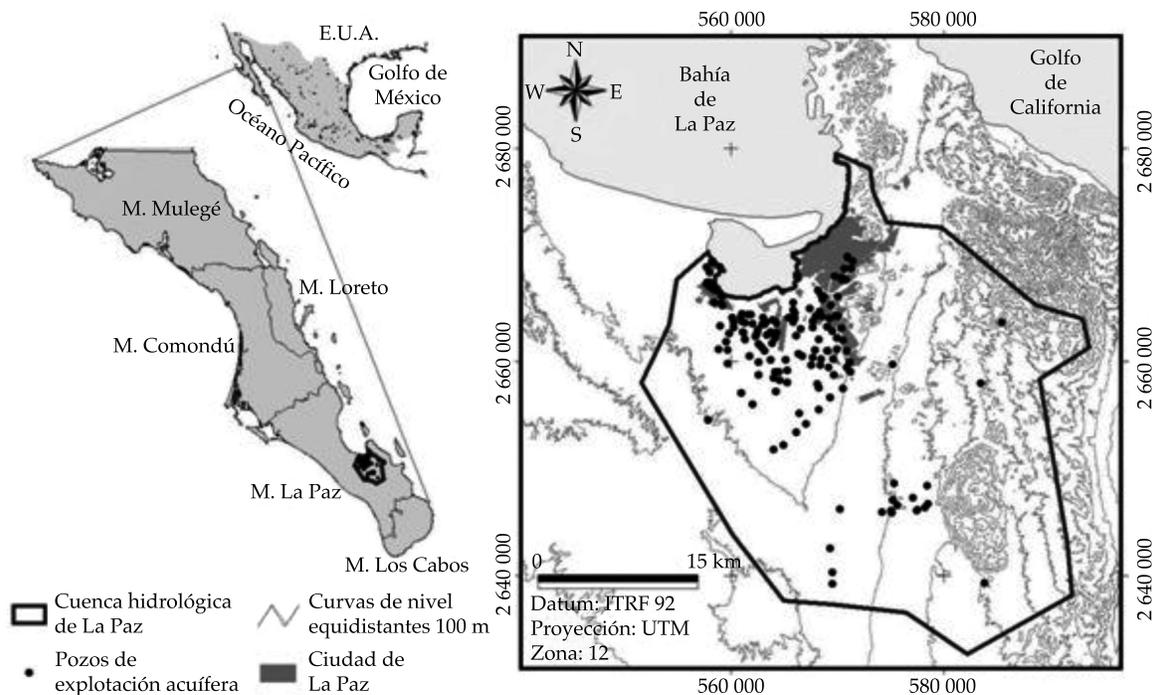
### Descripción esquemática de la metodología

En la figura 2 se muestra en forma de diagrama de flujo la metodología utilizada.

### Determinación del tamaño de muestra y descripción de variables

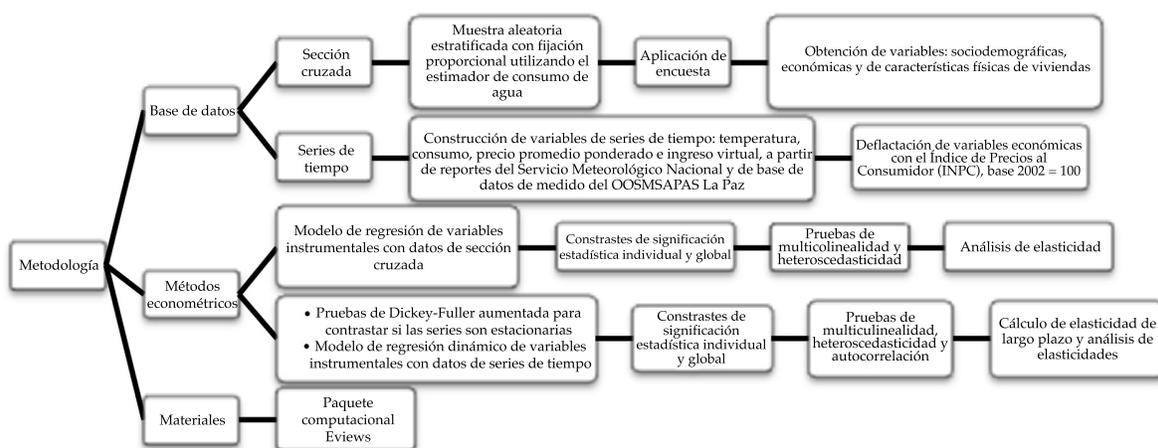
La distribución de la demanda del OOMSAPAS La Paz por tipo de usuario para el año 2008 resultó la siguiente: 94.28%, domésticas; 5.47%, comerciales, y 0.24%, de uso industrial. Los incrementos en los precios de la estructura tarifaria registrados de 2003 a 2008 se puede apreciar en la figura 3 (OOMSAPAS, 2009).

La naturaleza de los datos para la estimación de las elasticidades es corte transversal y de series de tiempo. Los datos para la estimación de sección cruzada se obtuvieron a partir de una encuesta aplicada en 2008. Mientras que para la estimación de series tiempo se obtuvieron datos oficiales con clave de identificación individual de consumo facturado por hogar. Con esta información se calculó el consumo promedio mensual y el precio marginal promedio. La



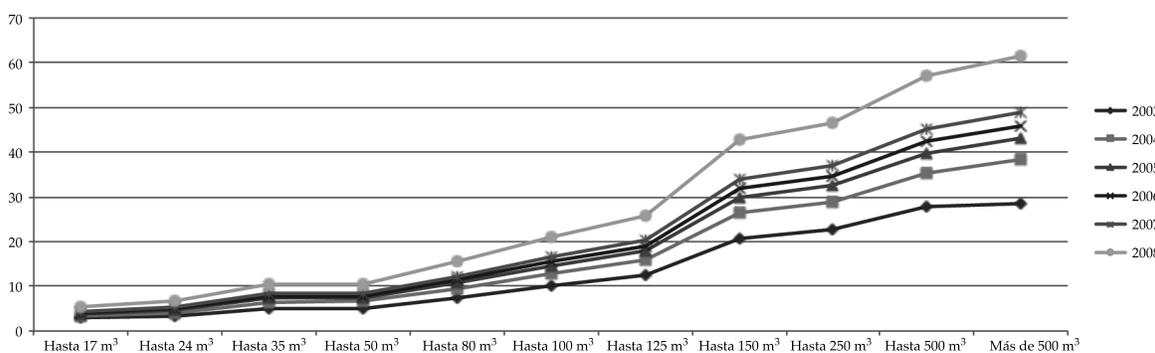
Fuente: Unidad de Laboratorios de Servicios y Apoyo del CIBNOR (ULSA), 2011.

Figura 1. Localización del área de estudio, delimitación de la cuenca, distribución de pozos de extracción y Ciudad de La Paz, Baja California Sur, México.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Descripción esquemática de la metodología.



Fuente: OOMSAPA, La Paz. Los precios por metro cúbico incluyen saneamiento y alcantarillado, 2009.

Figura 3. Estructura tarifaria por bloques de uso doméstico de La Paz, Baja California Sur, periodo 2003-2008.

estrategia para obtener la información de corte transversal fue analizar la distribución del consumo de agua de los hogares al interior de los 11 rangos de consumo, con el fin de estimar el tamaño óptimo de muestra de acuerdo con el estimador de consumo. El análisis de la distribución arrojó que 93.96% de los hogares que contaba con micromedición se concentró en los tres primeros bloques, donde 27 568 ubicaron su consumo en el rango de 0 a 17 m<sup>3</sup> mensuales; 9 515 en el rango de más de 17 a 24 m<sup>3</sup> mensuales y 5 485 en el rango de más de 24 hasta 35 m<sup>3</sup>. El tamaño óptimo de la muestra se obtuvo mediante el método aleatorio estratificado con fijación

proporcional con un error de 4%, así como un nivel de confianza de 95%, el cual dio como resultado un tamaño de muestra de 594 hogares, ajustándola a 600. En el cuadro 1 se muestra la descripción y estadística descriptiva de las variables obtenidas a partir de la encuesta.

Debido a que 93% de los hogares con micromedición ubicaron su nivel de consumo hasta el bloque de 35 m<sup>3</sup>, la estrategia econométrica se limitó a trabajar con los datos de los hogares con micromedición que consumieron hasta 50 metros cúbicos durante el periodo de 2003 a 2008, ya que éstos representan más de 95% y ello evita problemas de inferencia estadística al

Cuadro 1. Descripción de variables sociodemográficas, económicas y físicas de viviendas encuestadas.

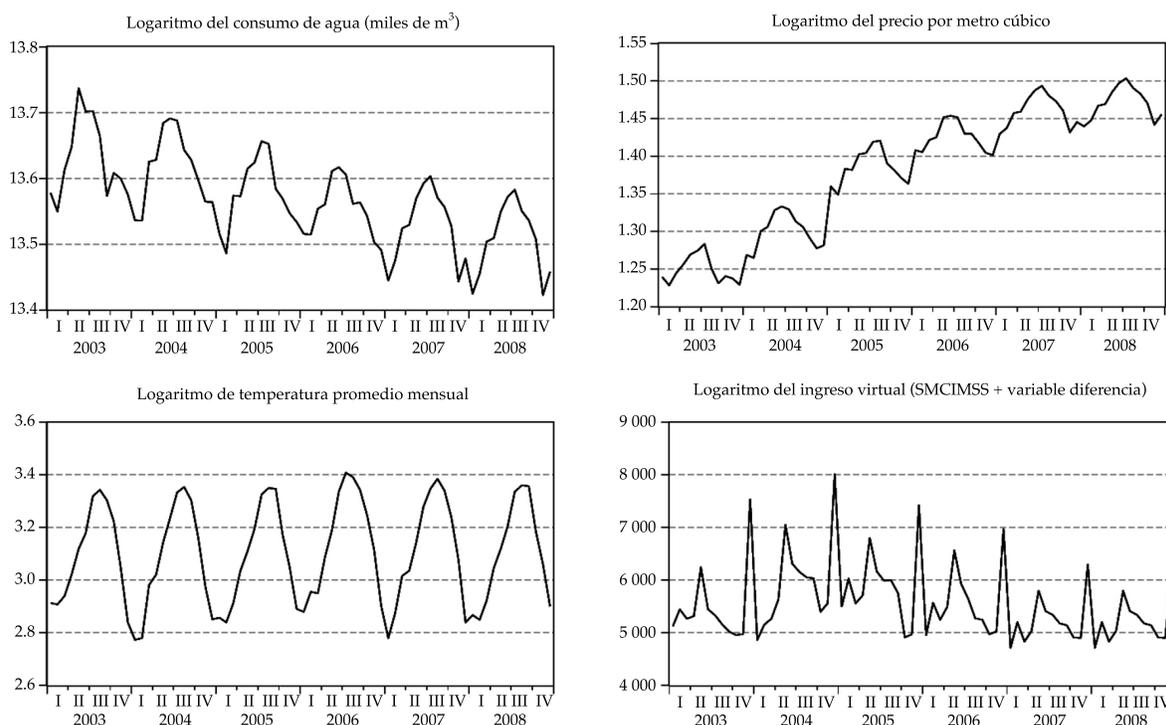
Variable	Descripción	Unidades	Media	Error estándar	Variable	Descripción	Unidades	Media	Error estándar
Ingreso	Ingreso familiar mensual	\$ 000 / mes	8 364.5	7 702.05	p4	Precio marginal bloque 4	pesos / m <sup>3</sup>	8.4	-
Educación	Educación del jefe del hogar	Categórica	3.67	1.17	p5	Precio marginal bloque 5	pesos / m <sup>3</sup>	12.2	-
Edad	Edad del jefe del hogar	Ordinal	39.32	12.61	p6	Precio marginal bloque 6	pesos / m <sup>3</sup>	16.6	-
Miembros	Número de miembros	Ordinal	4.12	1.47	p7	Precio marginal bloque 7	pesos / m <sup>3</sup>	20.31	-
Cm <sup>3</sup>	Consumo de agua	m <sup>3</sup> / día	0.7	0.31	p8	Precio marginal bloque 8	pesos / m <sup>3</sup>	33.84	-
Lnprecio	Logaritmo del precio	\$/m <sup>3</sup>	1.72	0.29	p9	Precio marginal bloque 9	pesos / m <sup>3</sup>	23.11	-
M <sup>2</sup> construcción	Metros cuadrados de construcción	m <sup>2</sup>	84.73	23.67	p10	Precio marginal bloque 10	pesos / m <sup>3</sup>	45.26	-
Jardín	Hogares con jardín	Binario	0.63	0.48	p11	Precio marginal bloque 11	pesos / m <sup>3</sup>	48.81	-
Baños	Número de baños	Ordinal	1.53	0.74	yvirtual2	Ingreso virtual en bloque 2	\$000/año	109	124.65
Cisterna	Hogares con cisterna	Binario	0.71	0.45	yvirtual3	Ingreso virtual en bloque 3	\$000/año	109.77	124.74
Llaves	Número de llaves	Ordinal	3.7	1.5	yvirtual4	Ingreso virtual en bloque 4	\$000/año	109.77	124.74
Tandeo	Restricción en suministro	Binario	0.51	0.5	yvirtual5	Ingreso virtual en bloque 5	\$000/año	110.23	124.8
Almacena	Hogares que almacenan agua	Binario	0.79	0.4	yvirtual6	Ingreso virtual en bloque 6	\$000/año	111.86	125
Antigüedad	Número de años	Ordinal	14.46	13.17	yvirtual7	Ingreso virtual en bloque 7	\$000/año	112.81	125.12
Información	Conocimiento de situación del acuífero	Binario	0.67	0.46	yvirtual8	Ingreso virtual en bloque 8	\$000/año	116.25	125.56
p1	Precio marginal bloque 1	pesos/m <sup>3</sup>	4.31	-	yvirtual9	Ingreso virtual en bloque 9	\$000/año	117.05	125.66
p2	Precio marginal bloque 2	pesos/m <sup>3</sup>	5.34	-	yvirtual10	Ingreso virtual en bloque 10	\$000/año	119.16	125.95
p3	Precio marginal bloque 3	pesos/m <sup>3</sup>	8.37	-	yvirtual11	Ingreso virtual en bloque 11	\$000/año	120.06	126.07

Fuente: elaboración propia.

eliminar datos de consumo atípicos. La base de datos de series de tiempo consta de variables con frecuencia mensuales de 2003 al año 2008, a saber: a) consumo agregado de hogares con micro-medición (miles de metros cúbicos expresados en logaritmos); b) el precio marginal promedio por metro cúbico; c) temperatura máxima promedio, y d) ingreso virtual, las

cuales se expresan en logaritmos y se pueden apreciar en la figura 4.

Las variables económicas fueron deflactadas utilizando el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC), obtenido del Banco de México (BM), base 2002=100. En cuanto al ingreso, se utilizó el Salario Medio de Cotización Mensual (SMCIMSS) ponderado con la pobla-



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Series de tiempo de consumo doméstico, precio, temperatura e ingreso en logaritmos registrados en La Paz, Baja California Sur, periodo 2003-2008.

ción asalariada de trabajadores permanentes registrados en el Instituto Mexicano del Seguro Social en Baja California Sur; éste fue obtenido de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos (CONASAMI). Dicha variable se incluye como un indicador del ingreso familiar en la entidad debido a que tiene la ventaja de encontrarse con frecuencia mensual, además de ser ya utilizada previamente en trabajos empíricos en México como *proxy* del ingreso de las familias (Islas & Moreno, 2011). La temperatura corresponde a la temperatura promedio mensual de la ciudad de La Paz, obtenida del Sistema Meteorológico Nacional (Conagua, 2010).

#### Análisis estadístico de series de tiempo

De acuerdo con el antecedente de no estacionariedad en consumo y precios encontrado por Martínez-Espiñeira (2005), se procedió a hacer un análisis del proceso de generación

de Información (PGI), mediante la aplicación de las pruebas de Dickey-Fuller Aumentada (DFA) (Dickey & Fuller, 1981), aplicando el procedimiento de lo general a lo específico, incluyendo constante y tendencia, evaluando su significancia estadística; los resultados se aprecian en el cuadro 2.

Con base en los valores de las pruebas de DFA, se rechaza la hipótesis nula de que las series cuentan con raíces unitarias al 5% de significancia estadística, confirmando la estacionariedad en niveles de las mismas, lo cual contribuye con información para la adecuada especificación econométrica.

#### Marco teórico de estructuras de precios en bloque

Siguiendo la literatura de estructuras de precios en bloque y restricción presupuestaria segmentada (Hausman, 1985; Moffitt, 1986; Hewitt &

Cuadro 2. Estadística descriptiva y pruebas de raíces unitarias de consumo, precio, ingreso y temperatura en logaritmos. Periodo 2003-2008 con frecuencia mensual.

Pruebas de raíces unitarias en niveles				
Variable	DFA			
Log consumo	-4.31 (1)***			
Log precio	-3.60 (2)**			
Log ingreso	-8.21 (1)***			
Log temperatura	-			
Valor crítico de Mackinon a 5% = -3.47 [***] rechazo de la hipótesis nula al 5%, [**] rechazo de la hipótesis nula a 1% (n) indican rezagos				
Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Log consumo	13.57	0.07	13.42	13.74
Log precio	4.08	0.21	3.75	4.50
Log ingreso	3.84	0.14	3.66	4.19
Log temperatura	3.10	0.19	2.77	3.41

Fuente: elaboración propia.

Hanemann, 1995; Olmstead, Hanemann, & Stavins, 2005), en industrias suministradoras (agua, energía, gas etc.), donde las tarifas no lineales son comunes con estructuras de precios crecientes o decrecientes, se describe el marco teórico sobre el que se apoya el presente trabajo empírico. Los precios no lineales son frecuentemente utilizados por las autoridades responsables del suministro de agua urbana y la elección del precio implica tasas constantes hasta cierto nivel de consumo, y tasas crecientes o decrecientes por bloque. Con tasas constantes, los consumidores pagan siempre una cantidad igual por cada unidad consumida. Las tasas crecientes (decrecientes) por bloque implican un cobro mayor (menor) por la última unidad consumida dentro de cada bloque conforme se incrementa el consumo. La función de demanda con tasas de precios en bloque es no lineal e incluye saltos discretos. Para mostrar un caso simple de estructuras no lineales con dos bloques, se consideran los siguientes supuestos: un consumidor con ingreso  $Y$  maximiza su función de utilidad cuasi cóncava  $U(q, z)$ , donde  $q$  representa la cantidad de agua expresada en metros cúbicos y  $z$  otro bien. El precio de  $z$  se normaliza a 1 y el agua es vendida bajo una tarifa de dos bloques que puede ser creciente o decreciente. Considerando a  $p_j, j = 1, 2$ , el precio del agua en

el bloque  $j$ -ésimo y  $\bar{x}$  el límite del primer bloque, la restricción presupuestaria es definida por dos segmentos lineales y puede ser descrita por las siguientes condiciones:

$$l = \begin{cases} p_1 q + zq < \bar{x} \\ p_1 \bar{x} + p_2 (q - \bar{x}) + zq > \bar{x} \end{cases} \quad (1)$$

o de manera equivalente:

$$l = \begin{cases} p_1 q + zq < \bar{x} \\ l + (p_1 - p_2) \bar{x} = p_2 q + zq > \bar{x} \end{cases} \quad (2)$$

En este sentido, el ingreso virtual se denota como  $\tilde{y} = y + (p_1 - p_2)\bar{x}$ ; el término  $(p_1 - p_2)\bar{x}$  es igual al subsidio implícito que el consumidor recibe; esta noción es introducida por Taylor (1975). Posteriormente, Nordin (1976) desarrolla este enfoque mediante la inclusión de la variable diferencia  $d = \sum_{j=1}^{i-1} (p^{j+1} - p^j) \bar{x}^j$ , que indica el diferencial entre el pago si todas las unidades se cobrarán al precio marginal del último bloque y el pago actual del consumo. La variable diferencia es positiva bajo tasas de bloques crecientes y negativa bajo decrecientes en bloque. Los efectos de la estructura de precios en bloque se interpretan como un impuesto implícito bajo precios en bloque decreciente y como un

subsidio implícito bajo estructuras crecientes en bloque, como se muestra en la figura 5.

Las tarifas multibloques generan conjuntos presupuestarios que difieren en dos formas de la restricción tradicional, es decir, ésta no es lineal y puede ser convexa o no convexa. Lo anterior implica que a diferencia de un esquema clásico de maximización donde el consumidor tendría que igualar sólo una vez el precio marginal al beneficio marginal, con precios en bloque existe un precio marginal en cada bloque, esto amplía el número de opciones de consumo a 3 en una estructura de dos bloques (como se puede apreciar en la figura 5), es decir, uno al interior de cada bloque y uno más al pliegue entre ellos. Para analizar el comportamiento del consumidor en una estructura en bloques es necesario representar la elección del consumidor, la cual será discreta y continua, lo que lleva a la estimación de la demanda a través de funciones condicionales e incondicionales. La función de demanda es condicional a la elección y está dada por la elección hecha por el consumidor dentro de un bloque particular. La ecuación se expresa algebraicamente de la siguiente manera:

$$q = \begin{cases} q(p_1, y_1) & \text{si } q < \bar{x} \\ \bar{x} & \text{si } q = \bar{x} \\ q(p_2, y_2) & \text{si } q > \bar{x} \end{cases} \quad (3)$$

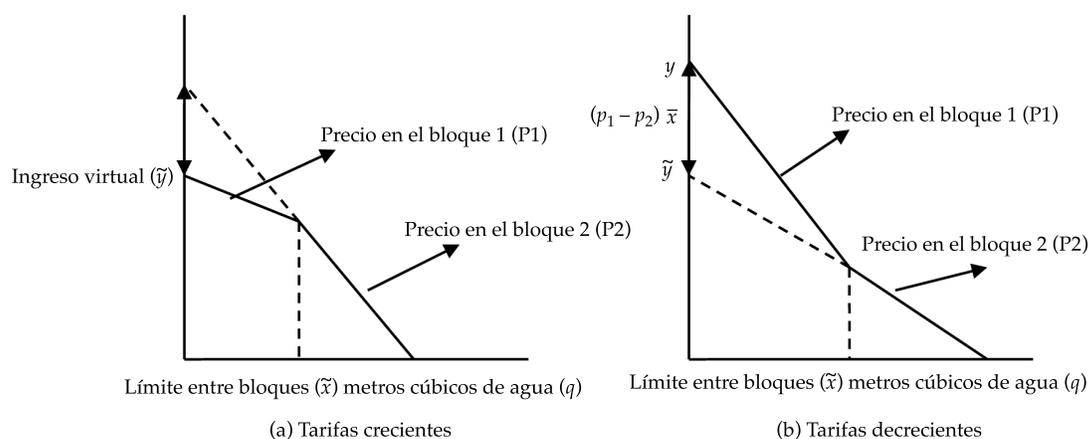
donde  $(p_1, p_2)$  y  $(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2)$  representan los precios e ingreso virtual, respectivamente, en el bloque 1 y 2. El modelo de demanda incondicional se obtiene mediante la combinación de la elección discreta y continua:

$$q = \begin{cases} q(p_1, y_1) & \text{si } q(p_1, y_1) < \bar{x} \\ \bar{x} & \text{si } q(p_2, y_2) \leq \bar{x} \leq q(p_1, y_1) \\ q(p_2, y_2) & \text{si } q > \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

Las tarifas de precios en bloque, crecientes o decrecientes, plantean dificultades para la modelación empírica debido a la endogeneidad entre precio, consumo.

#### Modelación econométrica para datos de sección cruzada

Para estimar la demanda de agua se utilizó el método de variables instrumentales (VI). Este método consta de dos partes: en la primera se estima una regresión del precio marginal promedio observado en las características de la estructura de precios en bloque con todas las demás covariables exógenas. En la segunda se utilizan los valores predichos del precio, esto permite que se tome en cuenta la determinación simultánea del precio y la cantidad, o más



Fuente: elaborado con base en Cavanagh, Hanemann y Stavins (2001).

Figura 5. Restricción presupuestaria bajo tarifas de precios en dos bloques con tarifas crecientes y decrecientes.

precisamente el precio y el bloque en el cual se consume, lo cual confronta el problema de endogeneidad con estimadores que corresponden teóricamente a la relación entre el precio y el nivel de consumo. Para estimar la demanda de corto plazo se especificó el modelo siguiente:

$$Cm^3 = \exp(z\delta)p^\alpha \tilde{y}^\beta \exp(\varepsilon) \quad (5)$$

tomando logaritmos, se tiene:

$$\ln Cm^3 = z\delta + \alpha \ln p + \ln \tilde{y} + \varepsilon \quad (6)$$

donde el signo teóricamente esperado del coeficiente del logaritmo del precio ( $\ln p$ ) es negativo, mientras que la cantidad ( $\ln Cm^3$ ) y el nivel ingreso ( $\tilde{y}$ ) deberán estar positivamente relacionados. La matriz contiene las características físicas, así como socioeconómicas descritas en el cuadro 2 y  $\varepsilon$ , el término estocástico. El instrumento correspondiente a la misma estructura de precios (precios marginales en cantidades variables) de acuerdo con Hewitt y Hanemann (1995), y Cavanagh, Hanemann y Stavins (2001). Una aportación de este trabajo consiste en la incorporación de la variable información de forma dicotómica, la cual indica si el jefe del hogar está informado de la situación de sobreexplotación del acuífero, así como del problema de intrusión de agua de mar. Un aspecto importante es que los coeficientes de  $\ln p$  y  $\ln y$  no se pueden interpretar de forma directa como elasticidades debido a la restricción presupuestaria no lineal, pues no reflejan la probabilidad de que los hogares cambien de bloques en respuesta a un cambio en el precio o nivel de ingreso debido a que la manera en que reaccionan los hogares ante incrementos en el precio y el nivel de ingreso está condicionada por el bloque de consumo; por lo tanto, la interpretación de los coeficientes se hará como una medida de sensibilidad. La interpretación de los coeficientes de características física de las viviendas y composición de los hogares será como cambio proporcional del consumo de agua ante incrementos unitarios, ya que éstas entran exponencialmente en la función de demanda.

### Modelación econométrica para datos de series de tiempo

La estimación de la demanda de largo plazo parte de las aportaciones econométricas desarrolladas por Cavanagh et al. (2001). La especificación econométrica es la siguiente:

$$x_t = \alpha p_t + \beta (y_t + d_t) + \delta x_{t-1} + \gamma z_t + \varepsilon_t \quad (7)$$

Donde  $x_t$  es el consumo agregado;  $yp_t$  el precio promedio; el término  $y_t + d_t$  corresponde al ingreso virtual con  $y_t =$  ingreso,  $yd_t = \sum_{j=1}^{t-1} (p^{j+1} - p^j) \bar{x}^j$  y se incluye el consumo rezagado  $x_{t-1}$  debido a que se espera que los hogares ajusten su nivel de consumo a cambios en el precio marginal por metro cúbico, un periodo posterior al pago del recibo de agua (un mes);  $z_t$  es la temperatura promedio, y  $\varepsilon_t$  es el término error. Es importante señalar que el instrumento en esta estimación de series de tiempo es el mismo que el aplicado en la estimación de corte transversal. Otro aspecto importante consiste en que la ecuación (7) considera sólo elasticidades de corto plazo; para obtener las elasticidades de largo plazo es necesario estimar la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{ip} = \frac{\beta}{1 - \delta} \quad (8)$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente del precio y  $\delta$  es el parámetro autorregresivo. Cabe mencionar que esta elasticidad considera la temporalidad en términos de proceso de ajuste del consumo en el tiempo ante variaciones de los precios, es decir, la significancia estadística de  $\delta$ ; su signo y magnitud revelan la sensibilidad de los hogares en su consumo actual, dado el consumo y precios facturados uno o más periodos previos. Con el fin de obtener estimadores robustos, la estrategia econométrica plantea la aplicación de la prueba de White para detectar heterocedasticidad y la prueba de Durbin- $h$  para detectar correlación serial debido a la inclusión de  $x_{t-1}$ .

## Resultados

### Resultados de modelo de sección cruzada

El cuadro 3 muestra los coeficientes de corto plazo estimados por los métodos de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y de VI.

La mayoría de los estimadores generados por el método de MCO resultaron estadísticamente significativos; de éstos, llama la atención el signo positivo del coeficiente  $\ln \text{precio}$  y su significancia, el cual representa la pendiente de la estructura de precios en bloque en los datos más que la curva de demanda. Ello, derivado del problema de endogeneidad del modelo, mismo que resulta en coeficientes sesgados e inconsistentes. En cuanto a los obtenidos por el método de VI, los resultados confirman que el uso de instrumentales corrige el problema de endogeneidad entre el precio y la cantidad demandada en estructuras de precios en bloques, dando como resultados signos teóricamente esperados a un nivel de significancia estadística de 1%, como lo muestra el coeficiente de  $\ln \text{precio}$  ( $\eta_p = -0.56$ ), el cual indica que los hogares que se enfrentan a estructuras de precios en bloques reaccionan ajustando su consumo ante incrementos en el precio. Además, se confirma que la demanda de agua de los hogares es inelástica

respecto al precio. La variable ingreso no resultó estadísticamente significativa. La interpretación de los coeficientes de características de los hogares requiere de una transformación, pues éstas entran exponencialmente en la función de demanda; la transformación de los coeficientes con antilogaritmos permite su interpretación como cambios proporcionales del consumo de agua ante incrementos unitarios. Realizando tal transformación se encontró que el incremento de un baño más implica un incremento en el consumo de agua de 16% en promedio. Los hogares que tienen dentro de sus hábitos de consumo el almacenamiento de agua consumen alrededor de 1% menos de agua en relación con aquellos que no lo hacen. El efecto del incremento de un miembro en el hogar representa un aumento en el consumo de agua de 6.5%. La antigüedad de la vivienda determina el nivel de consumo, como lo indica la misma, y al cuadrado, pues por cada año que se incrementa ésta, la demanda de agua crece 1.6%, aunque en hogares de mayor antigüedad, el consumo es menor que en aquellos de menor número de años. En cuanto al efecto de la información respecto a la situación de sobre explotación del acuífero, el coeficiente revela que los hogares que tienen conocimiento consumen cerca de 1% menos agua en relación con aquellos que no tienen conocimiento de la

Cuadro 3. Resultados de estimación de sección cruzada por el método de variables instrumentales.

Variable	MCO		VI	
	Coefficiente	Error estándar	Coefficiente	Error estándar
$\ln \text{precio}$	0.85	0.044454	-0.56 ***	0.0575
$\ln \text{ingreso}$	0.02	0.01814	4.73E-07	2.53E-07
$\ln \text{baños}$	0.08	0.031702	0.14***	0.0417
Almacena	-0.01	0.023803	-0.07*	0.0467
$\ln \text{miembros}$	0.04	0.027821	0.06***	0.015
$\ln \text{antigüedad}$	0.03	0.015599	0.016***	0.0047
$\ln \text{antigüedad}^2$	-0.0000633	0.0000358	-0.0003***	0.00009
Información	0.015	0.019168	-0.097**	0.0403
Constante	-2.205	0.229326		

Nota: (\*) indica significancia a 10%; (\*\*) significancia a 5%; (\*\*\*) significante a 1%. Estimaciones de robustas a heteroscedasticidad por el método de White.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4. Resultados de estimación de serie de tiempo por el método de variables instrumentales.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico-t	Prob.
Log constante	7.33	1.34	5.48	0.00
Log consumo (-1)	0.44	0.10	4.29	0.00
Log precio	-0.51	0.08	-6.11	0.00
Log temperatura	0.11	0.02	4.99	0.00
log ingreso	0.17	0.05	3.70	0.00
R-cuadrado ajustado	0.85	F-statistic 93.18		
Prueba de White	13.61	(Prob.(0.00))		
Prueba Durbin-h	0.20	T = 72		

Fuente: elaboración propia.

situación de sobreexplotación e intrusión de agua marina en el acuífero.

### Resultados de modelo de series de tiempo

Los resultados de la estimación de largo plazo se pueden apreciar en el cuadro 4.

En la estimación de series de tiempo, todos los coeficientes resultaron con los signos teóricamente esperados y estadísticamente significativos al 1% de significancia estadística. La elasticidad precio de corto plazo es inelástica e indica que el incremento en el precio marginal tiene como efecto una disminución en la demanda menos que proporcional al incremento en el precio; es decir, al incrementarse 10% el precio, el consumo disminuirá en 5.1% en promedio mensual. El coeficiente del consumo con un rezago indica que los hogares ajustan su consumo un periodo después al pago de la factura de consumo. El coeficiente del ingreso virtual muestra que incrementos en el ingreso y el subsidio implícito tienen como efecto un incremento en la demanda. La variable climática temperatura afecta la demanda, es decir, el incremento de 1% en la temperatura máxima promedio tendrá como efecto el incremento en 0.11% en la demanda de agua mensual.

En cuanto a la elasticidad precio de la demanda de largo plazo, resultó de -0.90, mayor en términos absolutos que la elasticidad de corto plazo -0.51. Este resultado es consistente con la literatura empírica y sugiere que los

hogares ajustan su nivel de consumo en el largo plazo ante incrementos permanentes en la estructura de precios. La prueba de correlación serial Durbin-h fue de 0.20, menor al valor de la distribución normal (1.64), por lo cual no es posible rechazar la hipótesis nula de ausencia de correlación serial a 5% de significancia. En cuanto a la prueba de White, no se detectó heterocedasticidad.

### Discusión

Los estimadores de elasticidad de corto y largo plazos presentados anteriormente resultaron consistentes entre las estimaciones de sección cruzada y de series de tiempo de -0.56 y -0.51, respectivamente. También lo son con estudios previos en México, en relación con la inelasticidad de la demanda. No obstante, los resultados de este trabajo difieren de otros en la magnitud de la elasticidad, como se puede apreciar al compararlos, a manera de ejemplo, con los reportados por García-Salazar y Mora (2008) para la región de Torreón (-0.2 a -0.18), lo cual significa que, en promedio, un aumento de 100% en el precio por metro cúbico de agua tendría como efecto una disminución en la demanda del 20%. Mientras que en La Paz, el aumento del 100% en el precio tendría una disminución en la demanda del 51%. Este estudio también contribuye a incorporar la variable información en la estimación de corte transversal. Los resultados muestran que los hogares que tienen

conocimiento de la situación de sobreexplotación e intrusión de agua marina en el acuífero, consumen menos agua en relación con aquellos hogares que no están informados. Lo anterior resulta significativo en el manejo de la demanda, ya que campañas de información por parte de los OOMSAPAS podrían tener un efecto de consumo más eficiente y con ello disminuir en algún grado la presión de sobreexplotación en acuíferos. Por otra parte, resulta relevante considerar que las elasticidades presentadas en este trabajo, así como en los estudios descritos anteriormente, muestran el comportamiento de la demanda ante variaciones en el precio, pero no indican cuál es la cantidad demandada de agua que no responde a los precios, es decir, aquel nivel de consumo de agua indispensable para subsistir y que por tanto no responde al precio. Es evidente la necesidad de investigaciones futuras en este tema debido a que son indispensable para el diseño de estructuras tarifarias mixtas que consideren un nivel de consumo fijo sin cobro y precios en bloques a partir de cierto nivel de consumo. La implementación de este tipo de estructuras tarifarias consideraría de forma explícita el derecho humano al agua y la equidad.

## Conclusión

Este estudio es el primero en estimar la elasticidad precio de largo plazo de la demanda de agua residencial en México mediante series cronológicas de datos. Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura de funciones de demanda de precios en bloques y contribuyen al estudio del impacto de las políticas de precios sobre el consumo de los hogares en países en desarrollo con restricciones en la oferta de agua, causada por las características geológicas de embalses, así como climáticas. Los resultados encontrados revelan la importancia de las estructuras de precios e incrementos permanentes en las tarifas para el adecuado manejo de la demanda de agua, que logre el uso eficiente del recurso. Las elasticidades de la demanda de largo y corto plazos resultaron mayores al pro-

medio de la literatura empírica nacional, lo cual indica que la magnitud del ajuste del consumo de agua ante incrementos sostenidos en los precios es mayor en hogares de la ciudad de La Paz que en otras regiones de México, mientras que incrementos en la temperatura y el ingreso tienen como efecto amentos en la demanda de agua mensual. Estos resultados tienen implicaciones relacionadas con la política de uso y manejo del recurso agua en regiones semiáridas con restricciones del servicio hidrológico de provisión, así como posibles alteraciones en el ciclo hidrológico (sobreexplotación e intrusión de agua de mar en zonas costeras).

Los planes de manejo de los recursos hídricos en regiones con restricción en la oferta deben considerar la aplicación de instrumentos basados en precios para el manejo de la demanda de agua urbana, pues los hogares ajustan su nivel de consumo de agua ante incrementos sostenidos en la estructura de precios en bloque, para lograr el uso eficiente del recurso. Los resultados de las estimaciones de la elasticidad precio de corto plazo en el modelo de sección cruzada y de series de tiempo resultaron de -0.56 y -0.51, respectivamente, mientras que la elasticidad precio de largo plazo resultó -0.90, lo cual revela la consistencia de los estimadores; además es importante mencionar que ambas estimaciones se realizaron con datos reales de consumo y precio otorgados por el organismo operador. En este sentido, el estudio cumple con el objetivo planteado y logra corroborar la hipótesis planteada de que partiendo de medición, el adecuado diseño de estructuras tarifarias de precios en bloque contribuye en el manejo de la demanda de agua residencial, ya que logra el uso eficiente del recurso mediante la disminución del consumo ante incrementos permanentes del precio en la estructura tarifaria en el tiempo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de La Paz (OOMSAPAS) por haber proporcionado los datos

de consumo y precios mediante “clave individual”, sin los cuales este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo. Asimismo, se agradecen los valiosos comentarios de los dictaminadores anónimos.

## Referencias

- Banxico (2010). *Banco de México. Estadísticas de inflación*. Recuperado de <http://www.banxico.org.mx/politica-monetaria-e-inflacion/estadisticas/inflacion/indices-precios.html>.
- Bartoszczuk, P., & Nakamori, Y. (2004). *Modelling Sustainable Water Prices. Handbook of Sustainable Development Planning: Studies in Modelling and Decision Support*. En M. Quaddus & A. Siddique (Eds.). Cheltenham: Edward Elgar. Recuperado de <http://www.jaist.ac.jp/~bpawel/BARTOSzoppr8niew.pdf>.
- Billings, R., & Agthe, D. (1980). Price Elasticities for Water: A Case of Increasing Block Rates. *Land Economics*, 56, 73-84.
- Cavanagh, S. M., Hanemann, W. M., & Stavins, R. N. (2001). *Muffled Price Signals: Household Water Demand Under Increasing-Block Price*. Recuperado de [http://www.hks.harvard.edu/fs/rstavins/Papers/Cavanagh\\_Hanemann\\_Stavins\\_ASSA\\_Paper.pdf](http://www.hks.harvard.edu/fs/rstavins/Papers/Cavanagh_Hanemann_Stavins_ASSA_Paper.pdf).
- Cibnor (2011). *Mapa de la Cuenca de La Paz, B.C.S., México*. La Paz, México: Unidad de Laboratorios de Servicios y Apoyo (ULSA) del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- Conagua (2008). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Comisión Nacional de Agua.
- Conagua (2010). *Temperatura por entidad federativa*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/temperaturas/tmaximas.html>.
- Cruz-Falcón, A. (2007). *Caracterización y diagnóstico del acuífero de La Paz, B.C.S., mediante estudios geofísicos y geohidrológicos*. La Paz, México: Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.
- Dalhuisen, J., Florax, R., De Groot, H., & Nijkamp, P. (2003). Price and Income Elasticities of Residential Waterdemand: A Meta-Analysis. *Land Economics*, 79, 292-308.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1981). Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Econometría*, 49, 1057-1072.
- Elnaboulsi, J. C. (1999). A Model for Constrained Peak-Load Water and Wastewater Pricing and Capacity Planning. *Water Resources Journal*, 24(2), 87-96.
- García-Salazar, J. A., & Mora, J. S. (2008). Tarifas y consumo de agua en el sector residencial de la Comarca Lagunera. *Región y Sociedad*, 40, 119-132.
- Hausman, J. (1985). The Econometrics of Non-Linear Budget Sets. *Econometrica*, 53, 1255-1282.
- Hewitt, J. A., & Hanemann, W. M. (1995). A Discrete/Continuous Choice Approach to Residential Water Demand under Block Rate Pricing. *Land Economics*, 71, 173-192.
- Howe, C. W., & Linaweaver, F. P. (1967). The Impact of Price on Residential Water Demand and its Relation to System Demand and Price Structure. *Water Resources Research*, 3, 13-32.
- Islas, C. A., & Moreno, G. (2011). Determinantes del flujo de remesas en México, un análisis empírico. *EconoQuantum*, 7, 9-36.
- Jaramillo, L. A. (2005). Evaluación econométrica de la demanda de agua de uso residencial en México. *El Trimestre Económico*, 286, 267-390.
- Klawitter, S. A. (2003). *Methodical Approach for Multi Criteria Sustainability Assessment of Water Pricing in Urban Areas*. Paper presented at the 2003 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change. Recuperado de <http://www.fu-berlin.de/>.
- Martínez-Espiñeira, R. (2005). *An Estimation of Residential Water Demand Using Co-Integration and Error Correction Techniques*. Munich Personal RePEc Archive. Recuperado de <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/615/>.
- Moffitt, R. (1986). The Econometrics of Piecewise-Linear Budget Constraints. *Journal of Business and Economic Statistics*, 4, 317-328.
- Nordin, J. A. (1976). A Proposed Modification on Taylor's Demand-Supply Analysis: Comment. *The Bell Journal of Economics*, 7, 719-721.
- Olmstead, S. M., Hanemann, M. W., & Stavins, R. N. (2005). *Do Consumers React to the Shape of Supply? Water Demand under Heterogeneous Price Structures Resources for the Future*. Recuperado de: <http://www.rff.org>.
- OOMSAPAS (2009). *Base de datos internos sobre facturación por clave de usuario*. Proporcionados por la dirección general del H. XII Ayuntamiento de La Paz, Baja California Sur. Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de La Paz, B.C.S. México.
- Renzetti, S. (1992). Evaluating the Welfare Effects of Reforming Municipal Water Prices. *Journal of Environmental Economics and Management*, 22, 147-163.
- Ruijs, A. (2009). Welfare and Distribution Effects of Water Pricing Policies. *Environment Resources Economics*, 43, 161-182.
- Salazar, A., & Pineda, N. (2010). Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México. *Región y Sociedad*, 49, 3-16.
- Sisto, N. (2010). Manejo sustentable del uso de agua y crecimiento urbano. *Ensayos Revista de Economía*, 1, 23-38.
- Soto, G., & Bateman, I. (2006). Scope Sensitivity in Households' Willingness to Pay for Maintained and Improved Water Supplies in a Developing World Urbana Area: Investigating the Influence of Baseline Supply

Quality and Income Distribution Upon Stated Preferences in México City. *Water Resources Research*, 42, 1-15.  
Taylor, D. (1975). The Demand for Electricity: A Survey. *The Bell Journal of Economics*, 6, 74-110.  
Yepes, G., & Dianderas, A. (1996). *Water & Wastewater Utilities*. Washington, DC: World Bank.

## Dirección institucional de los autores

Gerzaín Avilés-Polanco  
Víctor Hernández-Trejo

Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS)  
Departamento Académico de Economía  
Carretera al sur, km 5.5  
Apartado Postal 19-B  
23080 La Paz, Baja California Sur, México  
Teléfono: +52 (612) 1238 800, extensión 3210  
gaviles@uabcs.mx  
victorh@uabcs.mx

Marco A. Almendarez-Hernández  
Luis Felipe Beltrán-Morales

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Cibnor)  
Instituto Politécnico Nacional 195  
Playa Palo de Santa Rita Sur  
23096 La Paz, Baja California Sur, México  
Teléfono: +52 (612) 1751 230, extensión 5123  
malmendarez@cibnor.mx  
lbeltran04@cibnor.mx



Haga clic aquí para escribir al autor



Superficie de suelo humedecido.

Foto: Eideño Cruz Bautista

# Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México

• Juan Gabriel Brigido\* • Iouri Nikolskii • Liliana Terrazas •  
• Sergio Santiago Herrera •  
Colegio de Postgraduados, México

\*Autor de correspondencia

## Resumen

Brigido, J. B., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (julio-agosto, 2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101-116.

La estimación de la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático se hace principalmente ignorando la alteración posible de la fertilidad del suelo atribuible al mismo cambio climático. El objetivo principal del presente trabajo fue estimar el papel de la alteración de la fertilidad del suelo en las predicciones sobre la productividad del cultivo de café (*Coffea Arabica* L.) al final del siglo XXI para seis de las regiones cafetaleras productoras más importantes del estado de Veracruz, México. Se han considerado tres modelos de circulación global bajo dos escenarios de forzamiento radiativo. Se ha aplicado un modelo de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas propuesto por IIASA/FAO y utilizado ampliamente en el mundo. Los cálculos de la productividad de café cereza para las condiciones climáticas actuales y su comparación con los datos reportados por la SAGARPA señalan que los rendimientos calculados son confiables. El coeficiente de correlación entre los rendimientos calculados y observados es igual a 0.93 con error estándar de 0.08. Al final del siglo XXI se espera hasta un 34% de reducción en la productividad de café, variando entre regiones cafetaleras debido principalmente al cambio en la precipitación y, en menor grado, al incremento de la temperatura del aire. La ignorancia de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático puede causar errores en la estimación de la productividad de café de hasta un 40%, por lo que este factor no debe ser desestimado.

**Palabras clave:** vulnerabilidad, agricultura, índice hidrotérmico local, índice integral de fertilidad del suelo, escenarios de cambio climático, estado de Veracruz, México.

## Abstract

Brigido, J. B., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (July-August, 2015). *Estimate of the Impact of Climate Change on Soil Fertility and Coffee Production in Veracruz, Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 101-116.

*Estimates of the vulnerability of crops to climate change typically ignore the possible alterations in the fertility of the soil caused by this phenomenon. The primary objective of the present work was to estimate the role of alterations in soil fertility in the predictions of coffee production (Coffea Arabica L.) for the end of the 21st century in 6 of the largest coffee producing regions in the state of Veracruz, Mexico. Three global circulation models were used with two radiative forcing scenarios. A crop development model was applied according to the biological and climate characteristics proposed by IIASA/FAO. The model is extensively used worldwide. The calculations of cherry coffee production based on current climate conditions and their comparison with data reported by SAGARPA indicate that the yields calculated are reliable. The correlation coefficient between the calculated and observed yields is 0.93 with a standard error of 0.08. By the end of 21st century, as much as a 34% reduction in coffee production is expected. This varies among coffee regions primarily due to changes in rainfall, and to a lesser extent to increases in air temperature. A lack of knowledge about alterations in soil fertility caused by climate change can create errors as high as 40% in the estimation of coffee production. This factor should therefore not be overlooked.*

**Keywords:** Vulnerability, agriculture, local hydrothermal index, integral soil fertility index, climate change scenarios, state of Veracruz of Mexico.

Recibido: 27/01/2014  
Aceptado: 06/03/2015

## Introducción

Numerosos estudios recientes apuntan a que la variación del clima registrada en los últimos años es particularmente extraordinaria (Jacoby & D'Arrigo, 1997; Mann, Bradley, & Hughes, 1998, 1999; Rodney & Freddy, 2002; Caballero, Lozano-García, Vázquez-Selem, & Ortega, 2010). Se sabe de ciertos factores que pueden producir cambios en el clima, aunque no de manera precisa; mientras que algunos consideran que estamos ante un evento natural que es parte de un ciclo, para la mayoría el cambio climático tiene su origen total o parcialmente en las actividades humanas, en particular en las emisiones de carbono a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles y deforestación (Gonzalez et al., 2003; Magaña, 2004).

Se considera que dicho cambio climático observado en la actualidad afectará en el futuro los recursos naturales de manera inevitable y, por lo tanto, la productividad agrícola, incluyendo el cultivo de café. Las investigaciones realizadas hasta el presente en el mundo y en México sobre vulnerabilidad de café al cambio climático consideran sólo el efecto directo de cambio de la radiación solar, temperatura del aire y de precipitación, ignorando el efecto indirecto relacionado con la posible alteración de la fertilidad del suelo debido al mismo cambio climático.

El estado de Veracruz ocupa el segundo lugar nacional en producción de café, con una superficie de 153 mil hectáreas, que benefician de manera directa a unas 300 mil familias dedicadas a este cultivo (Contreras, 2010). Hasta el momento se han hecho varios estudios sobre vulnerabilidad del cultivo de café (principalmente para *Coffea arabica* L.) ante los escenarios de cambio climático esperado durante el siglo XXI. La mayor parte de ellos representan análisis cualitativos (Camargo, 2010; Villers, Arizpe, Orellana, Conde, & Hernández, 2009; Hagggar & Schepp, 2012), los cuales concluyen cómo se afectarán algunos procesos fisiológicos de desarrollo del cultivo, pero no permiten saber sobre el porcentaje del cambio en el rendimiento.

Otros estudios estiman de manera cuantitativa el impacto potencial del cambio climático sobre la productividad de café; estos estudios se basan en el uso de los modelos empíricos de tipo de regresión entre la productividad de café, en función de los factores climáticos y aún algunos factores económicos relacionados con el manejo de dicho cultivo (Fontagro, 2011; Hagggar & Schepp, 2012; Laderach et al., 2011; Lin, Perfecto, & Vandermeer, 2008; Paavola, 2008; Heakin, Gay, Estrada, & Conde, 2004; Jaramillo et al., 2011) o bien de los modelos teóricos (principalmente del IIASA-FAO, 2012) sobre el desarrollo del cultivo de café en función de sus características biológicas y las condiciones climáticas esperadas en transcurso del siglo XXI (Bunn et al., 2013; Davis, Gole, Baena, & Moat, 2012; Rivera-Silva et al., 2013), en los cuales han encontrado como resultado que se espera una pérdida en la cosecha de café (*Coffea arabica* L.) en el estado de Veracruz en el transcurso del siglo XXI de orden de 10 a 25%, en función de los escenarios de cambio climático y modelos utilizados para tal análisis.

No obstante, en dichos estudios se ignora el factor de la alteración potencial de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático a largo plazo. Durante los últimos años, se han hecho varios trabajos en México sobre la estimación cuantitativa de papel de cambio en la fertilidad del suelo y su efecto en el cambio de la productividad agrícola (Nikolskii, Bakhlaeva, Contreras, & Ordaz, 2001; Contreras et al., 2002; Castillo et al., 2007; Terrazas, Nikolskii, Heerera, Castillo, & García, 2010); sin embargo, estos trabajos se dedicaron a estimar la vulnerabilidad al cambio climático solamente de cultivos de trigo, maíz y frijol.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la zona centro del estado de Veracruz al final del siglo XXI, utilizando el modelo teórico de la IIASA/FAO (2012) y considerando no sólo el proceso fisiológico de desarrollo del cultivo en función de las condiciones climáticas; sino, además, el efecto del posible cambio en la fertilidad del suelo ocasionado por el cambio climático.

## Materiales y métodos

El presente estudio se llevó a cabo en la zona centro del estado de Veracruz, en 20 municipios que se encuentran distribuidos en las seis principales regiones cafetaleras del estado de Veracruz: Atzalan, Coatepec, Córdoba, Huatusco, Misantla y Tezonapa. Dicha zona concentra 90% de los productores y 93% del total de la superficie cafetalera de la entidad (Moguel & Toledo, 1999; López, Díaz, & Martínez, 2007).

Las regiones se encuentran ubicadas entre latitudes de 18° 36' a 20° 4', y altitudes que van desde los 600 a 1 500 msnm; la precipitación media anual es de 1 717.3 mm; la temperatura media anual es de 20.2 °C; los tipos de suelo predominantes son andosoles, cambisoles, lito-soles y luvisoles, y las pendientes de los terrenos varían entre 0 y 30% (SMN, 2013; INIFAP, 2012).

Las condiciones climáticas típicas para inicio del siglo XXI se obtuvieron utilizando las normales climatológicas para cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas, mismas que se encuentran publicadas en la página web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2013). Las condiciones climáticas para final del siglo se obtuvieron de las estimaciones desarrolladas por la Unidad Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), hechas a partir de tres modelos de los 15 modelos de circulación global disponibles en el proyecto de interoperación de modelos fase 5: MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y HADGEM2-ES (Met Office Hadley) (Fernández, Zavala, & Romero, 2014).

Se han considerado dos escenarios de forzamiento radiativo: RCP 4.5 (650 ppm de CO<sub>2</sub>) y RCP 8.5 (1370 ppm); el forzamiento RCP 6.0 (720 ppm) no se ha analizado por considerarse un valor intermedio entre los seleccionados.

Los tres modelos mencionados fueron utilizados tomando en cuenta las siguientes razones:

- Aunque no existe gran diferencia entre los valores mensuales de temperatura y precipitación simulados por los diferentes modelos, los tres modelos utilizados se encuentran dentro del grupo de mejor resultado de desempeño, de acuerdo con la evaluación realizada por Cavazos *et al.* (2013).
- La resolución espacial de los 15 modelos presentados en el informe final de la actualización de escenarios de cambio climático para México, como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional es de 0.5° x 0.5° (55 x 55 km, aproximadamente) (Cavazos *et al.*, 2013). Sin embargo, los modelos utilizados fueron reestructurados mediante un proceso de reducción de escala hasta 30" x 30" (926 x 926 m, aproximadamente), tomando como referencia la climatología base 1950-2000 desarrollada por Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis (2005), quienes incorporan el efecto topográfico y, por lo tanto, se obtiene una mejor alternativa de distribución espacial de las variables de cambio climático consideradas. Usar modelos con estas características resulta de gran importancia para calcular rendimientos de café en regiones montañosas del estado de Veracruz, donde existe una gran variación climática entre zonas cafetaleras.
- El propósito del presente trabajo fue estimar el posible grado de alteración de la fertilidad de suelo y el cambio en la productividad de café, en función de los cambios esperados de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz al final del siglo XXI. Para ello partimos del supuesto de que si los rendimientos calculados no van a cambiar de manera importante, esto significaría que puede ignorarse la vulnerabilidad de la producción de café al cambio climático; pero si los rendimientos dependen significativamente de los cambios en la temperatura y precipitación simuladas por los modelos seleccionados, esto significaría que posteriormente será necesario profundizar y detallar este tipo de investigación.

Cuadro 1. Valores promedio anuales de temperatura de aire ( $T^{2000}$ ), precipitación ( $P^{2000}$ ), radiación neta ( $Rn^{2000}$ ) e índice climático ( $IHT^{2000}$ ) para inicios del siglo XXI en los sitios de referencia de producción de café (*Coffea Arabica* L.) del estado de Veracruz.

Región cafetalera	Municipio	$T^{2000}$ (°C)	$P^{2000}$ (mm año <sup>-1</sup> )	$Rn^{2000}$ (MJ m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	$IHT^{2000}$ (adim.)
Atzalán	Atzalán	16.1	1 947.32	3 900.42	0.8
	Jalacingo	15.7	1 678.52	4 116.88	0.98
	Las Minas	17.9	1 492.89	2 886.38	0.77
	Martínez de la Torre	23.6	1 986.44	3 958.62	0.79
Coatepec	Naolinco	22.6	1 046.63	5 056.40	1.92
	Coatepec	19.6	1 746.85	4 917.40	1.12
	Jalcomulco	24.5	1 090.12	5 334.82	1.95
	Teocelo	20.6	2 026.2	4 191.41	0.82
	Jilotepec	19.4	1 663.32	3 191.18	0.76
	Cosautlán de Carvajal	19.8	2 111.96	3 880.33	0.73
	Emiliano Zapata	23.2	935.6	4 102.23	1.75
Cordoba	Ixhuatlán del café	20.2	1 900.15	4 820.26	1.01
	Atoyac	24.5	2 116.74	4 039.01	0.76
Huatusco	Comapa	23.1	1 078.74	4 373.95	1.61
	Tenampa	19.8	1 681.69	3 457.04	0.82
	Huatusco	17.2	1 960.59	3 870.28	0.79
Misantla	Vega de Alatorre	24.2	1 578.69	3 967.41	1
	Misantla	24.7	1 715.56	4 407.86	1.02
	Acatlán	15.3	1 442.24	3 171.50	0.88
Tezonapa	Tezonapa	24.1	2 755.07	5 292.12	0.76

Nota: el índice climático  $IHT$  se describe por la ecuación (1).

Las características climáticas actuales de las regiones cafetaleras del estado de Veracruz se hicieron con estimaciones del impacto del cambio climático sobre la productividad de cereza de café (*Coffea Arabica* L.) al final del siglo XXI y se presentan en el cuadro 1.

Como puede observarse, las precipitaciones varían desde una lámina de 935.6 mm año<sup>-1</sup> hasta 2 755.07 mm; la temperatura media anual del aire se encuentra en un intervalo de 15 a 25°C.

Según Budyko (1974), Volobuev (1974), Aydarov (1985), Nikolskii et al. (2001), Contreras et al. (2002), Castillo et al. (2007), y Terrazas et al. (2010), las condiciones climáticas anuales para un año  $j$  pueden caracterizarse por el índice hidrotérmico local  $IHT$ :

$$IHT^j = \frac{Rn^j}{\lambda.P^j} \quad (1)$$

Donde  $Rn^j$  es la radiación neta promedio anual (MJ m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>);  $\lambda$  es el calor latente de evaporación del agua (2.512 MJ m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>), y  $P^j$  es la precipitación media anual (mm año<sup>-1</sup>).

Los valores de  $IHT^j$  son adimensionales y para México varían de 0.4 a 1 en las zonas tropicales húmedas; de 1 a 3 en las zonas semi-húmedas y semi-áridas; y de 3 a 8 en las zonas áridas del norte del país. Como se ve en el cuadro 1, los valores del  $IHT^{2000}$  para las regiones de referencia de producción de café en el estado de Veracruz varían entre 0.73 y 1.95, lo que corresponde a un clima semi-húmedo.

### Estimación de la productividad agrícola del café (*Coffea arabica* L.)

Los rendimientos del cultivo de café cereza se calcularon para los escenarios climáticos mencionados anteriormente y para las condiciones climáticas de inicio de este siglo, utilizando una ecuación propuesta por la IIASA / FAO (2012):

$$Y_{\text{cal}}^j = Y_{\text{máx}}^j * INSH^j * F_a^j \quad (2)$$

Donde  $Y_{\text{cal}}^j$  es la productividad agrícola del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de café cereza) en los sitios de referencia para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2\ 000$ ), y para el final del siglo XXI ( $j = 2\ 075-2\ 099$ );  $Y_{\text{máx}}^j$  es el rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrimentos (en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2\ 000$ ), y para el final del siglo XXI ( $j = 2\ 075-2\ 099$ );  $F_a^j$  = índice integral de la fertilidad del suelo para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2\ 000$ ), y para para el final del siglo XXI ( $j = 2\ 075-2\ 099$ ), el cual se supone puede ser diferente al final del siglo debido a cierta dependencia de la fertilidad del suelo en función de las condiciones climáticas (Contreras et al., 2002; Castillo et al., 2007; Terrazas et al., 2010).

Desde luego, el modelo no considera un efecto potencial de plagas o enfermedades (las cuales se supone también dependen del cambio climático) debido a que los modelos matemáticos existentes utilizados en las investigaciones para pronosticar el impacto del cambio climático sobre enfermedades y/o plagas son empíricos (Van der Vossen, 2005). Es decir, se han desarrollado con base en observaciones hechas en algunos sitios de referencia, por lo cual no son representativos para su aplicación en otras regiones y zonas climáticas; además, tales modelos contienen una gran cantidad de parámetros empíricos, que no se sabría cómo aplicar para el caso del estado Veracruz. Por

tal razón, dichos modelos no se utilizan en la presente investigación.

### Estimación de la productividad potencial ( $Y_{\text{máx}}^j$ )

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial o máximo  $Y_{\text{máx}}^j$  (en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) del cultivo se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos (IIASA / FAO, 2012).

$$Y_{\text{máx}}^j = Bn * IC \quad (3)$$

Donde  $Bn$  es la biomasa neta de la materia seca total (en kg ha<sup>-1</sup>) e  $IC$  es el índice de cosecha, o la fracción de  $Bn$  correspondiente al producto agrícola (adimensional). El valor de  $Bn$  (en kg ha<sup>-1</sup>) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Bn = \frac{0.36 b_{gm} L}{(1/n) + 0.25 C_i} \quad (4)$$

Donde  $b_{gm}$  es la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el Índice de Área Foliar ( $IAF$ ) igual a 5 (en kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>);  $b_{gm}$  depende principalmente de la radiación fotosintéticamente activa y de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera;  $L$  es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando el índice de área foliar  $IAF$  es menor de 5:  $IAF < 5$  (adimensional);  $n$  es la duración del ciclo normal del cultivo (en días) para el cultivo de café (*Coffea Arabica* L.), la duración de ciclo es de 270 días (IIASA / FAO, 2012);  $C_i$  es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como  $CH_2O$ ) que se pierde por la respiración de mantenimiento, misma que depende del tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire (kg día<sup>-1</sup>).

Para la obtención de los valores de  $b_{gm}$  se estimó la tasa máxima de producción de biomasa,  $Pm$  (en kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), mediante las expresiones siguientes:

Para  $Pm^3 \geq 20$  kg  $CH_2O$  ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>:

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1-N)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (5)$$

Para  $P_m < 20 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ :

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1-N)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (6)$$

Donde  $N$  es un parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa ( $Ac$ ) teórica o potencial diaria  $cn$  el cielo totalmente despejado (en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y de la radiación global de onda corta ( $R_g$ , en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Esta ecuación asume que la radiación fotosintéticamente activa ( $RFA$ ) real es la mitad de la radiación global y que en un día nublado, la  $RFA$  es el 20% de la teórica ( $Ac$ ):

$$N = \frac{Ac - 0.5R_g}{0.8Ac} \quad (7)$$

$b_o$  es la tasa bruta de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ( $\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) en días completamente nublados, con dosel cubriendo por entero el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ;  $b_c$  es la tasa bruta de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ( $\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) en días completamente despejados, con dosel cubriendo por entero el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno ( $L$ ) se calcula de la siguiente manera:

Si  $IAF < 5$

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(IAF) \quad (8)$$

Si  $IAF \geq 5$ , entonces  $L = 1$

Los valores de  $C_t$  se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$C_t = C_{30} (0.0044 + 0.0019 T + 0.0010 T^2) \quad (9)$$

Donde  $T$  es la temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo;  $C_{30}$  es la tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a  $30 \text{ °C}$  ( $0.0108$  para plantas no leguminosas, como en este caso).

La información bibliográfica sobre  $IC$ ,  $N$ ,  $IAF$ , ruta fotosintética,  $P_m$ ,  $b_o$ ,  $b_c$  y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del cultivo de café en México fueron obtenidos las publicaciones IIASA/FAO (2012) y De Wit (1965).

En cuanto a la información para el cálculo según el periodo referido en los escenarios de cambio climático para el final del siglo XXI ( $j = 2075 - 2099$ ), se tomaron las siguientes consideraciones: El  $IC$  prácticamente no depende del cambio climático, por lo que no se considera cambio; asimismo, el  $IAF$  se considera sin cambio (Cure & Acock, 1986; Anthony & Ziska, 2000); la duración del ciclo del cultivo ( $N$ ) se considera sin cambio, pues en la metodología no se consideran cambios para la fenología del cultivo de café debido a que no se cuenta con investigaciones referentes al tema en nuestro país; se asume que la transmisividad de la atmósfera no cambia de modo significativo debido a su propiedad diatérmica, por lo que los parámetros  $b_o$  y  $b_c$  permanecen sin cambio.

#### Estimación del índice de disponibilidad de agua en el suelo (INSH<sup>i</sup>)

El índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas<sup>i</sup> se calculó a través del balance hídrico anual en la zona radical de tipo acumulativo; para ello se utilizó una escala mensual mediante la ecuación propuesta por Frère y Popov (1986):

$$INSH_i^j = INSH_{i-1}^j \left( \frac{DEF_i^j}{\sum_i NH_i^j} \right) * 100 \quad (10)$$

Donde  $INSH_i^j$  es el índice de satisfacción de las necesidades hídricas en el mes  $i$  en el año  $j$ , es el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas para el mes anterior de ese mismo año;  $DEF_i^j$  es

el valor absoluto de la deficiencia de humedad en el mes  $i$  en el año  $j$ ;  $\sum_{i=1}^n NH^i$  es la sumatoria de las necesidades hídricas del cultivo en el año  $j$  desde el mes  $i$  hasta el  $n$ , considerando su ciclo (270 días, del 15 de febrero al 15 de noviembre), en el cual la planta tiene su producción de biomasa (IIASA/FAO, 2012). Para el cálculo de los valores del  $ISNH_i^j$  y  $DEF_i^j$  se ha considerado la evapotranspiración del cultivo ( $ETc_i^j$ ) en el mes  $i$  del año  $j$  y la cantidad de agua que se infiltra en el suelo ( $Inf_i^j$ ) en el mes  $i$  del año  $j$ .

Allen, Santos, Raes y Smith (2006) definen como necesidad de agua del cultivo (o necesidad hídrica,  $NH$ ) a la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo ( $ETc$ ). Para el caso que nos ocupa, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo ( $ETc_i^j$ ) se realizó con base en sus recomendaciones, utilizando mínimos datos climatológicos; la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) se calculó por mes, utilizando el programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2013), y posteriormente se multiplicó el valor obtenido por un valor coeficiente de transferencia  $Kc = 1.1$  (Allen et al., 2006).

La cantidad de agua infiltrada fue obtenida por diferencia entre la precipitación y el escurrimiento superficial por mes (SARH, 1991; CNA, 2002); posteriormente se determinó la lámina de agua aprovechable almacenada y disponible para el cultivo con base en la textura de suelo y para una profundidad de 70 cm, la cual corresponde a la zona radical del café.

Desde luego existen cafetales que se encuentran bajo sombra, por lo que resulta necesario considerar si existe un efecto de reducción de la evapotranspiración a través de los cálculos pertinentes con datos bibliográficos sobre distribución de la radiación neta dentro o debajo de la copa de los árboles (Chang, 2001). Sin embargo, de acuerdo con observaciones experimentales sobre el cambio del microclima y de la productividad de café en el caso de la sombra (Siles, Harmand, & Vaast, 2010), se ha encontrado que si bien la temperatura de las hojas de café se reduce, también existe una competencia por el agua del suelo, dado como resultado final una producción de café similar para las condiciones

de cafetales a libre exposición y bajo sombra. Considerando que el objetivo principal de los cálculos era estimar el cambio relativo del rendimiento al final del siglo XXI ( $Y^{2075-2099}$ ) como una fracción del rendimiento al inicio de este siglo ( $Y^{2000}$ ), se estimaron los valores relativos  $ISNH^{2075-2099} / ISNH^{2000}$ ,  $ET^{2075-2099} / ET^{2000}$  y  $P_r^{2075-2099} / P_r^{2000}$ , concluyendo finalmente que se puede ignorar el efecto de la sombra y asumiendo además que la arquitectura de la vegetación cambiará significativamente con el tiempo.

### Estimación del índice integral de fertilidad del suelo ( $F_a$ )

El índice integral de fertilidad agrícola ( $F_a^j$ ) para el escenario base se ha calculado según la fórmula propuesta por Pegov y Jomyakov (1991), modificada por Nikolskii, Castillo-Álvarez, Bakhlaeva, Román-Calleros y Maslov (2006):

$$F_a^j = 0.46 \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{máx}}} \frac{K}{K_{\text{máx}}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-6}{2}\right)^2} \quad (11)$$

Donde  $F_a^j$  es la fertilidad del suelo (o agrícola) para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2000$ );  $MO$ ,  $K$  y  $pH$  son los valores modales de contenido de materia orgánica en el suelo, contenido de fósforo y potasio disponibles para el cultivo y de  $pH$  típicos para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2000$ );  $MO_{\text{máx}}$ ,  $P_{\text{máx}}$  y  $K_{\text{máx}}$  son los valores máximos observados de  $MO$ ,  $P$ ,  $K$  en los terrenos estudiados ( $j = 2000$ ).

El valor  $F_a$  es adimensional, varía entre 1 y 0.1 y corresponde al suelo más fértil potencialmente; 0, al suelo completamente degradado e infértil. La ecuación (11) es útil porque utiliza la información limitada sobre algunas propiedades de suelos de la república mexicana disponible en los datos de INEGI (1988, 2004) e INIFAP (2012).

La estimación de la alteración de la fertilidad de los suelos al cambio climático está

basada en la Ley Geográfica de Zonificación del Suelo (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974). De acuerdo con esta Ley, los valores modales regionales de algunas propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos vírgenes, geomorfológicamente homogéneos (con la misma topografía, condiciones geológicas e hidrogeológicas, textura y mineralogía del subsuelo y tiempo de formación) dependen principalmente del índice climático  $IHT^j$  típico para el escenario base a inicios del siglo XXI ( $j = 2\ 000$ ), y para el final del siglo XXI ( $j = 2\ 075 - 2\ 099$ ) (Volobuyev, 1974; Aydarov, 1985; Nikol'skii et al., 2006; Castillo et al., 2007).

En el cálculo del  $IHT^j$ , para el cálculo de la radiación neta ( $R_n$ ), se empleó la ecuación (12) (Allen et al., 2006):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{nl} \quad (12)$$

Donde  $\alpha$  es albedo o coeficiente de reflexión del cultivo (adimensional), con un valor de 0.15 (Jaramillo & Gómez, 1989; Jaramillo, 2005);  $R_s$  y  $R_{nl}$  son la radiación solar entrante (o radiación global) y la radiación neta de onda larga, respectivamente, en el año  $j$  ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

Después se realizó un interpolación espacial de los valores de  $IHT$  para el escenario base ( $j = 2\ 000$ ) para toda la zona cafetalera utilizando el método de Kriging con el software *ArcGis v.10* (ESRI, 2010).

Al establecer relación cuantitativa entre los valores modales de  $F_a^{2\ 000}$  utilizando las bases existentes de los datos de la distribución actual de las propiedades de suelos vírgenes y de cafetales de México, en función del índice climático  $IHT^{2\ 000}$ , se puede suponer que según la Ley Geográfica de Zonificación del Suelo, debería conservarse dicha relación  $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$  al final del siglo XXI, cuando los valores regionales del índice climático cambiarán hacia  $IHT^{2\ 075-2\ 099}$ , considerando que el cambio climático, en promedio anual, ocurre en forma bastante lenta como para conservar la relación  $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$ . Entonces, al conocer los valores  $IHT^{2\ 075-2\ 099}$  para los sitios de referencia de producción de café, se

puede estimar cambio del factor de fertilidad en estos sitios  $F_a^{2\ 075-2\ 099}$ , utilizando la relación en la gráfica  $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$ .

La explicación esquemática de la relación existente entre la fertilidad y el  $IHT$  para presente y su posible cambio en un futuro se presenta en la figura 1.

El procedimiento para establecer la relación  $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$  ha sido descrito en los trabajos de Nikolskii et al. (2001, 2006) y Contreras et al. (2002). Para el presente trabajo incluye principalmente las etapas siguientes:

1. Selección y sistematización de sitios geográficos y de los datos sobre las propiedades mencionadas de los suelos vírgenes y de cafetales de la república mexicana utilizando el conjunto de las cartas de INEGI (2004) e INIFAP (2012). En el presente trabajo, el procesamiento de la información edafológica fue automatizado a través del software *ArcGis 10.0*; para el análisis, se utilizó el continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0), cuya resolución es de 15 m, y utilizando las bases de datos georreferenciadas sobre las propiedades de suelos de los pozos edafológicos (INEGI, 2004, 2013; INIFAP, 2012).
2. Procesamiento estadístico de los datos sobre las propiedades de los suelos y el índice de fertilidad, búsqueda de sus valores modales  $X$  y los intervalos de confianza  $X \pm 2\sigma$  (donde  $\sigma$  corresponde a la desviación estándar de los logaritmos naturales de los valores parciales de cada propiedad) en cada uno de los intervalos establecidos en la escala del índice climático  $IHT^{2\ 000}$ . En las investigaciones previas fue establecido que la distribución estadística de cada propiedad tiene carácter lognormal (Nikolskii et al., 2001; Contreras et al., 2002).
3. Establecimiento de la(s) curva(s)  $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$  de mejor ajuste a los valores modales de esta propiedad, utilizando el programa *CurveExpert 1.4* (Hyams, 2010), marcando además los intervalos de confianza.

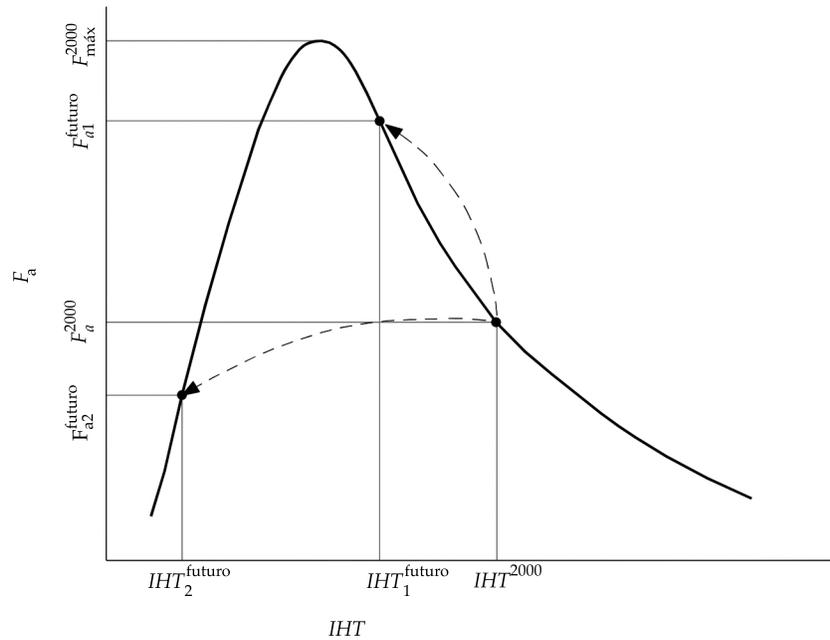


Figura 1. Esquema de predicción del cambio del índice integral de fertilidad del suelo  $F_a$  en una zona cafetalera de referencia en función del cambio del índice climático IHT en transcurso del siglo XXI. La gráfica  $F_a(IHT)$  corresponde a la dependencia entre los valores modales regionales de  $F_a$  en función de los valores regionales promedio anuales de IHT al inicio del siglo XXI.  $IHT^{2000}$  y  $F_a^{2000}$  corresponden a un sitio de referencia en el inicio de este siglo. Los pares  $IHT_1^{2075-2099}$  y  $F_{a1}^{2075-2099}$  o  $IHT_2^{2075-2099}$  y  $F_{a2}^{2075-2099}$  corresponden a los escenarios posibles de cambio del índice climático ( $IHT_1^{2075-2099}$  o  $IHT_2^{2075-2099}$ ) en el mismo sitio de referencia al final del siglo XXI y a los valores respectivos del índice de fertilidad del suelo ( $F_{a1}^{2075-2099}$  o  $F_{a2}^{2075-2099}$ ).

- Determinación del valor del índice climático  $IHT^{2075-2099}$  en cada sitio de referencia y del valor del índice correspondiente de fertilidad  $F_a^{2075-2099}$ .

No se considera el efecto directo del aumento de la concentración creciente de  $CO_2$  en la atmósfera a finales del siglo XXI sobre el cambio de contenido de materia orgánica y el índice de fertilidad debido a que no es significativo (Bazzaz & Sombroek, 1996; Knorr, Prentice, Holland, & House, 2005).

Por último, la estimación del cambio relativo en el rendimiento del cultivo de café al final del siglo XXI ( $\Delta Y$ , en %), producido para los escenarios seleccionados, se realizó con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \left( \frac{Y_{\text{calc}}^{2075-2099} - Y_{\text{calc}}^{2000}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} \right) 100$$

$$= \left( \frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{INSH^{2075-2099}}{INSH^{2000}} \frac{F_a^{2075-2099}}{F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (13)$$

También se ha estimado el cambio relativo de los componentes del rendimiento en el modelo:  $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta INSH$  y  $\Delta F_a$ , utilizado las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Y = \left( \frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099} - Y_{\text{máx}}^{2000}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \right) 100 \quad (14)$$

$$\Delta Y = \left( \frac{INSH^{2075-2099} - INSH^{2000}}{INSH^{2000}} \right) 100 \quad (15)$$

$$\Delta Y = \left( \frac{F_a^{2.075-2.099} - F_a^{2.000}}{F_a^{2.000}} \right) 100 \quad (16)$$

## Resultados y discusión

Con objeto de verificar la confiabilidad del modelo para pronosticar la productividad del café, se estableció una comparación entre la producción de café cereza promedio anual en el periodo 2003-2011 y media entre los municipios de estudio (SIAP, 2013).

La ecuación de regresión obtenida con el programa *Curve Expert 1.4* (Hyams, 2010) es:

$$\frac{Y_{\text{real}}^{2000}}{Y_{\text{real máx}}^{2000}} = 0.07 + 0.99 \frac{Y_{\text{calc}}^{2000}}{Y_{\text{calc máx}}^{2000}} \quad (17)$$

Donde  $Y_{\text{real}}^{2000}$  y  $Y_{\text{calc}}^{2000}$  son los rendimientos observado y calculado, respectivamente, como valores promedio anuales al principio del

siglo XXI en los sitios de referencia del estado de Veracruz;  $Y_{\text{real máx}}^{2000} = 2\,471.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $Y_{\text{calc máx}}^{2000} = 2\,059.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

La diferencia entre los valores  $Y_{\text{real máx}}^{2000}$  y  $Y_{\text{calc máx}}^{2000}$  puede explicarse por la ignorancia de varios factores en el proceso de cálculo de los rendimientos, como aspectos económicos y tecnológicos de manejo del cultivo, fluctuación diaria de las temperaturas del aire, riesgo de plagas y enfermedades, entre otros. Sin embargo, para nuestro análisis es importante comparar los rendimientos relativos, como fracción de los rendimientos máximos al final e inicio del siglo XXI. Debido a que existe una buena correlación entre los valores relativos  $Y_{\text{calc}}^{2000} / Y_{\text{calc máx}}^{2000}$  y  $Y_{\text{real}}^{2000} / Y_{\text{real máx}}^{2000}$  (figura 2), consideramos que las estimaciones sobre el cambio relativo de la productividad esperados en el futuro son confiables.

En la figura 3 se presenta la dependencia de los valores modales del índice de fertilidad del suelo  $F_a^{2000}$ , en función del índice climáti-

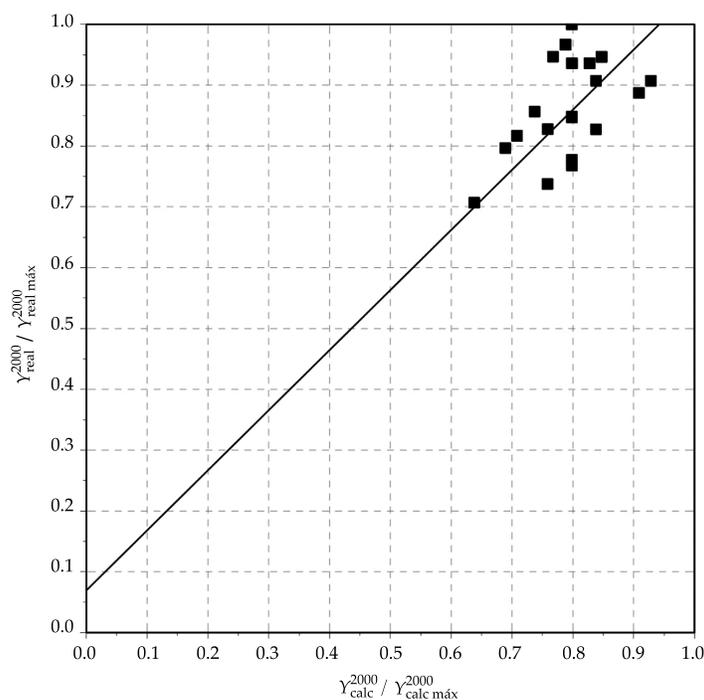


Figura 2. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados y estimados con el modelo IIASA/FAO para condiciones de clima del periodo 2003-2011.

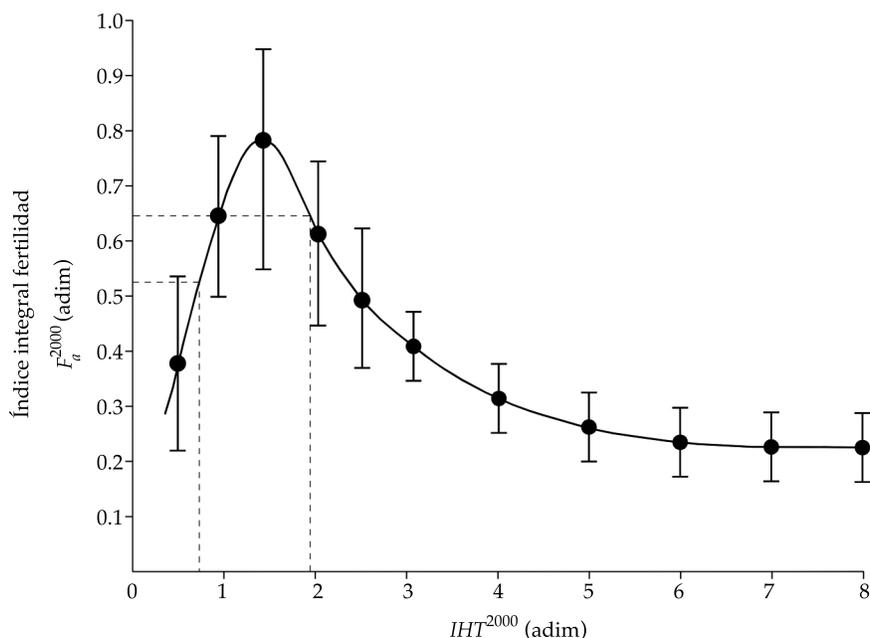


Figura 3. Dependencia de los valores modales del índice de fertilidad del suelo en función del índice climático típica para los suelos de cafetales del estado de Veracruz y los suelos vírgenes ubicados en diferentes zonas climáticas de México en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30%. También se muestran los intervalos de confianza  $\pm 2\sigma$  de los valores modales con 95 de confiabilidad. Los suelos de cafetales del estado de Veracruz tienen los índices climáticos promedio anuales  $0.73 \leq IHT^{2000} \leq 1.95$ .

co  $IHT^{2000}$ , típica para los suelos de cafetales del estado de Veracruz y los suelos vírgenes ubicados en diferentes zonas climáticas de México en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30%. Asimismo, se muestran los intervalos de confianza  $\pm 2\sigma$  de los valores modales con 95 de confiabilidad.

La comparación preliminar de forma de las gráficas  $F_a^{2000} (IHT^{2000})$  en el ámbito regional para suelos de los cafetales del estado de Veracruz con las mismas gráficas para suelos vírgenes ubicados en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30% mostró que estas gráficas son similares. La distribución de los valores del índice de fertilidad  $F_a^{2000}$  para suelos de cafetales de Veracruz en función del  $IHT^{2000}$  está dentro de

rangos de variabilidad de los valores de  $F_a^{2000}$  para suelos vírgenes. Por esta razón, en la figura 3 se presenta una gráfica general de distribución. El objetivo de la presentación generalizada de la gráfica  $F_a^{2000} (IHT^{2000})$  fue estimar con mayor seguridad el cambio relativo del índice de fertilidad  $F_a$  en suelos de cafetales de Veracruz, en función del cambio del índice climático  $IHT$  al final del siglo XXI.

Los suelos de cafetales estudiados del estado de Veracruz tienen los índices climáticos promedio anuales  $0.73 \leq IHT^{2000} \leq 1.95$ , que de acuerdo con la gráfica mostrada (figura 3) corresponden a los suelos bastante fértiles.

Con base en los escenarios de cambio climático, al final del siglo XXI se espera un incremento promedio anual en la temperatura de 11 a 25% (de 2 a 4 °C), una disminución de 10% en la precipitación (de 100 a 250 mm año<sup>-1</sup>), en función del escenario y el sitio de referencia,

Cuadro 2. Cambio estimado del rendimiento del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) ( $\Delta Y_{\text{calc}}$ ) y de sus componentes ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta INSH$  y  $\Delta F_a$ ) en las regiones cafetaleras del centro del Estado Veracruz al final del siglo XXI (en periodo de 2075 a 2099) considerando escenarios de cambio climático desarrollado por los modelos GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR para dos 2 trayectorias de crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera al final de este siglo: hasta 650 ppm y 1370 ppm.

Región cafetalera	Modelo climático	RCP 4.5					RCP 8.5				
		$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)	$\Delta INSH$ (%)	$\Delta F_a$ (%)	$\Delta Y_{\text{calc}}$ (%)	$\varphi F$ (%)	$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)	$\Delta INSH$ (%)	$\Delta F_a$ (%)	$\Delta Y_{\text{calc}}$ (%)	$\varphi F$ (%)
Atzalán	GFDL CM3	-2.19	-4.57	5.54	-12.59	35.88	-6.15	-4.39	7.85	-17.89	35.31
	HADGEM2	-2.38	-8.86	5.14	-15.14	31.50	-6.91	-3.36	5.94	-11.94	20.76
	MPI ESM LR	-1.34	-0.80	1.70	-9.50	42.82	-4.35	-0.77	3.65	-11.75	30.07
Coatepec	GFDL CM3	-5.75	-12.20	0.28	-25.71	38.78	-9.84	-14.18	-0.45	-33.65	36.38
	HADGEM2	-5.99	-14.51	0.96	-25.94	37.17	-10.37	-11.94	1.70	-25.55	30.53
	MPI ESM LR	-4.12	-9.49	2.69	-20.54	35.63	-8.04	-10.31	0.99	-24.63	28.7
Córdoba	GFDL CM3	-0.94	-7.38	-0.68	-18.86	38.79	-5.21	-5.88	3.14	-21.98	35.07
	HADGEM2	-1.19	-10.53	-0.82	-20.17	36.01	-5.91	-11.12	1.64	-21.36	17.2
	MPI ESM LR	0.68	-5.99	-4.51	-16.19	34.81	-3.49	-5.99	0.82	-17.69	19.37
Huatusco	GFDL CM3	-9.10	-9.13	1.96	-25.03	21.97	-11.39	-12.10	2.29	-31.57	24.73
	HADGEM2	-7.57	-10.87	1.90	-23.62	24.03	-11.94	-11.74	3.53	-25.49	11.64
	MPI ESM LR	-5.74	-6.52	1.57	-17.76	11.79	-9.63	-6.95	1.96	-22.74	14.34
Misantla	GFDL CM3	-4.76	-2.14	4.64	-13.30	14.51	-9.15	-6.00	4.76	-23.73	8.17
	HADGEM2	-4.85	-14.24	4.64	-22.31	7.27	-9.85	-1.58	4.60	-14.56	22.51
	MPI ESM LR	-3.67	-0.44	3.11	-10.41	39.68	-6.42	-0.42	4.64	-12.37	34.82
Tezonapa	GFDL CM3	-9.34	-10.39	14.75	-16.90	14.04	-14.40	-10.39	18.03	-23.06	16.31
	HADGEM2	-9.59	-12.99	13.11	-18.89	18.66	-16.36	-14.29	16.39	-22.67	0.88
	MPI ESM LR	-7.81	-9.09	9.84	-14.66	8.43	-11.92	-9.09	14.75	-17.20	0.51

Nota:  $\varphi F$  es error potencial en predicción de la productividad de café en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático.

y un incremento en la radiación global de 4 a 10% (de 200 a 400 Mj m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>).

En el cuadro 2 se presentan los resultados esperados de cambio mediante la modelación con la información relativa al cambio climático; la información presenta las estimación de cambio relativo de los rendimientos ( $\Delta Y_{\text{calc}}$ ) y de los componentes de la productividad ( $\Delta Y_{\text{máx}}$ ,  $\Delta INSH$  y  $\Delta F_a$ ) del cultivo de café (*Coffea arabica* L), para finales del siglo XXI (periodo 2075-2099).

El análisis de la información contenida en el cuadro 2 señala que el cambio estimado de la productividad de café ( $\Delta Y_{\text{calc}}$ ) al final del siglo XXI depende del escenario de cambio climático y de las trayectorias de crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Se espera que la productividad de café al final del siglo XXI sea

menor a la actual, con pérdidas desde un 10% hasta 34%. Se puede notar que los resultados de estimación de vulnerabilidad de café al cambio climático pronosticado por diferentes modelos tienen diferencia por lo general entre 30%.

La mayor vulnerabilidad del cultivo de café (*Coffea arabica* L) al cambio climático se espera en las regiones de Coatepec y Huatusco, donde se estima una disminución de la productividad  $\Delta Y$  de 25 a 30%, encontrándose que el mayor impacto sobre el cambio de la productividad corresponde a la deficiencia de agua para desarrollo del cultivo. El cambio esperado del índice de satisfacción de las necesidades hídricas ( $\Delta INSH$ ) debido a disminución de precipitación y crecimiento de la evapotranspiración en algunas regiones se estima de 10 a 15%, mientras que

la productividad máxima potencial relacionada con crecimiento de la temperatura y de la radiación solar se espera menor que la actual en las mismas regiones de 2 a 6%.

El análisis señala que el cambio climático va a causar una alteración de fertilidad del suelo; el índice integral de fertilidad ( $F_a$ ) va a cambiar, situándose estos cambios entre disminución hasta 5% y aumento hasta 15%, en función de la región; concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y el clima correspondiente.

El error potencial en predicción del cambio de la productividad de café ( $\phi F$ ) en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático se ha estimado con la fórmula siguiente:

$$\phi F = \left( \frac{\Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{con } F_a) \Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)}{\Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{con } F_a)} \right) 100 \quad (18)$$

Donde  $\Delta Y_{cal}^{2075-2099}(\text{con } F_a)$  es el valor de cambio de la productividad estimada, tomando en cuenta la fertilidad en el modelo y  $\Delta Y_{cal}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)$  es el valor de cambio de la productividad estimada, sin tomar en cuenta la fertilidad en el modelo.

Las estimaciones señalan que en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo  $F_a$  debido al cambio climático se puede causar error en los cálculos de los rendimientos de café al final del siglo XXI hasta 50% o aun hasta cambio del signo de  $\Delta Y$ , lo que significa que este factor no debería ser ignorado.

## Conclusiones

1. Se estima que la productividad de café cereza (*Coffea arabica* L.) en la parte central del estado de Veracruz al final del siglo XXI va a reducirse entre un 10 y 34%, en función de la región cafetalera, trayectorias de crecimiento de la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y modelo que predice escenario del cambio climático.
2. La mayor vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático se tiene en las regiones de Coatepec y Huatusco de este estado.
3. El análisis de vulnerabilidad de los componentes para la estimación de la productividad del cultivo del café: rendimiento potencial ( $Y_{m\acute{a}x.}$ ), índice de satisfacción de las necesidades hídricas (*INSH*), e índice integral de fertilidad ( $F_a$ ), demostró que cada uno ejerce influencia en el valor total de la producción estimada y son imprescindibles para determinar con un mayor grado de confiabilidad la variabilidad de la producción ante los escenarios de cambio climático.
4. La ignorancia del factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático puede causar error en las predicciones de la productividad de café al final del siglo XXI de hasta 40%, lo que significa que este factor no debe ser ignorado.

## Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias con sede en Xalapa, Veracruz; en especial al doctor Gabriel Díaz Padilla, por facilitarnos la información relativa a las propiedades de suelo muestreadas en zonas cafetaleras del estado de Veracruz.

## Referencias

- Allen, G. R., Santos, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (298 pp.). Riego y Drenaje 56. Roma: FAO.
- Anthony, E. H., & Ziska, L. H. (January, 2000). Crop Breeding Strategies for the 21st Century. *Journal of Experimental Botany*, 51(342), 1-8.
- Aydarov, I. P. (1985). *Manejo de los regímenes hídrico, salino y de nutrientes en suelos bajo riego* (en ruso) (204 pp.). Moscú: Ed. Agropromizdat.
- Bazzaz, F. & Sombroek, W. (Eds.). (1996). *Global Climate Change and Agricultural Production Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes* (146 pp.). Rome: FAO.
- Budyko, M. (1974). *Climate and Life* (508 pp.). New York: Publ. Academic Press.

- Bunn, C., Ovalle-Rivera, O., Laderach, P., Mosnier, A., Obersteiner, M., & Kirschke, D. (2013). *The Utility of an Agroecological Niche Model of Coffee Production for Future Change Scenarios*. Impacts World 2013, International Conference on Climate Change Effects, May 27-30, Potsdam, Brandenburg, Germany.
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., & Ortega, B. (2010). Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 359-377.
- Camargo, M. B. P. (2010). The Impact of Climatic Variability and Climate Change on Arabic Coffee Crop in Brazil. *Bragantia*, 69(1), 239-247.
- Castillo, A. M., Nikolskii, I., Ortiz, C., Vaquera, H., Cruz, G., Mejía, E., & González, A. (junio, 2007). Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*, 32(6), pp. 368-376.
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto-González, R., Conde-Álvarez, A. C., Quintanar-Isaías, A., Santana-Sepúlveda, J. S., Romero-Centeno, R., Maya-Magaña, M. E., Rosario de la Cruz, J. G., Ayala-Enríquez, Ma. del R., Carrillo-Tlazazanatz, H., Santiesteban, O., & Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC* (150 pp.). México, DF: INECC.
- Chang, J. H. (2001). *Climate and Agriculture: An Ecological Survey* (304 pp.). Chicago: Transaction Publisher.
- CNA (17 de abril, 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, México, D.F.
- Contreras, B. A., Nikolskii, I., Aceves, L., Arteaga, R., Escalona, M., & Fernández, D. (mayo-junio, 2002). Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia*, 36(3), 267-277.
- Contreras, H. A. (septiembre-diciembre, 2010). Los cafetales de Veracruz y su contribución a la sustentabilidad. *Estudios Agrarios*, 16(45), 143-161.
- Cure, J. D., & B. Acock (1986). Crop Responses to Carbon Dioxide Doubling: A Literature Survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(1), 127-145.
- Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., & Moat, J. (November, 2012). The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. *PLoS ONE*, 7(11), 1-13.
- De Wit, C. T. (1965). Photosynthesis of Leaf Canopies. *Agricultural Research Reports*, 663, 1-56.
- ESRI (2010). *ArcGis. An Easy Mapping and Geographic Analysis Platform (Computer Program), Version 10*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute.
- FAO (2013). *CROPWAT 8.0 for Windows (Computer Program)*. Rome: Natural Resources and Environment Department.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., & Romero, C. R. (2014). *Atlas Climático Digital de México. Ejemplos de modelos y escenarios de la 5ª Comunicación Nacional de México para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático*. Recuperado de [http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f\\_escenarios.html#ModelosGlobales5ta](http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f_escenarios.html#ModelosGlobales5ta).
- Fontagro (2011). *Sensibilidad y adaptación del café al cambio climático en Centroamérica (CafAdapt)*. San José, Costa Rica: Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria.
- Frère, M., & Popov, G. F. (1986). *Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos* (194 pp.). Roma: FAO.
- Heakin, H., Gay C., Estrada, F., & C. Conde (2004). Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México) (pp. 651-660). En L. C. Diego, C. J. C. García, A. D. F. Rasilla, H. P. F. Fernández de Arroyabe, & P. C. Garmendia (Coords.). *El clima entre el mar y la montaña*. IV congreso de la Asociación Española de Climatología, Santander, España.
- Gonzalez, E. M., Jurado, E., González, E. S., Aguirre, C. O., Jiménez, P. J., & Navar, J. (julio-septiembre, 2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, 6(3), 377-385.
- Haggar, J., & Schepp, K. (2012). *Coffee and Climate Change. Impacts and Options for Adaption in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam* (50 pp.). NRI Working Paper Series: Climate Change, Agricultura and Natural Resources No. 4. Publ. Greenwich, UK: University of Greenwich.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (December, 2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hyams, D. A. (2010). *Comprehensive Curve Fitting System for Windows (Computer Programme). Version 1.4*. San Francisco, USA: Microsoft Corp.
- IIASA/FAO (2012). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*. Rome: IIASA Publ./FAO.
- INEGI (1988). *Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología (escala 1:250 000 y 1:500 000) de la República Mexicana*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2004). *Información Nacional sobre Perfiles de Suelo. Ver. 1.2* (24 pp.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INIFAP (2012). *Muestreo de las propiedades del suelo en zonas cafetaleras de Veracruz*. Xalapa, México: INIFAP Campo Experimental.
- Jacoby, G. C., & D'Arrigo, R. D. (August, 1997). Tree Rings, Carbon Dioxide, and Climate Change. *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(16), 8350-8353.
- Jaramillo, R. A., & Gómez, G. L. (julio-septiembre, 1989). Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero. *Cenicafé* (Colombia), 40(3), 65-79.
- Jaramillo, R. A. (septiembre, 2005). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29(112), 371-382.
- Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, Ch., & Chabi-Olaye, A. (September, 2011). Some Like it Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLoS ONE*, 69(9), 1-14.
- Knorr, W., Prentice, I., Holland, E., & House, J. (2005). Long-Term Sensitivity of Soil Carbon Turnover to Warming. *Nature*, 433(7023), 298-301.
- Laderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramirez, J., Perez-Portilla, E., Schepp, K., & Eitzinger, A. (2011). Predicted Impact of Climate Change on Coffee-Supply Chains (pp. 703-723). In F. W. Leal (Ed.). *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (octubre de 2008). Synergies between Agricultural Intensification and Climate Change could Create Surprising Vulnerabilities for Crops. *BioScience*, 58(9), 847-854.
- López, M. R., Díaz, P. G., & Martínez, R. J. (2007). *Potencial productivo y tipología de productores de café en la zona centro del estado de Veracruz* (25 pp.). México, DF: INIFAP.
- Magaña, R. V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema (2004). En *Cambio climático: una visión desde México* (525 pp.). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (April, 1998). Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing over the Past Six Centuries. *Nature*, 392, 779-787.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (March, 1999). Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759-762.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (febrero, 1999). Conservación de la biodiversidad en los tradicionales sistemas de café de México. *Biología de la Conservación*, 13(1), 11-21.
- Nikolskii, G. I., Bakhlaeva, O., Contreras, A., & Ordaz, V. (2001). Assessment of Changes in Soil Properties as Dependent on Hydrotermic Conditions of Plowlands (by the Example of Mexico). *Eurasian Soil Science*, 35(10), 1031-1036.
- Nikolskii, Y. U. N., Castillo-Álvarez, M., Bakhlaeva, O. S., Román-Calleros, X. A., & Maslov, B. S. (2006). The Influence of the Possible Global Climate Change on the Properties of Mexican Soils. *Eurasian Soil Science*, 39(11), 1164-1169.
- Paavola, J. (November, 2008). Livelihoods, Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Morogoro, Tanzania. *Environmental Science & Policy*, 11(7), 642-654.
- Pegov, S. A., & Jomyakov, P. (1991). *Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos* (en ruso) (223 pp.). San Petersburgo, Rusia: Ed. Hidrometeoizdat.
- Rivera-Silva, M. R., Nikolskii-Gavrilov, I., Castillo-Álvarez, M., Ordaz-Chaparro, V. M., Díaz-Padilla, G., & Guajardo-Panes, R. A. (octubre-diciembre, 2013). Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313.
- Rodney, M. J. J. N., & Freddy, H. J. R. (2002). Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del Ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico*, 11(1), 17-21.
- SMN (2013). *Normales climatológicas* [en línea]. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua. Citado el 18 de marzo de 2013. Recuperado de [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14&Itemid=2](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14&Itemid=2).
- SARH (1991). *Manual de conservación del suelo y agua. Instructivo* (33 pp.). (3a ed.). Chapingo, México: SARH.
- SIAP (2013). *Proyecciones para el sector agropecuario en México* [en línea]. México, DF: SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Citado el 6 de marzo de 2013. Recuperado de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Siles, P., Harmand, J. M., & Vaast, P. (March, 2010). Effects of *Inga densiflora* on the Microclimate of Coffee (*Coffea arabica* L.) and Overall Biomass under Optimal Growing Conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 78(3), 269-286.
- Terrazas, M. L., Nikolskii, G. I., Herrera, G. S., Castillo, A. M., & García, E. A. (enero-marzo, 2010). Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(1), 87-102.
- Van Der Vosen, H. A. M. (October, 2005). A Critical Analysis of the Agronomic and Economic Sustainability of Organic Coffee Production. *Experimental Agriculture*, 41(4), 449-473.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (mayo, 2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interiencia*, 34(5), 322-329.
- Volobuev, V. R. (1974). *Introducción a la energía de formación de suelos* (127 pp.) (en ruso). Moscú: Nauka Publ.

## Dirección institucional de los autores

M. en C. Juan Gabriel Brigido

Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175  
Fax: +52 (595) 9520 237  
brigido.juan@colpos.mx

Dr. Iouri Nikolskii

Profesor-investigador titular  
Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175  
Fax: +52 (595) 9520 237  
nikolski@colpos.mx

M.C. Liliana Terrazas

Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175  
Fax: +52 (595) 9520 237  
termely@colpos.mx  
M.C. Sergio Santiago Herrera

Colegio de Postgraduados  
Programa de Hidrociencias  
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco  
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175  
Fax: +52 (595) 9520 237  
hserch@colpos.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

# Validación del modelo *ClimGen* en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos

• Gerardo Esquivel\* •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México*

\*Autor de correspondencia

• Julián Cerano •

*Universidad Nacional Autónoma de México*

• Ignacio Sánchez •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México*

• Armando López •

*Universidad Autónoma Chapingo, México*

• Oscar G. Gutiérrez •

*Universidad Estatal de Sonora, México*

## Resumen

Esquivel, G., Cerano, J., Sánchez, I., López, A., & Gutiérrez, O. G. (julio-agosto, 2015). Validación del modelo *ClimGen* en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 117-130.

Diversos modelos hidrológicos y ambientales con frecuencia requieren información meteorológica, como datos de entrada a intervalos de tiempo variable, que a menudo no están disponibles en los sitios de interés. En la mayoría de las estaciones meteorológicas, el periodo de registro de datos es a menudo insuficiente para permitir una buena modelación de procesos, por lo tanto existe una seria restricción en su aplicación si no se dispone de manera directa de los datos meteorológicos. En este estudio, el generador climático *ClimGen* fue evaluado para la estimación de datos faltantes de temperatura y precipitación para tres sitios con baja, media y alta ocurrencia de precipitación. Se realizó la parametrización y cálculo de datos faltantes para la estación meteorológica Riito, que representa la condición seca, obteniendo valores bajo el criterio de  $r^2$  para la variable temperatura máxima de  $r^2 = 0.96$ , temperatura mínima  $r^2 = 0.95$  y precipitación  $r^2 = 0.98$ . Las estaciones Tepehuanes y El Tarahumar, que representan la condición media de humedad, obtuvieron valores para la variable temperatura máxima de  $r^2 = 0.98$ ; temperatura mínima  $r^2 = 0.90$  y  $r^2 = 0.99$ ; y precipitación  $r^2 = 0.96$  y  $r^2 = 0.93$ , respectivamente. Por último, la estación Francisco Rueda, que representa la condición húmeda, obtuvo  $r^2 = 0.96$  para temperatura máxima;  $r^2 = 0.98$  para temperatura mínima, y  $r^2 = 0.97$  para precipitación. Los resultados indican que los datos estimados por el generador climático son representativos de los datos históricos del clima en los sitios de estudio.

**Palabras clave:** modelación de procesos, generadores climáticos, precipitación, temperatura, *ClimGen*.

## Abstract

Esquivel, G., Cerano, J., Sánchez, I., López, A., & Gutiérrez, O. G. (July-August, 2015). Validation of the *ClimGen* Model to Estimate Climate Variables when Lacking Data for Modeling Processes. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 117-130.

Many hydrological and environmental models often require meteorological information corresponding to different time intervals as input data. This information is often not available at the sites of interest. At most weather stations, data registry periods are frequently insufficient for a good modeling of processes. A series of restrictions exist in their application when meteorological data is not directly available. The present study evaluated the use of the *ClimGen* weather generator to estimate missing temperature and rainfall data for three sites with low, medium and high rainfall. The parameterization and calculation of the missing data performed for the Riito weather station, which represents dry conditions, resulted in  $r^2$  values for maximum temperature of  $r^2 = 0.96$ , minimum temperature  $r^2 = 0.95$  and rainfall  $r^2 = 0.98$ . The Tepehuanes and El Tarahumar stations represent medium rainfall conditions, and resulted in  $r^2$  values for maximum temperature of  $r^2 = 0.98$ , minimum temperature  $r^2 = 0.90$  and  $r^2 = 0.99$ , and rainfall  $r^2 = 0.96$  and  $r^2 = 0.93$ , respectively. Lastly, The Francisco Rueda stations represented high rainfall conditions and resulted in  $r^2$  values for maximum temperature of  $r^2 = 0.96$ , minimum temperature  $r^2 = 0.98$  and rainfall  $r^2 = 0.97$ . The results indicate that the data estimated by the weather generator are representative of historical climate data at the study sites.

**Keywords:** Process modeling, weather generators, precipitation, temperature, *ClimGen*.

Recibido: 12/05/2014

Aceptado: 24/04/2015

## Introducción

Las variables climáticas, como precipitación y temperatura, influyen en gran medida en el ciclo hidrológico, y cambios en estas variables podrían afectar los patrones de evaporación y escurrimiento, la cantidad de agua almacenada en glaciares, humedales, lagos y aguas subterráneas (Sarangi & Kumar, 2006). Estas variables son factores determinantes en la producción agrícola, sobre todo en los sistemas de cultivo que se encuentran por lo común en las regiones áridas y tropicales (Tingem, Rivington, Azam-Ali, & Colls, 2008); por ende, esta variabilidad afecta los procesos hidrológicos que pueden generar eventos extremos como inundaciones y/o la ocurrencia de sequías.

En el contexto de la simulación de procesos, los modelos hidrológicos y ambientales se han convertido en herramientas importantes para la planeación, manejo y gestión de recursos naturales. Sin embargo, estos modelos requieren de diferentes datos de entrada (temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, velocidad de viento y escurrimiento, entre otros) a intervalos de tiempo variable, que a menudo no están disponibles en los sitios de interés (Safeq & Fares, 2011). En la mayoría de las estaciones meteorológicas, el periodo de registro de datos es a menudo insuficiente para permitir una buena modelación de procesos, por lo tanto existe una seria restricción en la aplicación de modelos si no se dispone de manera directa de los datos meteorológicos (Hoogenboom, 2000). Esta situación resalta la importancia de extender los registros de datos mediante la generación de datos climáticos derivados de las observaciones a corto plazo, utilizando diferentes procedimientos estadísticos.

Los modelos matemáticos conocidos como generadores de tiempo estocástico que simulan series de tiempo de variables climáticas han abordado este problema (Richardson & Wright, 1984). Estos modelos proporcionan datos para incrementar el registro existente de un sitio o a través de la interpolación de los parámetros del modelo proveen información climática en

donde no se dispone de datos medidos. Estos modelos tienen varios componentes interconectados y por lo general simulan múltiples variables utilizando información meteorológica histórica observada como datos de entrada y generan datos meteorológicos estimados, que son estadísticamente similares a los registros climáticos observados (Hoogenboom & Soltani, 2003).

*WGEN* fue uno de los primeros generadores climáticos desarrollados para su uso con modelos de erosión de suelos y calidad de agua (Richardson & Wright, 1984). Otros generadores de tiempo han sido desarrollados desde entonces. *CLIGEN*, generador climático incorporado dentro del modelo *Water Erosion Prediction Procedure* (Flanagan & Livingston, 1995) se basa en los métodos de generación climáticos utilizados en *WGEN* (Nicks, Richardson, & Williams, 1990). Otros generadores climáticos incluyen *USCLIMATE* (Johnson, Hanson, Hardegree, & Ballard, 1996), *CLIMAK* (Danuso & Della, 1997) y *ClimGen* (Stöckle, Campbell, & Nelson, 1999).

Las bases de datos de registros climáticos en México, por lo general carecen de series extensas que permitan analizar la variabilidad climática en una escala de tiempo mayor a los 60 años; además, los registros presentan un alto porcentaje de datos faltantes (IMTA, 2009), representando un mayor problema de confiabilidad para ser empleadas en estudios climáticos, hidrológicos, ambientales y paleoclimáticos. Ante tal problemática, el presente trabajo se plantea como objetivos: 1) evaluar el generador climático *ClimGen* (versión 4.06.06) (Stöckle, Nelson, Donatelli, & Castellvi, 2001) para estimar datos faltantes en estaciones meteorológicas, y 2) mejorar y extender los registros meteorológicos de las estaciones.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló para tres sitios de la república mexicana con condiciones medioambientales contrastantes (baja, media y

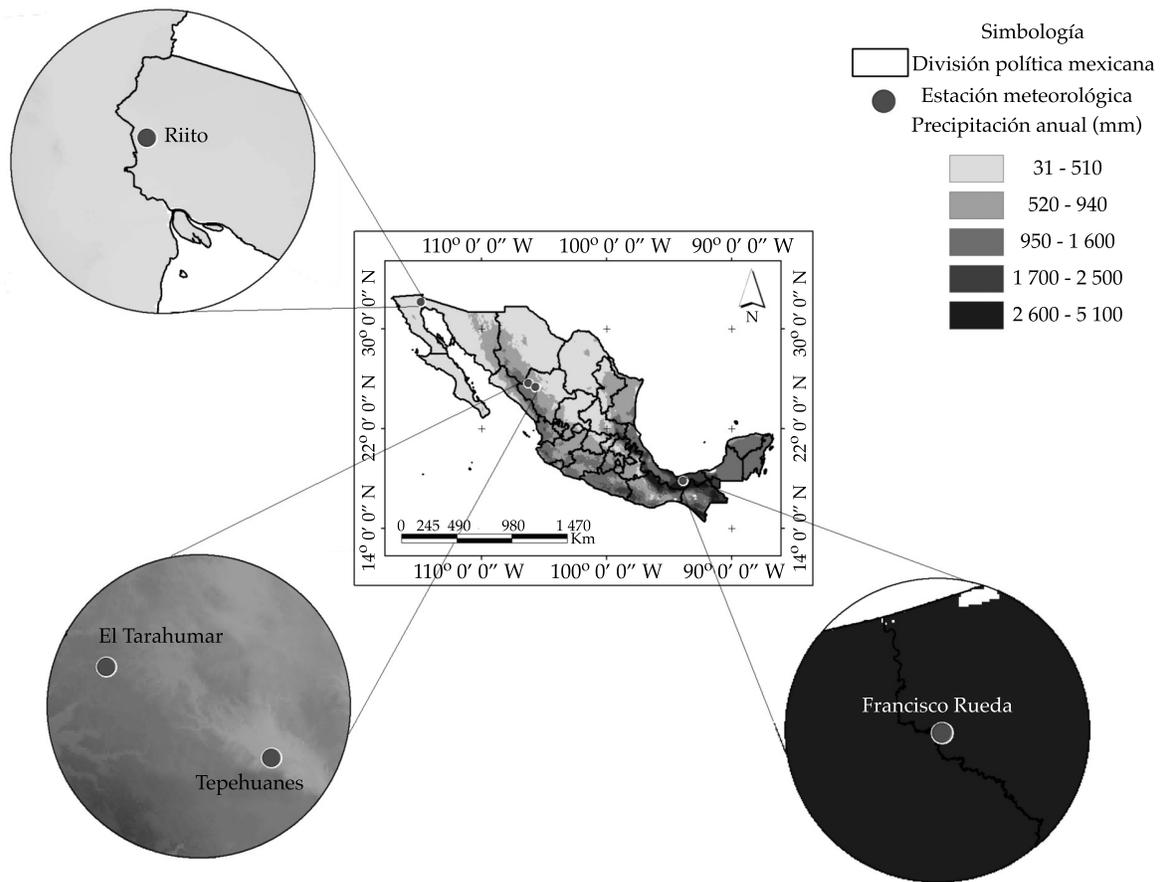


Figura 1. Localización geográfica de las estaciones meteorológicas de estudio.

alta ocurrencia de precipitación) (figura 1). La estación Riito, del municipio de San Luis Río Colorado, en el estado de Sonora, se localiza entre los 32° 08' 00" latitud norte y 114° 54' 05" longitud oeste, con una precipitación promedio anual de 52.5 mm y 22.1 °C de temperatura media anual, a una altitud de 13 metros sobre el nivel del mar (msnm). Las estaciones meteorológicas Tepehuanes y El Tarahumar se enclavan en la Sierra Madre Occidental, en el estado de Durango, entre los 25° 20' 00" y 25° 37' 01" de latitud norte, 105° 43' 00" y 106° 19' 28" de longitud oeste, respectivamente; el gradiente altitudinal oscila de los 1 680 a 3 120 msnm, con una precipitación anual de 676 mm y una temperatura media anual de 13.5 °C. Por último, la estación Francisco Rueda, en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, se ubica en los 17° 50'

12" de latitud norte y 93° 56' 30" de longitud oeste, con una precipitación promedio anual de 2 414 mm, 26.3 °C de temperatura media anual y una altitud de siete msnm (IMTA, 2009; Conagua, 2012).

### Información climática

Los registros históricos de clima fueron obtenidos del *Extractor Rápido de Información Climatológica III v. 2.0 (ERIC III)* (IMTA, 2009). Para cada una de las series de datos se realizó un análisis de consistencia de la información, a fin de detectar datos atípicos atribuibles a errores de captura o de otro tipo (p. ej., temperatura máxima con valores de 0; temperatura máxima inferior a la mínima; meses con registros repetidos, etc.), con el objetivo de mejorar la calidad de los datos

de entrada y por consiguiente disminuir errores durante el proceso de validación; asimismo, se obtuvieron los estadísticos descriptivos para cada una de las estaciones de estudio (cuadro 1). El esquema metodológico para descartar inconsistencias para cada variable, temperatura máxima ( $t_{m\acute{a}x}$ ) temperatura mínima ( $t_{m\acute{i}n}$ ) y precipitación (PP) consistió en la metodología propuesta por Castro y Carbajal (2010).

### Descripción de ClimGen

*ClimGen* es un generador estocástico de tiempo meteorológico que se utiliza para estimar series de datos a escala diaria de variables como precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento, cuyos estadísticos resultan similares a los datos climáticos históricos (Tingem, Rivington, Azam-Ali, & Colls, 2007), pudiéndose parametrizar para cada estación (Safeeq & Fares, 2011). *ClimGen* utiliza la distribución Weibull (Weibull, 1951) para representar la precipitación diaria y la curva de aproxima-

ción constituye una mejora en términos de las series Fourier utilizadas por otros generadores climáticos (p. ej., *CLIGEN*) para simular las variaciones estacionales en los datos de clima.

### Precipitación

Para generar el número de eventos de precipitación se utiliza un modelo de cadenas de Markov de segundo orden (Nicks et al., 1990). La combinación de las probabilidades condicionales para los dos estados de las cadenas de Markov ( $\alpha$ : día húmedo seguido de un día seco;  $\beta$ : día seco seguido de un día húmedo) es calculada de forma individual para cada estación en forma mensual a partir de datos históricos observados (Nicks et al., 1990), como se muestra a continuación:

$$P(W/D) = \alpha$$

$$P(D/D) = 1 - \alpha$$

$$P(D/W) = \beta$$

$$P(W/W) = 1 - \beta$$

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

	Estación	Riito	Tepehuans	El Tarahumar	Francisco Rueda
	<b>Años de registro</b>	1949-2008 (59 años)	1922-1988 (66 años)	1964-2009 (45 años)	1965-2007 (42 años)
Temperatura máxima ( $t_{m\acute{a}x}$ )	Media	31.2	26.4	19.1	31.6
	Desviación estándar	8.5	5.5	4.6	4.2
	Varianza	72.9	30.4	21.1	17.8
	Máximo	50	40	32.5	45
	Mínimo	8	7.5	4	15
Temperatura mínima ( $t_{m\acute{i}n}$ )	Media	12.9	7	1	20.7
	Desviación estándar	7.8	6.2	6.7	2.8
	Varianza	61.4	38.9	44.3	8.1
	Máximo	33	20	17	27
	Mínimo	-6.5	-11.2	-19	9
Precipitación (PP)	Media	0.14	1.3	2.5	6.5
	Desviación estándar	1.7	4.3	6.9	15.5
	Varianza	2.9	18.9	47.7	240.1
	Máximo	80	78.5	120	187.5
	Mínimo	0	0	0	0

Donde:

$P(W/D)$  = es la probabilidad de que ocurra un día con precipitación, dado que el día anterior no hubo lluvia.

$P(D/D)$  = es la probabilidad de que haya un día sin precipitación, dado que el día anterior tampoco pasó.

$P(D/W)$  = es la probabilidad de que se tenga un día sin precipitación, dado que el día anterior si llovió.

$P(W/W)$  = es la probabilidad de que un día llueva, dado que el día anterior también llovió.

*ClimGen* utiliza una distribución Weibull de dos parámetros para calcular la magnitud de la precipitación en días húmedos. La distribución Weibull ha demostrado ser superior a otras funciones de distribución de probabilidad de precipitación diaria (Selker & Haith, 1990).

### Temperatura

De acuerdo con Richardson (1981), los datos de temperatura y radiación solar son más fáciles de modelar estadísticamente que la precipitación, pues hay una menor proporción de observaciones con valores de cero y la distribución de estas variables es mucho menos sesgada que los datos de precipitación. La técnica utilizada en *ClimGen* para la generación de temperatura máxima y mínima es similar a la de *WGEN*, y se basa en el supuesto de que la temperatura es un proceso débilmente estacionario (Matalas, 1967).

Este enfoque considera que la temperatura máxima y mínima debe ser un continuo proceso estocástico multivariado con medias diarias y desviaciones estándar condicionadas por la precipitación (húmedo o seco) del día (Richardson, 1981). Series temporales de los elementos residuales de la temperatura máxima y mínima se obtienen a través de la eliminación de las medias periódicas y el ajuste de las desviaciones estándar; los elementos son analizados por la dependencia en el tiempo y una correlación cruzada (Castellvi & Söckle, 2001; Söckle & Nelson, 2003; Söckle et al., 2001).

### Calibración y validación de ClimGen

Por lo general, las estaciones climáticas de México concentradas en el *ERIC III* comprenden las variables temperatura máxima y mínima, precipitación y evaporación con periodos considerables de tiempo, mas no así con otras variables como velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa, entre otras. Por ello, la validación y calibración de *ClimGen* se realizó en específico para temperaturas y precipitación (cuadro 1). Esta herramienta computacional es de libre acceso y se puede obtener con previo registro en la siguiente dirección electrónica: [http://sites.bsyste.wsu.edu/cs\\_suite/ClimGen/documentation/demos.html](http://sites.bsyste.wsu.edu/cs_suite/ClimGen/documentation/demos.html).

La interfaz de *ClimGen* para la generación de datos climáticos se engloba en dos principales procedimientos: 1) el sitio de análisis y 2) la generación de los datos. En el procedimiento uno, primero se elige un directorio de salida al cual serán dirigidos los resultados; hecho esto, el siguiente paso es parametrizar el sitio de análisis. Esto comprende ingresar los siguientes datos: a) ubicación geográfica del lugar, es decir, se introducen las coordenadas de localización (latitud-longitud, grados decimales o UTM) y altitud; b) la región de ubicación con respecto al nivel medio del mar (*ClimGen* trae consigo una base de datos mundial de la cual se puede elegir el país de forma direccionada), y c) una breve descripción de la estación meteorológica.

En este mismo apartado se deben ingresar de forma manual los datos históricos año por año hasta completar el registro histórico de información; este proceso computacional es el que demanda más tiempo, al ingresar la información de forma reiterada. Una ventaja es que al ingresar un año con registros (completos o incompletos) se pueden observar de forma tabular y de forma gráfica (línea de tiempo), por lo que se puede hacer un segundo análisis gráfico exploratorio de la información. Integrados todos los registros históricos, *ClimGen* realiza un análisis estadístico (media, desviación estándar, valor máximo, mínimo, suma), para determinar si es posible producir la generación de los datos

o no; para ejecutar estimaciones de temperatura y precipitación es requerido un mínimo de 10 y 25 años, respectivamente.

Realizado lo anterior, el segundo procedimiento es la generación de los datos. Para ello se elige el archivo generado en el procedimiento anterior y el periodo a generar. En este contexto, *ClimGen* ofrece dos opciones de simulación: a) generar los datos faltantes, conservando los datos históricos y estimando sólo los valores ausentes; b) reemplazar totalmente todos los registros. *ClimGen* permite exportar los datos de salida en diferentes formatos, dependiendo el interés del usuario (*CropSyst/SWAT*, *LARS-WG*, entre otros). El formato *LARS-WG* fue considerado en el presente trabajo, por generar los datos en forma tabular, lo que permite una mejor manipulación de la información.

La validación del modelo consistió en la parametrización de la estación meteorológica Tepehuanes (figura 1). Se identificaron los años con la mayor y la menor precipitación histórica (1923, con 756 mm, y 1929, con 242.6 mm) y, de modo aleatorio, se eliminaron registros, con el fin de evaluar la capacidad predictiva de datos faltantes en la serie. De las dos opciones de simulación que ofrece *ClimGen*: a) generar los datos faltantes, conservando los datos históricos y estimando sólo los valores ausentes, y b) reemplazar totalmente todos los registros; se emplearon las dos opciones. Se hizo la simulación correspondiente y se graficaron sólo los datos observados *versus* los calculados; asimismo, se obtuvieron los parámetros estadísticos de los datos observados con respecto a los calculados y los generados empleando el programa estadístico *SPSS v. 17.0*, para validar la eficiencia de estimación de datos climáticos en un periodo de un año (1923, considerado el año con mayor precipitación, y 1929, año con el registro histórico de menor precipitación).

De manera consecutiva se hizo la parametrización para un periodo de tiempo más extenso; se consideraron 66 años de datos observados para la estación Tepehuanes (10084) y 45 años para la estación El Tarahumar (10026). Stöckle

*et al.* (1999) sugieren un mínimo de 20 años de datos meteorológicos históricos para completar la parametrización de variables climatológicas a ser producidos por un generador climático, y de preferencia entre 30 y 45 años. Por tal razón, los registros disponibles cumplieron con lo requerido para la estimación de datos faltantes de temperatura y precipitación en las dos estaciones.

Las estaciones validadas anteriormente comprendieron una condición de precipitación media (676 mm). Para evaluar la eficiencia del modelo en condiciones medioambientales contrastantes se analizaron las estaciones Riito, en el estado de Sonora (precipitación promedio anual de 52.5 mm), y Francisco Rueda del estado de Tabasco (2 414 mm de precipitación promedio anual) (IMTA, 2009). En las estaciones analizadas, los periodos con mayor ausencia de información fueron de tres meses, con variaciones interanuales de un mes sin registros. Por último, se hicieron gráficos de dispersión y se obtuvieron los parámetros estadísticos de los valores históricos observados y los calculados por *ClimGen*.

## Resultados

### *Estimación de datos faltantes de un año*

Existe una marcada similitud en la tendencia entre los datos observados y calculados para dos años con condiciones climáticas diferentes, un año con el mayor registro de precipitación (figura 2a) y otro con el menor registro (figura 2b), ambos correspondientes a la estación climatológica Tepehuanes, en el estado de Durango.

Los parámetros estadísticos de los datos observados con respecto a los calculados y generados por *ClimGen* para el año 1923 determinan que la varianza de los datos observados es mantenida en los datos calculados por el generador climático, no así para los datos generados (cuadro 2).

Analizando el año 1929, que históricamente registró la menor precipitación la varianza

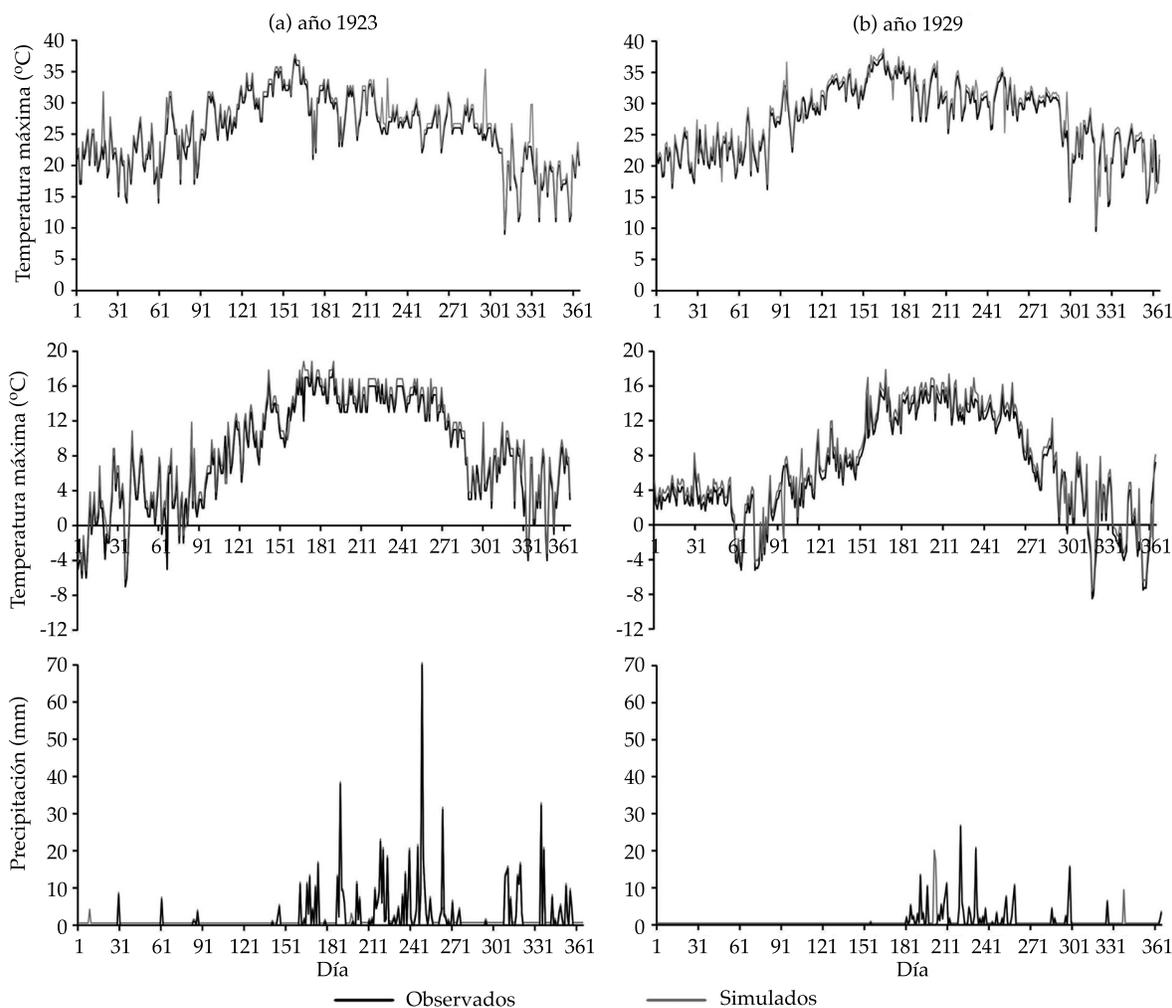


Figura 2. Series anuales de temperatura y precipitación observada y simulada empleando ClimGen para la estación Tepehuanes.

de los datos observados, es mantenida en los datos calculados; sin embargo, para los datos generados, esta varianza disminuye (cuadro 3).

### Estimación de datos faltantes mayores a un año

Al considerar periodos más extensos de información para el cálculo de datos faltantes, estación Tepehuanes (66 años) y El Tarahumar (45 años), bajo el criterio de  $r^2$ , la variable temperatura máxima presentó  $r^2=0.98$ , temperatura

mínima  $r^2=0.90$  y precipitación  $r^2=0.96$  (figura 3). Respecto a la estación El Tarahumar, la temperatura máxima mostró una  $r^2=0.98$ , temperatura mínima  $r^2=0.99$  y precipitación de  $r^2=0.93$  (figura 3). Al conservar los registros históricos y calcular sólo los valores faltantes, la varianza de los datos observados es mantenida en los datos calculados por el generador climático (cuadro 4).

Al analizar dos estaciones con condiciones mediomambientales contrastantes a la estación Tepehuanes y El Tarahumar; Riito en el estado de

Cuadro 2. Parámetros estadísticos de los datos observados *versus* calculados y generados del año 1923.

	N	Media	Varianza	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	R	R <sup>2</sup>
Tmáx_o	365	25.26	29.65	5.44	37	9		
Tmáx_c	365	25.45	30.36	5.51	37	9	0.97	0.95
Tmáx_g	365	26.71	33.91	5.82	44	12	0.52	0.27
Tmín_o	365	8.38	33.87	5.82	18	-7		
Tmín_c	365	8.36	34.31	5.85	18	-7	0.98	0.97
Tmín_g	365	7.27	42.40	6.51	20	-7	0.78	0.61
PP_o	365	2.1	37.55	6.12	70	0		
PP_c	365	2.12	37.53	6.12	70	0	0.99	0.98
PP_g	365	0.99	12.23	3.49	42	0	0.07	0.005

<sup>1</sup>La denotación "o" significa datos observados.

<sup>2</sup>La denotación "s" significa datos calculados por ClimGen.

<sup>3</sup>La denotación "g" significa datos generados por ClimGen.

Cuadro 3. Parámetros estadísticos de los datos observados *versus* calculados y generados del año 1929.

	N	Media	Varianza	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	R	R <sup>2</sup>
Tmáx_o	365	25.26	29.65	5.44	37	9		
Tmáx_c	365	25.45	30.36	5.51	37	9	0.97	0.95
Tmáx_g	365	26.71	33.91	5.82	44	12	0.54	0.30
Tmín_o	365	8.38	33.87	5.82	18	-7		
Tmín_c	365	8.36	34.31	5.86	18	-7	0.98	0.97
Tmín_g	365	7.27	42.40	6.51	20	-7	0.71	0.50
PP_o	365	2.10	37.55	6.13	70	0		
PP_c	365	2.12	37.53	6.13	70	0	0.86	0.75
PP_g	365	0.99	12.23	3.50	42	0	0.16	0.026

<sup>1</sup>La denotación "o" significa datos observados.

<sup>2</sup>La denotación "s" significa datos calculados por ClimGen.

<sup>3</sup>La denotación "g" significa datos generados por ClimGen.

Sonora y Francisco Rueda en el estado de Tabasco, los gráficos de dispersión muestran que la variable temperatura máxima presentó  $r^2=0.96$ , temperatura mínima  $r^2=0.95$  y precipitación  $r^2=0.99$ , con base en la estación Riito. Respecto a la estación Francisco Rueda, la temperatura máxima mostró una  $r^2=0.96$ , temperatura mínima  $r^2=0.98$  y precipitación de  $r^2=0.97$  (figura 4). Tanto para las estaciones climatológicas de El Tarahumar y Tepehuanes como para las estaciones Riito y Francisco Rueda, si se conservan los registros históricos en la base de datos y sólo

se generan los datos faltantes, la varianza de los datos observados es mantenida en los datos calculados por el generador climático (cuadros 4 y 5).

## Discusión

El empleo de *ClimGen* se ha extendido con éxito debido a sus múltiples aplicaciones para generar series de tiempo, como un paso previo para la aplicación de otros modelos (p. ej., *CRO-PWAT*) (Sarangi & Kumar, 2006; Bal, Choudhury,

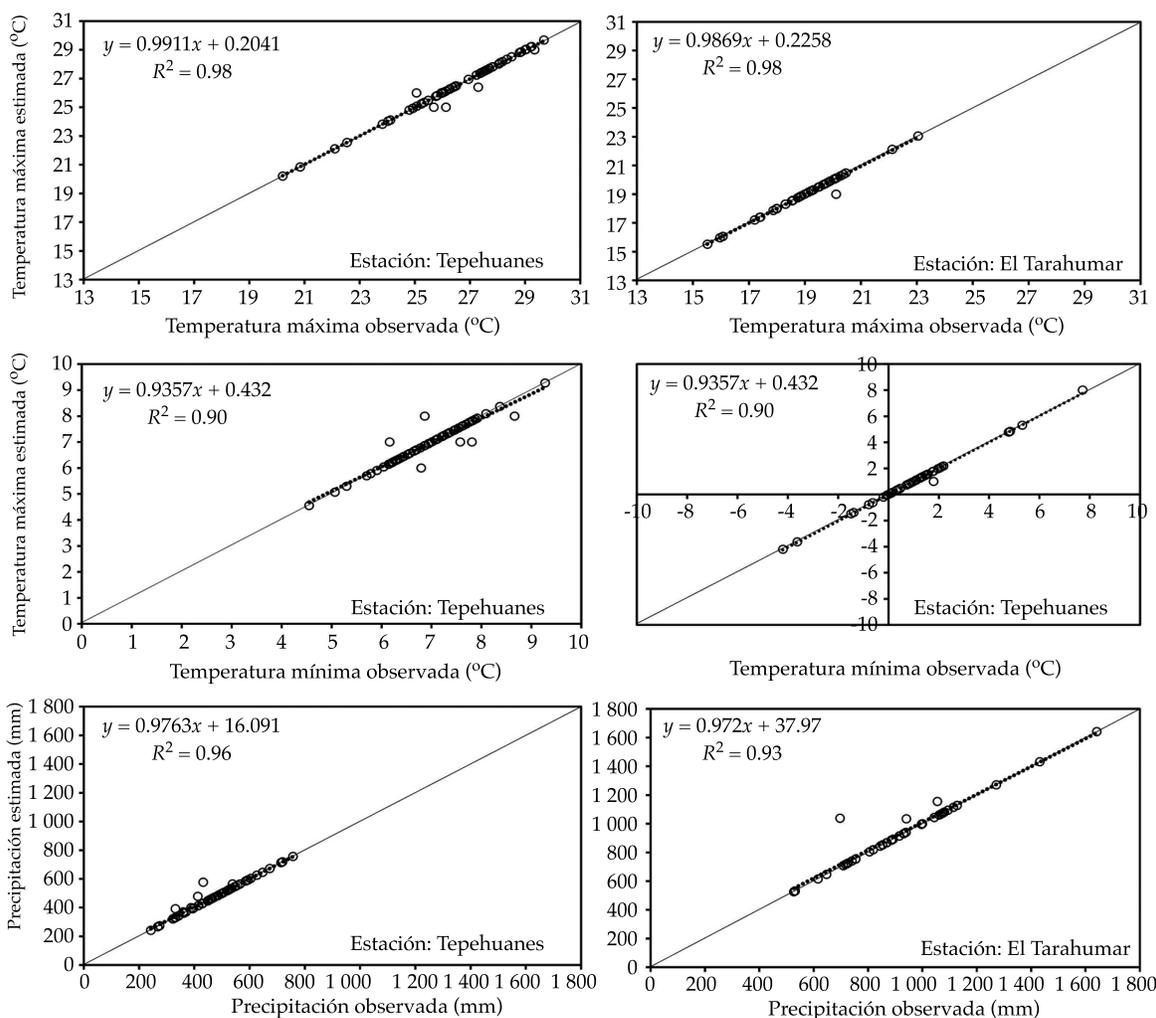


Figura 3. Variables climáticas (Temperatura máxima, mínima y precipitación) observadas y estimadas por ClimGen bajo el criterio de  $r^2$ .

Cuadro 4. Estadística descriptiva de los datos observados *versus* calculados por ClimGen para la estación climatológica El Tarahumar y Tepehuanes.

	Tepehuanes						
	Temperatura máxima		Temperatura mínima		Precipitación		
	Observada	Calculada	Observada	Calculada	Observada	Calculada	
Media	26.5	26.4	6.9	6.9	472	477	
Desviación estándar	1.95	1.94	0.83	0.82	110.86	110.23	
Varianza	3.79	3.78	0.69	0.67	12 289.74	12 151.19	
	El Tarahumar						
	Media	19.1	19.1	1.0	1.0	914	926
	Desviación estándar	1.43	1.43	2.02	2.04	218.09	218.83
Varianza	2.06	4.08	47 565.33	2.03	4.16	47 888.62	

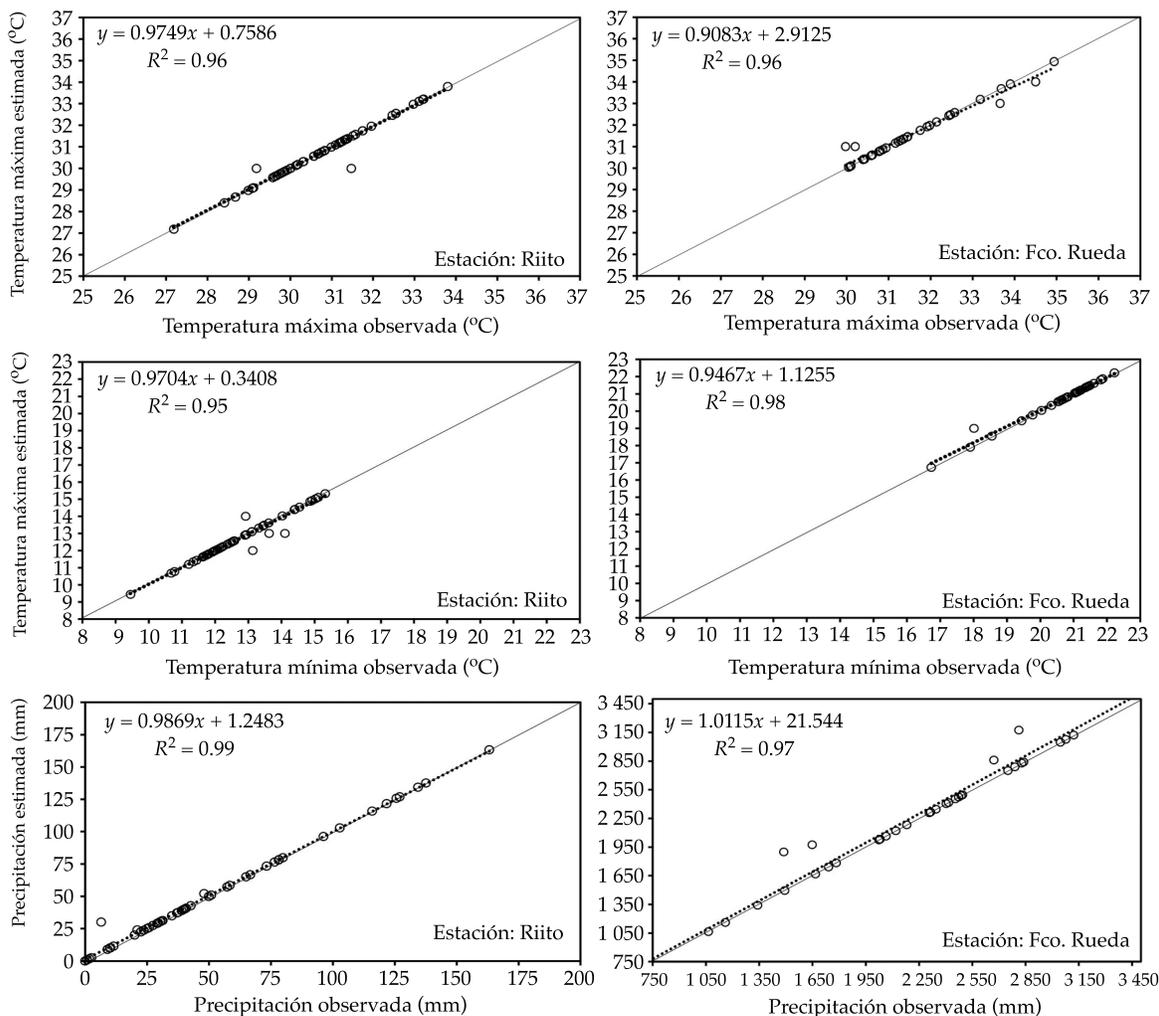


Figura 4. Temperatura máxima, mínima, y precipitación observada y estimada por ClimGen bajo el criterio de  $r^2$ .

Cuadro 5. Estadística descriptiva de los datos observados *versus* calculados por ClimGen para la estación climatológica Riito y Francisco Rueda.

	Riito					
	Temperatura máxima		Temperatura mínima		Precipitación	
	Observada	Calculada	Observada	Calculada	Observada	Calculada
Media	31.2	31.2	13.0	12.9	49	50
Desviación estándar	1.73	1.67	1.40	1.40	39.63	39.28
Varianza	3.00	2.78	1.97	1.95	1 570.50	1 543.12
	Francisco Rueda					
Media	31.6	31.6	20.6	20.6	2 189.2	2 235.8
Desviación estándar	1.32	1.22	1.17	1.12	755.24	773.44
Varianza	1.74	1.49	1.38	1.26	570 388.82	598 213.57

Sood, Jalota, & Singh, 2008; Tingem et al., 2007; McKague, Rudra & Ogilvie, 2003), para estimar variables climáticas (Sarangi, Madramootoo, & Koundal, 2008; Carbajal et al., 2010; Safeq & Fares, 2011), pero muy pocos trabajos se han enfocado en evaluar la eficiencia del modelo para la estimación de datos faltantes en una serie de datos (Moradi, Nosrati, & Eslamian, 2007; Carbajal et al., 2010).

Moradi et al. (2007), en Irán, evaluaron cinco estaciones climáticas para estimar temperatura máxima y mínima. Los coeficientes de correlación indicaron que los datos observados y los estimados presentaron un buen ajuste ( $r = 0.82$ ,  $r = 0.72$ ,  $r = 0.79$  y  $r = 0.78$ , excepto para la temperatura mínima de una estación,  $r = 0.10$ ). Sin embargo, recomienda su uso en la estimación de datos faltantes en regiones con presencia de media a baja precipitación.

Safeq y Fares (2011) evaluaron el modelo para cuatro estaciones bajo condiciones tropicales, encontrando que su eficiencia de estimación variaba según el sitio y la variable climática (p. ej., precipitación, velocidad de viento, temperatura). De los cuatro sitios, *ClimGen* sólo fue capaz de reproducir la precipitación observada para una estación y en dos lugares subestimó esta variable. Por el contrario, estimó de manera razonable la temperatura máxima, mínima y la velocidad de viento.

En el caso de la estación climatológica Tepehuanes, los análisis realizados para un periodo de un año muestran que *ClimGen* es capaz de producir estimaciones estadísticamente significativas para las variables temperatura máxima ( $r^2 = 0.95$ ), temperatura mínima ( $r^2 = 0.97$ ) y precipitación ( $r^2 = 0.98$ ), considerando el año con la mayor presencia de precipitación (1923), y  $r^2 = 0.97$  para la variable temperatura máxima,  $r^2 = 0.95$  para la temperatura mínima y  $r^2 = 0.75$  para la precipitación para el año 1929, que históricamente registró la menor precipitación. Dichas estimaciones se obtienen al conservar los datos históricos en la serie de datos; por el contrario, al no conservar los datos observados, la variabilidad conservada

disminuye para todas las variables de manera importante, temperatura máxima  $r^2 = 0.27$ , temperatura mínima  $r^2 = 0.61$  y precipitación  $r^2 = 0.005$  para el año 1923. Asimismo, para el año 1929, la temperatura máxima presenta una  $r^2 = 0.30$ , temperatura mínima  $r^2 = 0.50$ , y precipitación  $r^2 = 0.026$ .

Aunque se analizaron dos años con la mayor y menor precipitación histórica, el modelo estimó de forma aceptable las dos condiciones medioambientales estudiadas y conserva la varianza de los datos observados en los datos calculados. Sin embargo, al no considerar los datos existentes y generar por completo los 365 días, la eficiencia de estimación disminuyó. Esto corrobora los resultados encontrados por Moradi et al. (2007), y Safeq y Fares (2011), en los cuales se reportan estimaciones de buena calidad para ciertos parámetros climáticos y errores sustanciales para algunos sitios de estudio.

Considerando periodos mayores a un año, los gráficos de dispersión y el valor correspondiente de  $r^2$  indican una buena eficiencia predictiva para la variable temperatura máxima ( $r^2 = 0.98$ ) en ambas estaciones, para temperatura mínima  $r^2 = 0.90$  en la estación Tepehuanes, y  $r^2 = 0.99$  para El Tarahumar; para la precipitación una  $r^2 = 0.96$  y  $r^2 = 0.93$ , respectivamente. Estos valores muestran que para regiones de condición media de precipitación, el generador climático estimó valores de buena calidad que representan el clima de la región.

Por otro lado, en la parte norte del país, la estación meteorológica Ritto del estado de Sonora, con precipitación de 52.5 mm promedio anual, que representa las condiciones de aridez del país, las estimaciones para la variable temperatura máxima mostraron una  $r^2 = 0.96$ , temperatura mínima  $r^2 = 0.95$  y precipitación  $r^2 = 0.99$ . Asimismo, la estación Francisco Rueda del estado de Tabasco, con una precipitación de 2 414 mm promedio anual, la cual representa la condición húmeda, muestra una buena eficiencia de estimación para la variable temperatura máxima ( $r^2 = 0.96$ ). En ambas estaciones, para temperatura mínima  $r^2 = 0.98$  y

$r^2 = 0.97$  para la precipitación, respectivamente. Estos resultados demuestran la viabilidad del generador climático para la estimación de datos faltantes con independencia de las condiciones medioambientales de las estaciones de estudio. Sin embargo, se debe tener presente que las estimaciones se atribuyen principalmente a dos factores: a) cantidad de información histórica en la base de datos, y b) mayor o menor presencia de datos faltantes. El periodo máximo de datos faltantes fue de tres meses consecutivos o variaciones interanuales de un mes sin registros, los cuales se encontraban en la parte inicial, media y final del año. No se evaluó el generar un año o más sin información, ya que no fueron los planteamientos perseguidos en este estudio, aunque se debe tener presente que acorde con los resultados, cuando se generó un año completo, la varianza disminuyó.

Sin embargo, son resultados considerablemente aceptables en relación con otros trabajos, en los cuales se valoró la eficiencia del generador climático. Por ejemplo, en el altiplano peruano, se evaluó el modelo *ClimGen* para la estimación de datos faltantes de precipitación, obteniendo valores de  $r^2 = 0.70$  y  $r^2 = 0.71$  en dos estaciones, y de  $r^2 = 0.40$  para la tercera estación (Carbajal et al., 2010). Safeq y Fares (2011) demostraron que el desempeño del generador varía incluso entre estaciones de una misma región geográfica y para una variable climática en particular, reportando estimaciones confiables para diferentes variables climáticas (p. ej., temperatura máxima, temperatura mínima y velocidad de viento).

La fortaleza de contar con una serie extensa y completa de registros históricos de clima permite parametrizar modelos en los cuales es indispensable que no se tengan datos faltantes en la series de datos (Esquivel et al., 2013a; Esquivel, Bueno, Sánchez, Velásquez, & Delgado, 2013b) o que ayuden a calibrar estudios en los cuales las estaciones climatológicas desempeñan un papel fundamental (Cerano, Villaeuva, Cervantes, Trucios, & Guerrero, 2013). Las comparaciones entre los datos observados y calculados son una parte esencial de la validación del modelo, pues

proporcionan información valiosa sobre el comportamiento de los datos y determina en dónde es capaz de funcionar o no de forma adecuada. *ClimGen* demostró en general funcionar bien en las estaciones de estudio y se observó que mayor cantidad de datos observados y menor cantidad de datos faltantes en una base de datos fortalece la parametrización del modelo e incrementa la calidad de las estimación de datos.

## Conclusiones

*ClimGen* mostró un buen desempeño al calcular datos faltantes de la serie de tiempo histórica, lo cual indica que los datos estimados por el generador climático son representativos de los datos históricos del clima. Al calcular datos faltantes, es importante conservar los datos históricos observados de la estación y sólo calcular los datos faltantes; esto permite conservar la varianza de los datos calculados (temperatura máxima;  $r^2 = 0.95$ ) versus si se generan todos los datos por completo (temperatura máxima;  $r^2 = 0.27$ ). Este tipo de procedimientos permite extender los registros históricos observados de una estación en particular, lo que ampliará la posibilidad de utilizar estaciones climatológicas para su uso en estudios hidrológicos, ecológicos, paleoclimáticos y de cultivo, entre otros. Sin embargo, es necesario remarcar que se debe tener cuidado al utilizar los datos generados por el modelo y analizarlos gráficamente para identificar datos que sobreestimen o subestimen de manera significativa los registros históricos, antes de que sean utilizados como datos de entrada en una aplicación en particular. También parte importante del algoritmo mostrado en este estudio es la validación previa de la información climática a utilizar, dado que de esta calidad dependerá la información generada. El estudio también indica que es posible utilizar registros anuales de variables climáticas con información faltante, haciendo de lado la práctica común de desechar estos datos, mermando la amplitud de la información disponible para fines de modelación de procesos.

## Referencias

- Bal, S. K., Choudhury, B. U., Sood, A., Jalota, S. K., & Singh, H. (2008). Evaluation of climgen model to generate weather parameters under different climatic situations in Punjab. *Journal of Agrometeorology*, 1(1), 39-45.
- Carbajal, C. M., Yarlequé, C., Posadas, A., Silvestre, E., Mejía, A., & Quiroz, R. (2010). Reconstrucción de datos faltantes de precipitación pluvial diaria mediante la Transformada Wavelet. *Revista peruana geo-atmósferica RPGA*, 2, 76-88.
- Castellvi, F., & Stöckle, C. O. (2001). Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 44, 1683-1687.
- Cerano, P. J., Villaeuva, D. J., Cervantes, M. R., Trucios, C. R., & Guerrero, S. J. L. (2013). Reconstrucción de sequías fuertes en el parque nacional "Pico de Tancitaro, Michoacán". *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 12(2), 57-62.
- Conagua (2012). *Climatología estadística*. Comisión Nacional del Agua. Agosto 28 de 2012. Citado el ocho de enero de 2014. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/10084.pdf>; <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/10026.pdf>; <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/26076.pdf>; <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Estadistica/27015.pdf>.
- Danuso, F., & Della, M. V. (1997). *CLIMAK Reference manual* (pp. 148). DPVTA. Udine, Italy: University of Udine, Italy.
- Esquivel, A. G., Sánchez, C. I., Velásquez, V. M. A., Lopez, S. A., Lopez, L. R., & Bueno, H. P. (2013a). Modelación del escurrimiento en una subcuenca del trópico húmedo de México y su análisis mediante índices de eficiencia predictiva. *Agrofaz*, 13(2), 113-118.
- Esquivel, A. G., Bueno, H. P., Sánchez, C. I., Velásquez, V. M. A., & Delgado, R. G. (2013b). Eficiencia predictiva de modelos hidrológicos para cuencas poco instrumentadas. *Memoria III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Morelia, Michoacán México.
- Flanagan, D. C., & Livingston, S. J. (1995). *WEPP User Summary*. NSERL Report No. 11. West Lafayette, USA: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Hoogenboom, G. (2000). Contribution of Agro-Meteorology to the Simulation of Crop Production and its Applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 137-157.
- Hoogenboom, G., & Soltani, A. (2003). Minimum Data Requirements for Parameter Estimation of Stochastic Weather Generators. *Climate Research*, 25, 109-119.
- IMTA (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica v. 3.0 (ERIC III). Base de datos y software*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Johnson, G. L., Hanson, C. L., Hardegree, S. P., & Ballard, E. B. (1996). Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of Two Commonly Used Models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35, 1878-1896.
- Matalas, N. C. (1967). Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology. *Water Resources Research*, 3(4), 937-945.
- Mckague, K., Rudra, R., & Ogilvie, J. ClimGen - A Convenient Weather Generation Tool for Canadian Climate Stations. Paper No. 03-118. *Proc. CSAE/SCGR 2003 Meeting*, 6-9 July, Montreal, Québec.
- Moradi, I., Nosrati, K., & Eslamian, S. (2007). Evaluation of the RadEst and Climgen Stochastic Weather Generators for Low-Medium Rainfall Regions. *Journal of Applied Sciences*, 7(19), 2900-2903.
- Nicks, A. D., Richardson, C. W., & Williams, J. R. (1990). Evaluation of the EPIC Model Weather Generator (pp. 105-124). In A. N. Sharpley & J. R. Williams (Eds.). *EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model Documentation, USDA Technical Bulletin 1768*. Washington, DC: Government Printing Office.
- Richardson, C. W. (1981). Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resources Research*, 17(1), 182-190.
- Richardson, C. W., & Wright, D. A. (1984). *WGEN: A Model for Generating Weather Variables*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8.
- Sarangi, A., & Kumar, A. (2006). *Trend Analysis of long Term Rainfall Data for Crop Planning as an Adaptation Measure to Climate Change* (pp. 1-6). 60<sup>th</sup> International Executive Council Meeting & 5<sup>th</sup> Asian Regional Conference, New Delhi, India.
- Sarangi, A., Madramootoo, C. A., & Koundal, K. R. (2008). *Generation of Regional Water Harvesting Potential Scenarios using ClimGen Model* (pp. 139-142). International Symposium Water Harvesting, Brining Green Revolution to Rainfed Areas, New Delhi, India.
- Safeeq, M., & Fares, A. (2011). Accuracy Evaluation of ClimGen Weather Generator and Daily to Hourly Disaggregation Methods in Tropical Conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 106, 321-341.
- Selker, J. S., & Haith, D. A. (1990). Development and Testing of Single Parameter Precipitation Distribution. *Water Resources Research*, 26(11), 2733-2740.
- Stöckle, C. O., & Nelson, R. (2003). *Cropping System Simulation Model user's Manual* (p. 235). Washington, DC: Washing State University.
- Stöckle, C. O., Nelson, R., Donatelli, M., & Castellvi, F. (2001). *ClimGen: A Flexible Weather Generation Program*. 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems, Florence, Italy, 16-18 July.
- Stöckle, C. O., Campbell, G. S., & Nelson, R. (1999). *ClimGen Manual* (28 pp.). Pullman, USA: Biological Systems Engineering Department, Washington State University.
- Tingem, M., Rivington, M., Azam-Ali, S. N., & Colls, J. J. (2008). Climate Variability and Maize Production in Cameroon: Simulating the Effects of Extreme Dry and Wet Years. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 29(3), 357-370.

Tingem, M., Rivington, M., Azam-Ali, S. & Colls, J. (2007). Assessment of the Climgen stochastic weather generator at Cameroon sites. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 1(4), 86-92.

Weibull, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics - Transactions ASME*, 18(3), 293-297.

## Dirección institucional de los autores

M.C. Gerardo Esquivel Arriaga

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
km 6.5 margen derecha canal Sacramento  
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO  
Teléfono: +52 (871) 1590 104  
esquivel.gerardo@inifap.gob.mx

M.C. Julián Cerano Paredes

Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Geografía  
Departamento de Geografía Física  
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán  
04510 México, D.F., MÉXICO  
Teléfono: +52 (871) 1590 104  
cerano.julian@inifap.gob.mx

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
km 6.5 margen derecha canal Sacramento  
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO  
Teléfono: +52 (871) 1590 104  
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

Dr. Armando López Santos

Universidad Autónoma Chapingo  
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas  
Dom. Conocido s/n Bermejillo  
35230 Durango, MÉXICO  
Teléfono: +52 (872) 7760 190, 60  
armando.lopezsantos@gmail.com

Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Universidad Estatal de Sonora  
Rosales núm. 189. Col. Centro  
83001 Hermosillo, Sonora, MÉXICO  
Teléfono: +52 (662) 2153 778  
ruachogr@hotmail.com  
oscar.gutierrez@ues.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

# Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo

• Fidencio Cruz-Bautista\* •  
Universidad de Sonora, México

\*Autor de correspondencia

• Alejandro Zermeño-González • Vicente Álvarez-Reyna • Pedro Cano-Ríos •  
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México

• Miguel Rivera-González •  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Mario Siller-González •  
Instituto Politécnico Nacional, México

## Resumen

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (julio-agosto, 2015). Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 131-140.

La forma y el volumen de suelo mojado que se obtiene cuando los emisores aplican el agua es la característica más importante en el diseño de los sistemas de riego por goteo. El volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada, mientras que su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con el sistema radicular de la planta y espaciamiento entre emisores y líneas regantes. Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue desarrollar ecuaciones para describir el avance del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo en un riego por goteo. Se usó información de patrones de humedecimiento de suelo y características físicas e hidráulicas de tres diferentes texturas para el desarrollo de dos ecuaciones. Los resultados mostraron que estas ecuaciones describen el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso, con una confiabilidad de 90 y 94%. Estas ecuaciones muestran que la extensión del bulbo de humedecimiento es función del volumen de agua aplicada, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo. Los resultados demostraron que estas ecuaciones pueden utilizarse para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en un sistema de riego localizado, así como el número de emisores necesarios para humedecer el volumen de suelo requerido.

**Palabras clave:** modelo matemático, volumen de suelo mojado, riego por goteo, patrón de humedecimiento.

## Abstract

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (July-August, 2015). Modeling to Estimate the Dimensions of the Wet Bulb in Trickle Irrigation. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 131-140.

The shape and volume of the wet soil resulting from the application of water by emitters is the most important factor in the design of trickle irrigation systems. The wet soil volume represents the amount of stored water, and the extension, depth and diameter should coincide with the radicle system of the plants and the spacing between emitters and irrigation lines. Therefore, the objective of this work was to develop equations to describe the advance of water in the wet bulb with a trickle irrigation system. Information related to soil wetting patterns and physical and hydraulic characteristics were used with three different textures to develop two equations. The results show that these equations describe the lateral and vertical advance of the water in the wet bulb of sandy-loam, clay-loam and silty-loam soils with a reliability of 90 to 94%. These equations show that the extension of the wet bulb depends on the volume of water applied, the flow of the emitter, the saturated hydraulic conductivity, initial and residual moisture contents of the soil and the silt content. The results demonstrate that these equations can be used to estimate the extension of the wet bulb in the soil with a localized irrigation system, and thereby determine the number of emitters needed to moisten the volume of soil required.

**Keywords:** Mathematical model, wetted soil volume, drip irrigation, wetting-pattern.

Recibido: 05/09/2012  
Aceptado: 30/04/2015

## Introducción

Conocer la distribución del agua bajo los emisores en los sistemas de riego por goteo es un requisito para su diseño y operación, pues la característica más importante en el diseño de este tipo de sistemas es la forma y el volumen de suelo mojado que se obtienen cuando los emisores aplican el agua. Por una parte, el volumen de suelo mojado representa la cantidad de agua almacenada en el suelo; mientras que su extensión, profundidad y diámetro deben coincidir con la profundidad del sistema radicular de la planta y con el espaciamiento entre emisores y líneas regantes (Zur, 1996; Maia, Luiz, Francismar, & Dantas, 2010). El volumen de suelo mojado y su extensión es función de la textura y estructura del suelo, conductividad hidráulica saturada y contenido de humedad inicial, así como del caudal del emisor y el volumen total de agua aplicada (Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi, Mosavi, & Parvanak, 2011). También otras variables, como la posición relativa del emisor, cantidad y frecuencia de riego, cambios temporales y espaciales del contenido de humedad en el suelo, entre otras, afectan al régimen del movimiento del agua en el suelo (Mmolawa & Or, 2000; Ruiz-Canales, Plana, Ruiz-Sánchez, Franco, & Abrisqueta, 2005; Kandelous & Simunek, 2010). Entonces, si se conoce la distribución del agua dentro del volumen de suelo mojado, el o los emisores se pueden ubicar y manejar de tal forma que se garantice la colocación precisa del agua y nutrientes en la zona radicular de las plantas (Ruiz-Canales *et al.*, 2005; Amin & Ekhmaj, 2006; Elmaloglou & Diamantopoulos, 2009). No obstante, existen pocos estudios que muestran la dinámica de la distribución de agua en el suelo con riego por goteo en condiciones de campo.

Por tal razón, el objetivo de este estudio fue desarrollar ecuaciones para describir el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor en un sistema de riego por goteo superficial.

### Consideraciones teóricas

El patrón de la distribución del agua en el suelo es una de las características que influye de ma-

nera significativa en el diseño de los sistemas de riego localizado. En este sentido, se han hecho varios estudios para determinar la distribución y el patrón de humedecimiento del agua en el suelo, usando sofisticados modelos analíticos y numéricos (Dasberg & Or, 1999). Asimismo, se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos para predecir los patrones de humedecimiento del suelo con riego por goteo, derivados de observaciones experimentales y de la solución de la ecuación de Richards (Cook, Fitch, Thorburn, Charlesworth, & Bristow, 2006; Kandelous & Simunek, 2010). No obstante que la mayoría de estos modelos incorporan variables como caudal del emisor, volumen de agua aplicada y propiedades hidráulicas del suelo para sus predicciones, muchos de ellos no se presentan en forma directamente aplicable al diseño y manejo de sistemas de riego localizado, aparte de basarse en soluciones para las cuales existen fuertes restricciones (Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi *et al.*, 2011, Ramírez de Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997). Por su parte, los modelos empíricos y semi-empíricos, desarrollados de forma típica a través de análisis de regresión o de las observaciones de campo, son más convenientes de usar para el diseño y operación de estos sistemas de riego (Ramírez de Cartagena & Sáinz-Sánchez, 1997; Amin & Ekhmaj, 2006; Kandelous & Simunek, 2010; Nafchi *et al.*, 2011).

Con base en lo antes señalado y congruente con las aproximaciones introducidas por Shwartzman y Zur (1986), y Amin y Ekhmaj (2006), se proponen las ecuaciones (1) y (2) para relacionar las variables explicativas respecto al avance del agua en los bulbos de humedecimiento. Estas ecuaciones derivan de una selección de variables con el método Stepwise y la relación no lineal entre ellas se puede expresar como:

$$r = \beta_0 V^{\beta_1} K_s^{\beta_2} \theta_v^{\beta_3} \quad (1)$$

$$Z = \beta_0 V^{\beta_1} Q^{\beta_2} \theta_v^{\beta_3} \theta_r^{\beta_4} L_i^{\beta_5} \quad (2)$$

donde  $r$  = avance lateral (L);  $Z$  = avance vertical (L);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, b_4$  y  $\beta_5$  son los coeficientes de regresión;  $V$  = volumen de agua aplicada ( $L^3$ );  $Q$  = caudal del emisor ( $L^3 T^{-1}$ );  $K_s$  = conductividad hidráulica saturada ( $L T^{-1}$ );  $\theta_v$  = contenido de humedad inicial del suelo ( $L^3 L^{-3}$ );  $\theta_r$  = contenido de humedad residual del suelo ( $L^3 L^{-3}$ );  $L_i$  = contenido de limo (%).

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en tres texturas de suelo localizadas en la región lagunera de Coahuila, México. La primera textura de suelo correspondió a un franco limoso, situado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. La segunda textura correspondió a un franco arcilloso, situado en el Instituto Tecnológico de Torreón, y la tercera clase textural de suelo correspondió a un franco arenoso, situado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, ubicado en Matamoros Coahuila.

Para las pruebas de humedecimiento en campo se instaló un equipo de riego por goteo superficial. El equipo de riego se constituyó con un contenedor para agua, cabezal de riego y línea regante. La línea regante se integró por una manguera de polietileno de 12.7 mm de diámetro, tramos de tubines de polietileno de 6.35 mm de diámetro y emisores. Los tubines se colocaron sobre la línea regante con una separación de 1.5 m. El emisor se instaló al final de cada tubin.

Se realizaron tres pruebas de humedecimiento en cada textura de suelo para obtener el patrón de humedecimiento de los bulbos que se forman bajo los emisores. Las pruebas consistieron en la aplicación de tres volúmenes diferenciados de agua en el suelo con el equipo de riego descrito. La primera prueba se realizó con emisores de caudal nominal de 2 litros por hora (lph), con un tiempo de riego de 0.5, 1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas. Las otras

dos pruebas se realizaron bajo el mismo procedimiento, usando emisores de caudal nominal de 4 y 8 lph, respectivamente.

## Variables medidas

### Parámetros físicos e hidráulicos del suelo

Se determinó la proporción de partículas sólidas de cada uno de los suelos con el método del hidrómetro de Bouyoucos y la clasificación textural se hizo con el triángulo de texturas. También se determinó el contenido de humedad de los suelos mediante el método gravimétrico, antes de cada prueba, a las profundidades señaladas en el cuadro 1. Además, se determinó la conductividad hidráulica saturada de los suelos *in situ* con el permeámetro de Guelph, usando 5 y 10 cm de carga hidráulica, de acuerdo con el procedimiento descrito por Reynolds y Elrick (1985), y Reynolds *et al.* (2002). También se modelaron los parámetros de la curva de retención de agua y conductividad hidráulica saturada de los suelos usados (cuadro 2), usando el programa ROSETTA, versión: 1.2 (Schaap, Leij, & Van Genuchten, 2001), que usa las relaciones constitutivas de Van Genuchten (1980) y Mualem (1976) en sus estimaciones (Skaggs, Trout, Simunek, & Shouse, 2004; Kandelous & Simunek, 2010):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde  $\theta(h)$  representa el contenido de agua para un determinado potencial hidráulico ( $h$ );  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son los contenidos de agua a saturación y residual;  $\alpha$  y  $n$  son parámetros que influyen en la forma de la función de retención de agua:

$$K(h) = K_s S_e^L \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^2 \right] \quad (4)$$

y  $K(h)$  es la conductividad hidráulica insaturada, siendo  $L$  la conectividad entre los poros,  $K_s$  la conductividad hidráulica saturada y  $S_e$  la saturación efectiva definida como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

### Patrón de humedecimiento en el bulbo

El patrón de humedecimiento del bulbo bajo los emisores se obtuvo por medición directa del frente de humedecimiento (avance lateral y vertical) en el suelo en campo, inmediatamente después de que finalizó el riego de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Finalizado el tiempo de riego de 0.5, 1.0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 6.5 y 8.0 horas, se midió el área humedecida de suelo bajo cada emisor.
- Se excavó  $\frac{1}{4}$  de círculo del área de suelo humedecido y se trazó una cuadrícula en las coordenadas  $(x, z)$  y  $(y, z)$ , centrada en el punto fuente del emisor (figura 1).
- Finalizado el trazo, se midió la longitud del frente de humedecimiento en las direcciones horizontal y vertical.

### Análisis de datos

Para determinar los coeficientes de las ecuaciones (1) y (2), se utilizaron los datos medidos del avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento en campo; también se emplearon los datos de las características físicas e hidráulicas de los tres tipos de suelo en donde se realizaron las pruebas de humedecimiento (cuadros 1 y 2). Como se ha señalado, las variables de las ecuaciones (1) y (2) presentan una relación no lineal respecto a la variable dependiente, por lo cual se hicieron intrínsecamente lineales a través de una transformación logarítmica para facilitar su análisis y obtener los coeficientes mediante una regresión lineal múltiple (Amin & Ekhmaj, 2006).

## Resultados

### Ecuaciones para predecir la distribución del agua en los bulbos de humedecimiento

Las ecuaciones (6) y (7) muestran los coeficientes obtenidos para las variables propuestas en las ecuaciones (1) y (2). Estas variables son las que influyen en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente, y se expresan como:

$$r = 0.14 V^{0.353} K_s^{-0.110} \theta_v^{-0.387} \quad (6)$$

$$Z = 7.906 V^{0.458} Q^{-0.152} \theta_v^{0.386} \theta_r^{0.349} L_i^{-0.421} \quad (7)$$

donde  $r$  = avance lateral (m);  $Z$  = avance vertical (m);  $V$  = volumen de agua aplicada ( $m^3$ );  $K_s$  = conductividad hidráulica saturada ( $m s^{-1}$ );  $Q$  = caudal del emisor ( $m^3 s^{-1}$ );  $\theta_v$  = contenido de humedad inicial del suelo ( $m^3 m^{-3}$ );  $\theta_r$  = contenido de humedad residual del suelo ( $m^3 m^{-3}$ );  $L_i$  = contenido de limo (%).

La ecuación (6) muestra que el avance lateral ( $r$ ) es función del volumen de agua aplicada, de la conductividad hidráulica saturada y del contenido de humedad inicial del suelo. Los coeficientes de significancia parciales (prueba  $t$ ) para estas variables son 24.85, -3.93 y -7.45, respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.90 y una  $P(F > 209.26) \leq 0.01$ . El avance vertical ( $Z$ ) del agua en el bulbo de humedecimiento se explica de acuerdo con la ecuación (7) por el volumen de agua aplicada, el caudal del emisor, el contenido de humedad inicial y residual del suelo, y el contenido de limo. Los coeficientes de significancia parciales para estas variables son 20.06, -4.55, 4.10, 3.92 y -8.31, respectivamente, con coeficiente de determinación múltiple de 0.94 y una  $P(F > 194.74) \leq 0.01$ .

### Forma y extensiones de los bulbos de humedecimiento bajo un emisor

Respecto a la forma y extensión de los bulbos de humedecimiento, se muestra sólo un lado

Cuadro 1. Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos donde se realizaron las pruebas del patrón de humedecimiento.

Clase textural	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena	Humedad inicial	Densidad aparente	Conductividad hidráulica asaturada
	(cm)	(%)	(%)	(%)	( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm h}^{-1}$ )
Franco limoso	0 – 20	28	46	26	0.098	1.146	2.050
	20 – 40	24	54	22	0.105	1.154	
	40 – 60	30	52	18	0.127	1.241	
Franco arcilloso	0 – 20	26	22	52	0.066	1.139	3.283
	20 – 40	36	32	32	0.075	1.113	
	40 – 60	44	30	26	0.103	1.362	
Franco arenoso	0 – 20	11	12	77	0.030	1.468	2.803
	20 – 40	11	9	80	0.048	1.538	
	40 – 60	8	8	84	0.063	1.526	

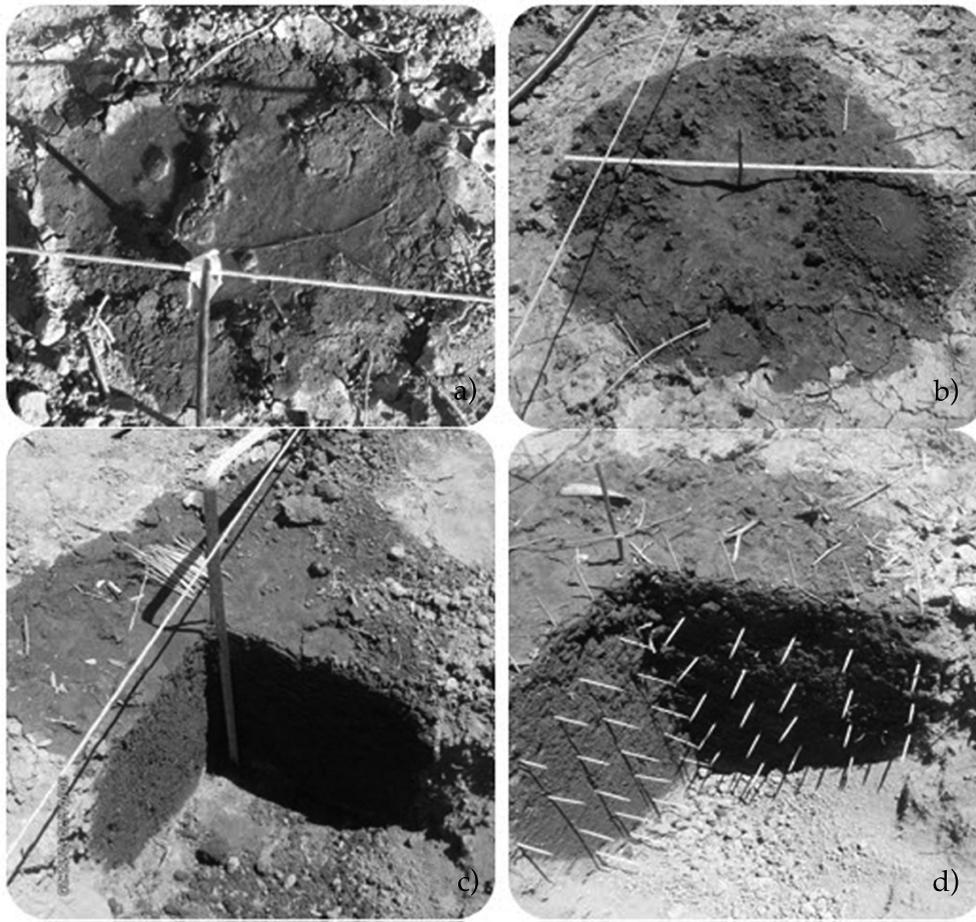


Figura 1. Forma y extensión del bulbo de humedecimiento del suelo bajo un emisor: a) aplicación de agua por el emisor; b) superficie de suelo humedecido; c) perfil del suelo humedecido; d) extensión de suelo humedecido (cuadrícula en  $x, y, z$ , con separación de 5 cm), centrado en el punto fuente.

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos de los suelos donde se realizaron las pruebas de patrón de humedecimiento, obtenidos con el programa ROSETTA, versión 1.2 (Schaap et al., 2001).

Clase textural	Profundidad (cm)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$K_s$ cm h <sup>-1</sup>	$\alpha$ cm <sup>-1</sup>	$n$	$L$
Franco limoso	0-20	0.071	0.495	1.928	0.013	1.351	-0.357
	20-40	0.062	0.480	2.210	0.009	1.413	0.207
	40-60	0.075	0.482	1.173	0.008	1.384	-0.046
Franco arcilloso	0-20	0.071	0.507	3.944	0.034	1.294	-1.611
	20-40	0.087	0.531	2.183	0.022	1.271	-1.472
	40-60	0.081	0.483	0.434	0.014	1.227	-1.439
Franco arenoso	0-20	0.041	0.401	5.152	0.050	1.416	-1.337
	20-40	0.043	0.386	4.797	0.051	1.435	-1.359
	40-60	0.037	0.386	7.336	0.056	1.499	-1.212

$\theta_s$  y  $\theta_r$  representan el contenido de agua a saturación y residual;  $k_s$ , la conductividad hidráulica saturada;  $\alpha$ , la relación inversa de la entrada de aire en el suelo;  $n$ , la medida de la distribución del tamaño de poros del suelo, y  $L$  es la conectividad entre los poros. Estos son los parámetros que influyen en la función de retención de agua.

del frente de humedecimiento (figura 2), pues se asume que el avance del frente es simétrico en el suelo. En el cuadro 3 se muestra la proporción de variación en el avance lateral y vertical del agua en los bulbos de humedecimiento entre las texturas de suelo y el volumen de agua aplicada.

## Discusión

Las ecuaciones (6) y (7) muestran las variables que influyen en el avance del agua en el bulbo de humedecimiento, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente. El avance lateral y vertical ( $r$  y  $Z$ ) del agua en el bulbo se explica por la relación que existe entre el volumen de agua aplicada ( $V$ ), caudal del emisor ( $Q$ ), conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), contenido de humedad inicial y residual del suelo ( $\theta_v$  y  $\theta_r$ ), y contenido de limo ( $L_i$ ). También se aprecia que la variable que más contribuye al movimiento lateral y vertical del agua en los bulbos húmedos es el volumen de agua aplicada ( $V$ ). Esto se debe a que  $V$  muestra los coeficientes de significancia parciales (prueba  $t$ ) más altos (24.85 y 20.06, respectivamente). De mismo modo,  $V$  presenta coeficientes de correlación de 0.905 y 0.910 respecto a las variables dependientes  $r$  y  $Z$ . Estos resultados concuerdan con información reportada por Schwartzman y Zur (1986), Gil-

Marín (2001), Amin y Ekhmaj (2006), y Nafchi et al. (2011). Entonces la extensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, es decir, el tiempo de riego, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual, y contenido de limo del suelo.

Las variables mostradas en las ecuaciones (6) y (7) son significativas para un total de nueve variables que se consideraron a ser explicativas para el avance lateral y vertical ( $r$  y  $Z$ ) del agua en el bulbo. Otras variables que también se tomaron en cuenta en el proceso de selección fueron densidad aparente, contenido de arena y arcilla. Para el caso de las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos (cuadros 1 y 2), éstos se analizaron de manera diferenciada para cada estrato del perfil del suelo, en concordancia con lo que sugiere Ramírez de Cartagena y Sáinz-Sánchez (1997).

El método Stepwise no consideró a la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) como otra de las variables que influyen en el avance vertical del agua en el bulbo de humedecimiento, como lo proponen Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), y Kandelous, Liaghat y

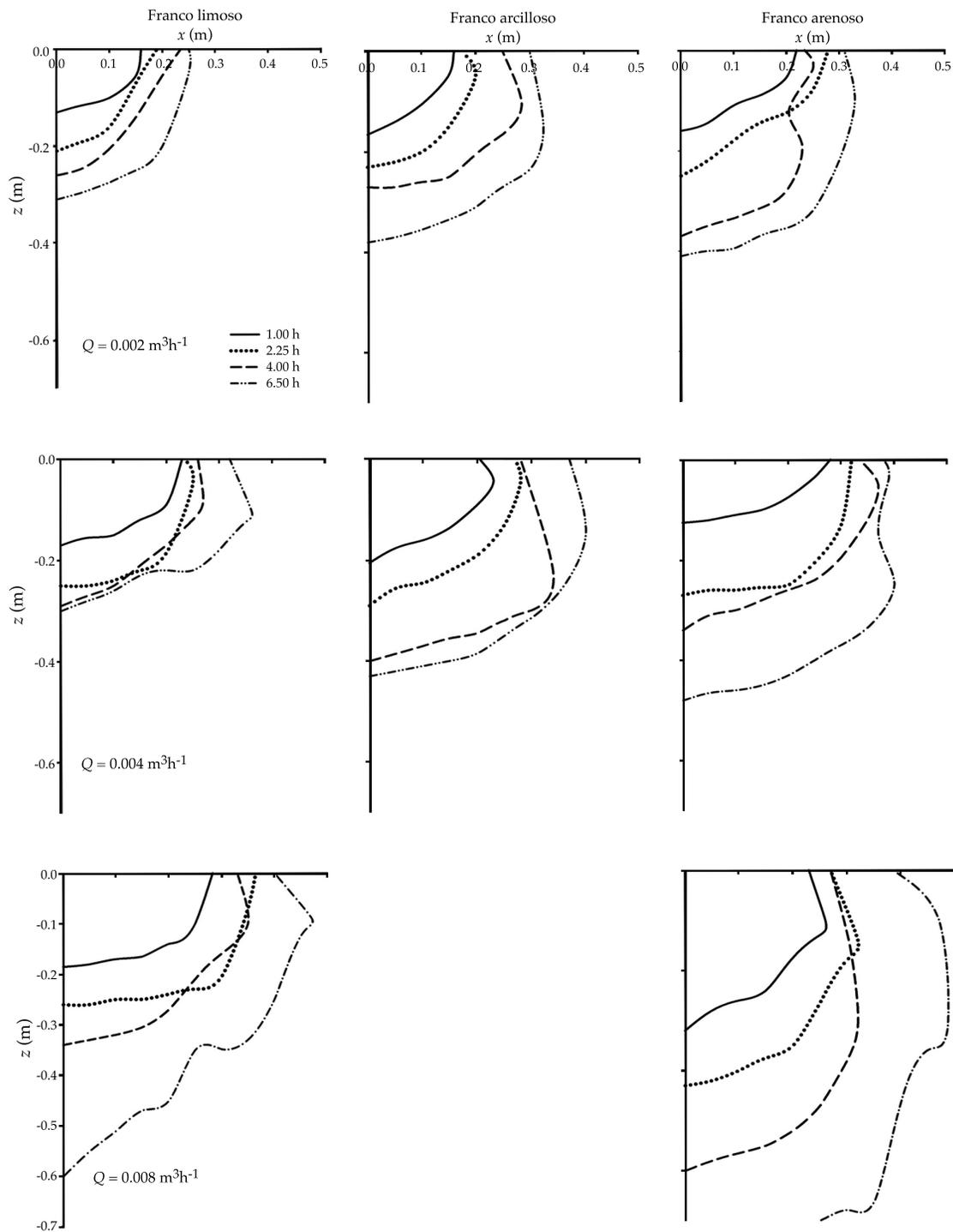


Figura 2. Avance del frente de humedecimiento en los bulbos en los suelos después 1.0, 2.25, 4.0 y 6.5 horas de riego.

Abbasi (2008) en sus modelos y como pudiera esperarse. Pero haciendo un análisis detallado, se detecta que la  $K_s$  guarda una relación inver-

samente proporcional con el contenido de humedad inicial y residual ( $\theta_v$  y  $\theta_r$ ), y el contenido de limo ( $L_i$ ) que sí fueron consideradas debido

Cuadro 3. Variación en el avance lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento entre las texturas de suelo y volumen de agua aplicada.

Q (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Franco limoso-arcilloso		Franco limoso-arenoso		Franco arcilloso-arenoso	
	(%)		(%)		(%)	
	Lateral	Vertical	Lateral	Vertical	Lateral	Vertical
0.002	0.3	7.3	0.5	10.8	0.8	3.9
0.004	0.8	9.1	1.0	10.2	0.8	5.6
0.008			1.0	16.6		

a que las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos varían con la profundidad. Caso contrario con el avance lateral o radial del agua, donde el suelo presenta cierta homogeneidad y se asume que la filtración es en sentido vertical.

Por otra parte, el agua que aplican los emisores en el suelo se distribuye por lo general formando bulbos de humedecimiento de forma elipsoidal truncadas. Estos bulbos aumentan su extensión hasta que la capacidad del suelo de absorber agua, que es función de  $r$  y  $Z$ , se iguala con la velocidad de aporte de agua por el emisor. Al inicio, cuando el suelo está seco, la velocidad de penetración es más rápida, pero si se sigue aportando agua y a medida que los espacios porosos se llenan y las arcillas se expanden, llega un momento en que esta velocidad de penetración se estabiliza. En tal caso, si la velocidad de aporte de agua excede a la infiltrabilidad del suelo, el avance lateral o radial del agua en el bulbo aumenta. En la figura 2 se observan bulbos de formas elípticas, con elongaciones horizontales cuando se aplican volúmenes de agua o caudales bajos, incluso en el suelo franco arenoso. Pero si se incrementa el tiempo de aplicación del agua, es decir, el volumen de agua aplicada ( $V$ ), el avance vertical se hace más pronunciado. Entonces los bulbos se elongan de manera vertical en las tres texturas de suelo, lo cual coincide con lo señalado por Cote, Bristow, Charlesworth, Cook y Thorburn (2003); Lazarovitch, Warrick, Furman y Simunek (2007), y Hao, Marui, Haraguchi, y Nakano (2007). Es decir, que conforme el tiempo de aplicación del agua aumenta, el avance lateral se estabiliza y el vertical aumenta (Li, Zhang,

& Li, 2003). Este incremento en el avance vertical se puede observar también en el cuadro 3, donde a un mismo volumen de agua aplicada para cada suelo, la variación en el avance lateral en el bulbo es alrededor de 1% y en el avance vertical varía de 4 a 17%. En este proceso de penetración y redistribución del agua en el suelo se obtiene un bulbo húmedo a partir de distintas combinaciones entre el avance lateral y vertical del agua. Por ello es importante señalar que el conocimiento de la forma y extensión de los bulbos de humedecimiento que se obtienen bajo un emisor permitirá determinar el número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo.

## Conclusiones

Las ecuaciones desarrolladas en este trabajo describen la distribución lateral y vertical del agua en el bulbo de humedecimiento de suelos de textura franco-arenoso, franco-arcilloso o franco-limoso, con una confiabilidad de 90 y 94%, respectivamente.

La extensión del bulbo de humedecimiento que se obtiene cuando los emisores aplican el agua en cualquiera de estos suelos depende, por orden de importancia, del volumen de agua aplicada, caudal del emisor, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y residual del suelo, y contenido de limo en el suelo.

Cuando se aplican volúmenes pequeños de agua, se obtienen bulbos de humedecimiento con formas elípticas de elongación horizontal; pero si se incrementa el tiempo de aplicación del

agua o el caudal del emisor, la elipse se elonga de manera vertical.

El conocimiento de la forma y extensiones del bulbo húmedo que se obtiene bajo un emisor permitirá determinar el número de emisores necesarios para mojar un determinado volumen de suelo.

## Referencias

- Amin, M. S. M., & Ekhmaj, A. I. M. (2006). *DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator*. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Cook, F. J., Fitch, P., Thorburn, P., Charlesworth, P. B., & Bristow, K. L. (2006). Modelling Trickle Irrigation: Comparison of Analytical and Numerical Models for Estimation of Wetting Front Position with Time. *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1353-1359.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of Soil Wetting and Solute Transport In Subsurface Trickle Irrigation. *Irrig. Sci.*, 22, 143-156.
- Dasberg, S., & Or, D. (1999). *Drip Irrigation* (162 pp.). New York: Springer-Verlag.
- Elmaloglou, S., & Diamantopoulos, E. (2009). Simulation of Soil Water Dynamics under Subsurface Drip Irrigation from Line Sources. *Agricultural Water Management*, 96, 1587-1595.
- Gil-Marín, J. A. (2001). Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana. *Revista UDO Agrícola*, 1(1), 42-47.
- Hao, A., Marui, A., Haraguchi, T., & Nakano, Y. (2007). Estimation of Wet Bulb Formation in Various Soil during Drip Irrigation. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 52(1), 187-193.
- Kandelous, M. M. K., & Simunek, J. (2010). Comparison of Numerical, Analytical, and Empirical Models to Estimate Wetting Patterns for Surface and Subsurface Drip Irrigation. *Irrig. Sci.*, 28, 435-444.
- Kandelous, M. M., Liaghat, A., & Abbasi, F. (2008). Estimation of Soil Moisture Pattern in Subsurface Drip Irrigation Using Dimensional Analysis Method. *J. Agri. Sci.*, 39(2), 371-378.
- Lazarovitch, N., Warrick, A. W., Furman, A., & Simunek, J. (2007). Subsurface Water Distribution from Drip Irrigation Described by Moment Analyses. *Vadose Zone Journal*, 7(6), 116-123.
- Li, J., Zhang, J., & Li, R. (2003). Water and Nitrogen Distribution as Affected by Fertigation of Ammonium Nitrate from a Point Source. *Irrig. Sci.*, 22, 19-30.
- Maia, C. E., Luiz, S., Francimar, A. L., & Dantas, J. (2010). Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*, 41(1), 149-158.
- Mmolawa, K., & Or, D. (2000). Root Zone Solute Dynamics under Drip Irrigation: A Review. *Plant and Soil*, 222, 163-190.
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Nafchi, R. F., Mosavi, F., & Parvanak, K. (2011). Experimental Study of Shape and Volume of Wetted Soil in Trickle Irrigation Method. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2), 458-466.
- Ramírez De Cartagena, B. F., & Sáinz-Sánchez, M. A. (1997). Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua*, 4(1), 57-70.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1985). Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship Using The "Guelph Permeameter". *Proc. National Water Well Association Conference on Characterization and Monitoring of the Vadose (Unsaturated) Zone*, Denver, Co., USA.
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., Youngs, E. G., Amoozegar, A., Booltink, H. W. G., & Bouma, J. (2002). Saturated and Field-Saturated Water Flow Parameters (pp. 797-878). In *Methods of Soil Analysis*. Part 4-Physical Methods. Madison, USA: Soil Science Society of America.
- Ruiz-Canales, A., Plana, V., Ruiz-Sánchez, M. C., Franco, J. A., & Abrisqueta, J. M. (2005). Modelo de distribución temporal y espacial del balance de agua en el suelo para riego localizado en parcela. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 7, 263-268.
- Schaap, M. G., Leij, F.J., & Van Genuchten, M. Th. (2001). Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Schwartzman, M., & Zur, B. (1986). Emitter Spacing and Geometry Of Wetted Soil Volume. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112(3), 242-253.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 304-310.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Am. J.*, 44, 892-898.
- Zur, B. (1996). Wetted Soil Volume as a Design Objective in Trickle Irrigation. *Irrig. Sci.*, 16, 101-105.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Fidencio Cruz-Bautista

Universidad de Sonora  
Departamento de Agricultura y Ganadería  
Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro

83000 Hermosillo, Sonora, MÉXICO  
Teléfono: +52 (662) 2592 100 y 2592 200  
fidencio.cruz@guayacan.uson.mx

*Dr. Alejandro Zermeño-González*

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Calz.  
antonio Narro 1923, Buenavista  
25084 Saltillo, Coahuila, MÉXICO  
Teléfono: +52 (884) 4172 474 y 4110 200  
azermeno@uaaan.mx

*Dr. Vicente Álvarez-Reyna*

*Dr. Pedro Cano-Ríos*

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad  
Laguna, Periférico Raúl López Sánchez s/n  
Colonia Valle Verde, 27059 Torreón, Coahuila, MÉXICO  
Teléfono: +52 (871) 7297 613, 7297 614 y 7297 610  
vicpall@hotmail.com  
canorp49@hotmail.com

*M.C. Miguel Rivera-González*

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en  
Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera (CENID  
RASPA-INIFAP)  
Km. 6.5 margen derecha canal Sacramento  
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO  
Teléfono: +52 (871) 1590 104, 1590 105 y 1590 107  
rivera.miguel@inifap.gob.mx

*Dr. Mario Ángel Siller González Pico*

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del  
Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN)  
Unidad Guadalajara  
Av. Científica 1145. Colonia El Bajío  
45019 Zapopan, Jalisco, MÉXICO  
Teléfono: +52 (33) 3777 3600  
mario\_siller@gdl.cinvestav.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

# Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional

• Mauro Iñiguez-Covarrubias • Jorge Flores-Velazquez\* •

• Waldo Ojeda-Bustamante •

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

\*Autor de correspondencia

• Carlos Díaz-Delgado •

*Universidad Autónoma del Estado de México*

• Roberto Mercado-Escalante •

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

## Resumen

Iñiguez-Covarrubias, M., Flores-Velazquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Díaz-Delgado, C., & Mercado-Escalante, R. (julio-agosto, 2015). Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 141-152.

En los sistemas de riego es necesario definir la línea de energía total del flujo de agua para evitar variaciones de presión y gasto en los puntos de entrega y control. En estos puntos se instalan equipos especiales, entre los que se encuentran los aforadores Venturi. Estos dispositivos han sido poco estudiados en relación con tamaños, formas, materiales o condiciones de funcionamiento, y las recomendaciones de operación provienen de características obtenidas de modo experimental. Así, modelar su funcionamiento a través de simulación con dinámica de fluidos computacional (DFC) resultaría práctico, económico y confiable. El objetivo del trabajo consistió en validar la simulación de funcionamiento con DFC de un dispositivo Venturi con base en observaciones de laboratorio. La comparación de los resultados experimentales y mediante DFC fueron altamente satisfactorios para los valores de velocidad media ( $1.53 \text{ m s}^{-1}$ ), gasto ( $0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) y presión en el manómetro diferencial (15 cm de Hg). Una vez validado el modelo, se simularon ocho escenarios de operación, con variación de gasto desde  $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , lo cual simplificó el modelo de la relación gasto-pérdida de carga del Venturi, con una ecuación cuadrática y así eliminar la incertidumbre del coeficiente de descarga requerido en los análisis experimentales. Los valores característicos del dispositivo fueron un requerimiento de carga hidráulica mínima en la contracción del Venturi de  $0.4 \text{ kg cm}^{-2}$ , y una pérdida de carga total en el Venturi de  $0.075 \text{ kg cm}^{-2}$  para  $Q_{\text{máx}}$  de  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Por último se recomienda diseñar dispositivos Venturi con DFC y con ello obtener información confiable para su instalación en sistemas de riego.

**Palabras clave:** dinámica de fluidos computacional (DFC), aforador Venturi, sistemas de riego.

## Abstract

Iñiguez-Covarrubias, M., Flores-Velazquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Díaz-Delgado, C., & Mercado-Escalante, R. (July-August, 2015). Comparison of Venturi Tube-Meter Experimental Data with Computational Fluid Dynamics Simulations. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 141-152.

Irrigation systems require defining the total energy line of the water flow in order to prevent variations in pressure and flow at delivery and control points. Special equipment are installed at these points, including Venturi gauges. These devices have not been widely studied in terms of sizes, shapes, materials or functioning conditions, and the operating recommendations are derived from experimentally obtained characteristics. Thus, modeling their functioning with computational fluid dynamics (CFD) simulations would be practical, economical and reliable. The objective of this work was to validate the CFD simulation of the functioning of a Venturi device based on laboratory observations. The comparison of the experimental results and those obtained with the CFD were highly satisfactory for the mean velocity ( $1.53 \text{ m s}^{-1}$ ), flow ( $0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) and pressure in the differential manometer (15 cm de Hg). After the model was validated, 8 operating scenarios were simulated with variations in flow from  $0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  to  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  which simplified the modeling of the head loss flow rate relationship of the Venturi, with a quadratic equation, thereby eliminating the uncertainty related to the discharge coefficient required by the experimental analysis. The characteristic values of the device were a minimum hydraulic head of  $0.4 \text{ kg cm}^{-2}$  at the contraction of the Venturi and a total pressure loss of  $0.075 \text{ kg cm}^{-2}$  in the Venturi for a  $Q_{\text{max}}$  of  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Lastly, the design of Venturi devices using CFD is recommended to obtain reliable information for its installation in irrigation systems.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD), venturimeters, irrigation systems.

Recibido: 01/07/2014

Aceptado: 28/04/2015

## Introducción

En el diseño y operación de estructuras hidráulicas integradas en plantas de bombeo, plantas potabilizadoras, centrales de generación hidroeléctrica, micro centrales hidroeléctricas y sistemas de riego, entre otras, es necesario conocer con la mayor precisión posible la línea de energía total y, en su caso, regularla, para evitar variaciones no deseadas de presión y gasto en los puntos de entrega y control. En efecto, estos puntos son hidráulicamente idóneos para instalar piezas especiales de medición de flujo, entre las que se encuentran los aforadores tipo Venturi. Sin embargo, estos dispositivos han sido poco estudiados en relación con tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales, en particular debido a la elevada inversión que representa la experimentación en laboratorio de cada una de sus numerosas alternativas.

Para el diseño de un aforador instalado en una tubería se utilizan conceptos y modelos de la mecánica de fluidos (Levy, 1957; White, 1994), lo que requiere definir, en primer término, el gasto por conducir (SARH, 1973). Posteriormente se selecciona el tamaño idóneo de longitudes y se definen las condiciones de alojamiento y operación del dispositivo. Bajo este proceso se revisan las dimensiones del aforador, considerando las corrientes cinéticas, así como las características del tipo de material y la velocidad interna del agua.

La velocidad de un fluido a través de una tubería se puede determinar cuando se restringe el flujo y se mide la reducción en presión debida al aumento de velocidad en el sitio de restricción. Los medidores de flujo que se basan en este principio se conocen como flujómetros de presión diferencial. Algunos de estos dispositivos de medición son los Venturi, las placas de orificio y las toberas, entre otros, y consisten básicamente de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga piezométrica, que se traduce en una pérdida de energía.

Chow (1959) señala que para definir las recomendaciones de operación de un equipo hidráulico, en particular en el estudio de piezas

especiales como los aforadores Venturi (White, 1994), es necesario determinar las pérdidas de carga entre los puntos de interés. Para estos cálculos se utiliza la ecuación de la conservación de energía (ecuación (1)):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_{f_{1-2}} \quad (1)$$

Donde  $v$  = velocidad del agua ( $\text{m s}^{-1}$ );  $g$  = aceleración de la gravedad ( $\text{m s}^{-2}$ );  $z$  = carga de posición (m);  $\sum_1^2 h_{f_{1-2}}$  = pérdidas totales de energía entre las secciones 1 y 2 (m);  $\frac{p_n}{\gamma}$  = carga de presión en el punto  $n$  (m);  $\frac{v_n^2}{2g}$  = carga de velocidad en el punto  $n$  (m), y  $\gamma$  peso específico del fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

La ecuación es deducida en su forma integral y se utiliza en la mayoría de aplicaciones para flujo con variables promedio, como la velocidad media ( $\text{m s}^{-1}$ ) en la sección considerada. La aplicación de este modelo se encuentra en todo tipo de estructuras hidráulicas utilizadas en el campo de la ingeniería (SARH, 1973).

El aforador Venturi puede dividirse en cuatro zonas para su análisis (figura 1): a) *zona de entrada*: tiene como función favorecer una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad y con ello la velocidad de llegada a la zona de contracción; b) *zona de contracción*: parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de reducción de diámetro de entrada al diámetro menor por acción del estrangulamiento; c) *zona de expansión*: conformada por un tramo de transición del diámetro menor al diámetro mayor igual al de entrada; d) *zona de salida*: constituida por un tramo recto sin cambio de diámetro que conduce el flujo hacia la tubería en uso.

Los componentes del aforador Venturi se diseñan para diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y tipo de material. La zona de contracción-expansión puede ser curva o recta, según el diseño propuesto; así, para cada equipo se propone el ángulo determinante de la longitud de la ampliación, siendo justo la

necesaria para normalizar el flujo al final del dispositivo. Una de las relaciones más críticas en los Venturis es el grado de estrangulamiento ( $m$ ), que relaciona las áreas de la sección contraída ( $A_2$ ) con la sección de entrada ( $A_1$ ); es decir,  $m = A_2/A_1$ . Para la medición de la pérdida de energía por el estrangulamiento, se recomienda realizarla con base en dos secciones (figura 1): una justo al final de  $D_1$  y la segunda en la contracción  $D_2$ , justo después de la terminación de contracción e inicio de la ampliación (ASME, 1983). Para esta medición de la caída de la línea de energía entre las dos secciones señaladas existe una metodología de cálculo de acuerdo con el equipo disponible en laboratorio, sin embargo, el medio más recomendable es el manómetro diferencial de mercurio instalado en los puntos indicados.

Por otro lado, la ASME (1983) presenta un modelo matemático deducido a partir de la ecuación (1) para la determinación del gasto en función de un coeficiente de descarga, con el conocimiento de la línea de distribución de presiones o línea piezométrica a partir del centro del tubo. Además, dado que la pérdida de energía entre las secciones de entrada y de contracción está representado por  $h = (z_1 + v_1^2/2g) - (z_2 + v_2^2/2g)$  y si  $h$  se sustituye en la ecuación de conservación de la masa  $A_1 = A_2 v_2/v_1$ , se obtiene la ecuación (2):

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gh}{1-(m)^2}} \quad (2)$$

Donde el coeficiente  $C_d$  es el conocido coeficiente de descarga y se determina a partir de pruebas experimentales de laboratorio. Smetana (1957), reportado por Sotélo-Ávila (1979), presenta dos tablas para la determinación del coeficiente  $C_d$ : una en función de la relación de estrangulamiento  $m = A_2/A_1$  y otra en función del número de Reynolds presente en la sección del estrangulamiento.

Ranald (1978) y la ASME (1983) reportan diferentes tablas y figuras auxiliares en el cálculo de aforos de flujo en tuberías bajo el

empleo de dispositivos tipo Venturi. Aquí cabe destacar que ambos presentan valores muy similares de coeficientes de descarga. Por su parte, la USDI (1979) y la IOS (1991) reportan la estandarización de procedimientos que deben satisfacerse para la correcta medición de flujos con aforadores tipo Venturi.

Tradicionalmente, para el cálculo de los parámetros característicos del flujo, y debido a la complejidad de los fenómenos hidráulicos, era necesario discretizar el sistema de ecuaciones dejando fijas ciertas características del fluido, para después aplicar las ecuaciones generales de balance de masa y energía a un volumen finito del flujo y, en particular, plantear la ecuación que describiese su movimiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos, esta descripción resultaba puntual y no permitía la representación espacial del sistema. Este inconveniente ha sido resuelto con la dinámica de fluidos computacional (DFC) (Anderson, 1995). La herramienta DFC permite la visualización espacial del fenómeno en estudio, al obtener una solución numérica a los problemas de movimiento de fluidos, con un alto grado de precisión una vez validado el modelo planteado con datos experimentales, lo cual ha permitido una mejor comprensión de los fenómenos hidráulicos y de la mecánica de fluidos en general.

En realidad, tanto la DFC y el análisis experimental son métodos complementarios, resaltando que el empleo de la DFC reduce la cantidad necesaria de análisis experimental en laboratorio. Por ejemplo, en ingeniería hidráulica, se ha hecho investigación en el análisis de válvulas (Davies & Stewart, 2002), bombas (Zheng, 2000) o en la aplicación de canales abiertos (Wu, Rodi, & Wenka, 2000). En agricultura protegida, el análisis con DFC ha sido empleado para modelar el clima al interior del invernadero y con ello plantear estrategias para su gestión mediante sistemas auxiliares de refrigeración o calefacción (Flores-Velázquez, Mejía, Rojano, & Montero, 2011). En sistemas de riego presurizado es posible encontrar aplicaciones para el análisis de emisores de riego (Palau, Arviza, & Frankel, 2004) y dispositivos de inyección de fertilizantes

(Manzano & Palau, 2005).

Diversos autores han simulado el comportamiento hidráulico de vertedores y aforadores usando técnicas *DFC*, después de validarlos con datos experimentales. Gharahjeh, Aydin y Altan-Sakarya (2015) simularon el flujo de agua para un vertedor de cresta delgada, mientras que Naghavi, Esmaili, Yazdi y Vahid (2011) simularon un vertedor circular; Temeepattana-pongsa, Merkley, Barfuss y Smith (2014) validaron un modelo *DFC* y ajustaron ecuaciones algebraicas genéricas para una diversidad de aforadores sin garganta "Cutthroat flume", a partir de datos simulados de carga-gasto bajo condiciones de descarga libre y ahogada.

El planteamiento de la *DFC* se fundamenta en la solución de las ecuaciones que definen el movimiento de un fluido, combinando dinámica de fluidos, programación y métodos numéricos. En general, el movimiento de un fluido está basado principalmente en procesos físicos, que pueden ser planteados en términos matemáticos como una serie de ecuaciones en derivadas parciales, mismas que representan numéricamente las componentes de un flujo. Si se considera un fluido incompresible (agua) dentro del dominio  $\Omega \subset R^n$  durante un intervalo de tiempo  $[0, t]$ , la dinámica del flujo en cada punto  $(x, y)$  en un instante específico  $t$  está determinado por las variables de estado, densidad de masa  $\rho(x, t)$ , el campo de velocidad  $u(x, t)$  y su energía  $e(x, t)$ . El planteamiento diferencial se deriva de la aplicación de los principios de conservación de masa, momento y energía sobre un volumen de control, características incluidas en las ecuaciones de Navier-Stokes(N-S), a partir del cual es deducida en su forma diferencial. Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento están expresadas por las ecuaciones (3) y (4), las cuales se generaliza para  $x, y, z$  (White, 1994; Çengel & Cimbala, 2012):

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Cantidad de movimiento en  $x$ :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Donde  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}$  es la deformación volumétrica del volumen finito analizado ( $V = uvw$ ) con respecto a los ejes  $x, y$  y  $z$ ;  $\rho$  es la densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $v$  es la viscosidad cinética  $\left( v = \frac{\mu}{\rho} \right)$  cuando  $\mu$  es la viscosidad dinámica;  $t$  es el tiempo (s), y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

El objetivo del presente trabajo consiste en aportar información sobre el funcionamiento de un dispositivo Venturi bajo criterios de ecuaciones deducidas en forma diferencial e integral, partiendo de un dispositivo con características específicas y datos experimentales de laboratorio reportados por Sotelo-Ávila (1979), así como comparar los resultados experimentales con los obtenidos por simulación usando *DFC* para determinación de parámetros de funcionamiento e instalación en sistemas de riego.

## Materiales y métodos

### Venturi en estudio

El dispositivo descrito por Sotelo-Ávila (1979) corresponde al estudio reportado por Smetana (1957) y esquematizado en la figura 1. Tiene un diámetro en la zona inicial de  $D_1 = 0.15$  m y un diámetro en la zona de estrangulamiento de  $D_2 = 0.075$  m. La transición entre estos diámetros en la zona de contracción es de forma cónica. La zona de expansión consta de una ampliación que va desde el final de la zona de contracción hasta alcanzar de nuevo el valor del diámetro  $D_1$ . Según Sotelo-Ávila (1979), para su análisis se propuso un ángulo ( $\theta$ ) de  $2.5$  a  $7^\circ$  como determinante de la longitud necesaria de la ampliación de salida y con ello lograr normalizar el flujo. El dato en la deflexión del manómetro diferencial entre los diámetros  $D_1$  y  $D_2$  es de

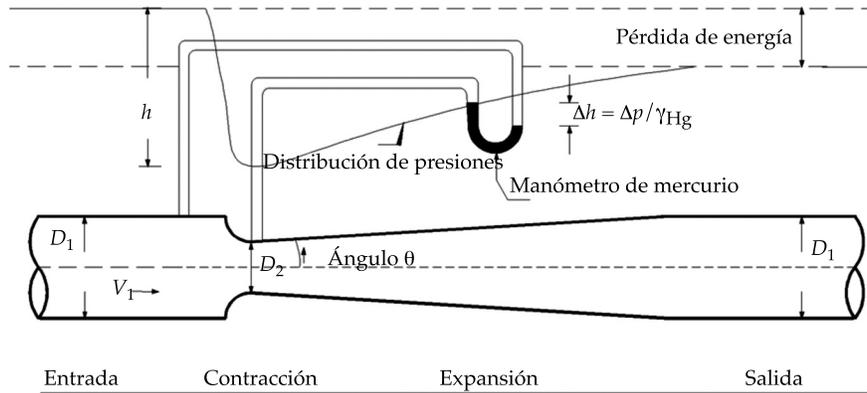


Figura 1. Venturímetro en una tubería con flujo a presión.

$\Delta h = 0.15$  m de Hg, tal como se muestra en la figura 1; siendo el peso específico del mercurio  $\gamma_{Hg} = 13\,595 \text{ kg m}^{-3}$  y la viscosidad cinemática del agua a  $10^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 0.013 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Las principales variables que se estudian en este trabajo, por su influencia en el funcionamiento del aforador Venturi, son las corrientes cinéticas. En efecto, un diseño impropio de las zonas de entrada o salida se vería reflejado por una velocidad de flujo excesiva, la generación de zonas muertas o bien turbulencias. Según Webber (1971), el diámetro de la contracción  $D_2$  debe ser lo suficientemente grande como para que la presión no caiga por debajo de dos metros de columna de agua con respecto a la presión absoluta, pues para esta presión hay tendencia a la formación de burbujas de aire, existiendo el peligro de cavitación en las paredes del dispositivo.

El Venturi mostrado en la figura 1 cuenta con un manómetro diferencial de mercurio.

La observación experimental en laboratorio proporciona el valor de  $\Delta h$  y con empleo de la ecuación (5) (Sotelo-Ávila, 1979) es posible determinar el gasto ( $Q$ ):

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2g\Delta h \left( \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma} - 1 \right)} \quad (5)$$

Donde se denota por  $A_2$  al área de la sección contraída ( $\text{m}^2$ );  $g$ , la aceleración de la gravedad ( $\text{m s}^{-2}$ );  $\gamma_{Hg}$  como peso específico del mercurio ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\gamma$ , como peso específico del agua ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\Delta h$ , como la deflexión del manómetro de mercurio (m), y  $C_d$  como el coeficiente de descarga (adimensional).

En el cuadro 1 se indican las características geométricas del aforador reportado por Sotelo-Ávila (1979) y de acuerdo con Smetana (1957), las longitudes de entrada y salida son mayores que cuatro veces el valor de  $D_1$ .

Cuadro 1. Características geométricas del Venturi en estudio (Sotelo-Ávila, 1979).

Diámetro (m)		Relación	Área ( $\text{m}^2$ )		Relación	Contracción		Longitud (m)
Entrada = $D_1$	Estrangulamiento = $D_2$	$D_2 / D_1$	$A_1$	$A_2$	$m = A_1 / A_2$	Radio (m)	Ángulo (grados)	Expansión
0.150	0.075	0.50	0.01767	0.0044	0.25	0.0375	3.5	0.6131

Luego entonces se busca determinar el gasto a partir de los resultados experimentales para el aforador Venturi con las características ya señaladas. Para ello, con la información reportada por Sotelo-Ávila (1979), se consideró como valor de velocidad inicial  $V_i = 1.533 \text{ m s}^{-1}$ ; como límite de estrangulamiento un valor de  $m = 0.25$ , con los cuales se mantenían valores del número de Reynolds mayores que  $1 \times 10^5$ . Cabe resaltar que para la instalación de los aforadores Venturi en sistemas de riego, los parámetros de operación importantes que deben conocerse son: la pérdida de energía total generada en el dispositivo y la presión absoluta en la contracción. De acuerdo con Webber (1971), se recomienda realizar la medición de la línea de energía desde una distancia de  $4D_1$  antes de la contracción hasta  $4D_1$  después de la ampliación, justo cuando el flujo se comporte como un fluido totalmente desarrollado.

### Dinámica de fluidos computacional (DFC)

Tal y como fue mencionado, herramientas numéricas como la DFC han resultado eficaces en el diseño y simulación de flujos con base en una modelación a través de métodos aproximados de solución de las ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos (ecuaciones (1), (3) y (4)) y esquemas numéricos de solución (volumen finito), con sus correspondientes algoritmos de procesamiento. Así, la DFC sigue una serie de pasos que pueden englobarse en tres grandes etapas:

a) **Preproceso.** Consiste en la generación de la representación digital en tres dimensiones

de la geometría del modelo físico del dispositivo en estudio (figura 2a). Este paso es indispensable para definir el mallado de análisis (figura 2b), en el cual el dominio computacional es subdividido en un número finito de elementos prismáticos, donde las ecuaciones de conservación de energía, masa y cantidad de movimiento lineal serán aplicadas.

b) **Proceso.** Una vez generada la geometría, se importa al procesador, donde se realiza la adjudicación de valores a las características de frontera (figura 2c), entrada lado izquierdo y salida lado derecho; de igual manera, se establecen las hipótesis correspondientes respecto al Solver a utilizar, para conseguir la solución, basado en las ecuaciones de Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation y Pressure-Based, indicando que se resuelve por separado la ecuación de Momentum para  $u, v, w$ , seguida de la ecuación de la energía; después se solventa el modelo de turbulencia  $K-\epsilon$ , modelo más ampliamente utilizado e incorporado al *software DFC* los atributos del procedimiento, se indica en las consideraciones (cuadro 2).

c) **Postproceso.** Los resultados se muestran de manera gráfica y escalar (figura 2d). Cabe señalar que en el presente trabajo, la herramienta de DFC utilizada ha sido el programa comercial *ANSYS Workbench v. 14.5* (Fluent, 1998), y cuenta con las interfaces necesarias para la generación de geometría del dispositivo (*Design model*), el mallado (*Meshing*) y el simulador numérico correspondiente (*Fluent*).

Cuadro 2. Condiciones de inicio e hipótesis de cálculo.

Hipótesis de simulación	
Solver	Pressure-Based, Segregado
Formulación	Implícita
Condición de tiempo	Estacionario
Modelo de turbulencia	K-ε de dos ecuaciones
Escenarios de simulación	
Velocidad del fluido	Constante (velocidad)
Escenarios de simulación	

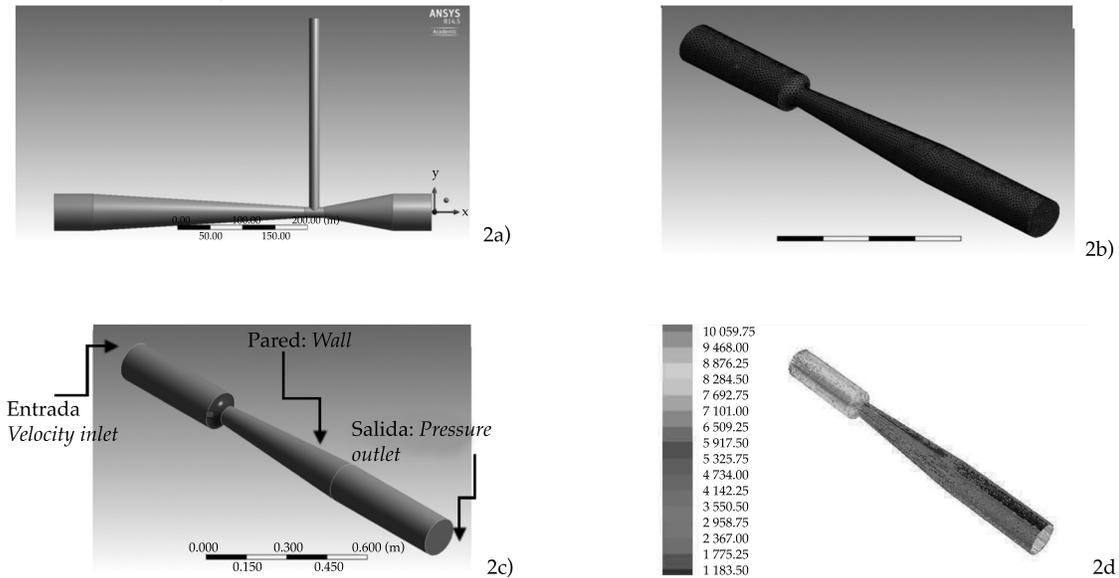


Figura 2. Construcción del modelo computacional por etapas.

## Resultados y discusión

### Método de revisión para el Venturi probado en laboratorio

De acuerdo con la metodología propuesta por Sotelo-Ávila (1979) y la información de laboratorio sobre la velocidad de inicio  $v_i = 1.533 \text{ m s}^{-1}$ , se determinó el coeficiente de descarga  $C_d$  (figura 3). Este valor se obtuvo con base en la relación del estrangulamiento  $m = 0.25$  (dato, cuadro 1) y del coeficiente de descarga  $C_d = 1.009$ . La observación en laboratorio sobre la altura de columna de mercurio en la deflexión del manómetro diferencial reportado por Sotelo-Ávila (1979) es igual a  $\Delta h = 0.15 \text{ m}$ , y con la ecuación (5) se determinó el gasto  $Q = 0.02698 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Así, con la ecuación de conservación de masa, se determinó la velocidad en la sección de contracción  $V_2 = 6.13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Por último, con la ecuación del número de Reynolds  $Re = \frac{D_2 v_2}{\nu}$ , se obtuvo un valor de  $Re = 3.54 \times 10^5$ , con lo cual se cumplió con la recomendación de ser mayor que un valor de  $Re = 1 \times 10^5$ .

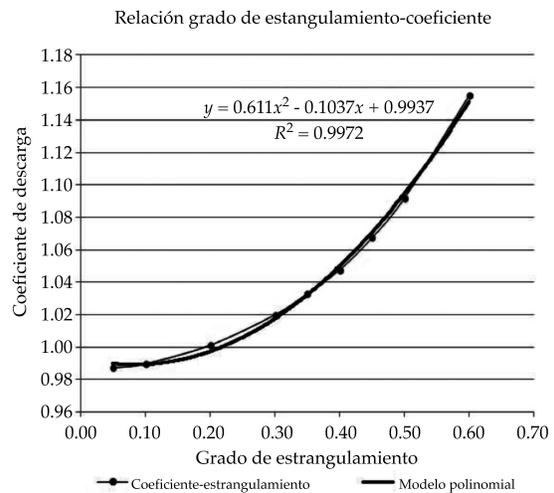


Figura 3. Coeficiente  $C_d$  con relación al grado de estrangulamiento  $m$ .

La figura 3 sustituye a las reportadas por Smetana (1957). Esta gráfica tiene por objeto mostrar el modelo matemático que representa la relación existente entre el grado de estrangulamiento ( $m$ ) y el coeficiente de descarga ( $C_d$ ),

destacando que el modelo encontrado cuenta con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9972$ .

Con base en el procedimiento experimental convencional descrito, se observa que cada vez que se efectúe algún cambio en la velocidad inicial en el punto de entrada al Venturi, es necesario medir el cambio correspondiente en la altura de la columna del manómetro diferencial de mercurio y con ello poder calcular el gasto en las nuevas condiciones del flujo. Es decir, el gasto está relacionado con el valor  $\Delta h$  de la columna del manómetro de mercurio, lo que conduce a una sola ecuación, pero con dos incógnitas. Por lo anterior, con este procedimiento experimental es necesario conocer la velocidad inicial (en la entrada al dispositivo), el valor de  $\Delta h$  del manómetro diferencial y el valor de la relación de estrangulamiento  $m$ , para luego obtener de forma gráfica el valor correspondiente del coeficiente de descarga  $C_d$  y por último calcular el valor del gasto. El principal inconveniente del procedimiento experimental descrito consiste en que cualquier cambio en las condiciones del flujo requiere del montaje experimental y de los datos observados.

#### Método de revisión para el Venturi con DFC

La figura 4 muestra los resultados obtenidos por simulación con DFC para la magnitud de los vectores de velocidad del flujo para cada punto (identificados por círculos) en las secciones de las zonas de entrada al Venturi en el punto  $D_1$ , de contracción, de ampliación y de salida del dispositivo. Las magnitudes de velocidad están representadas por una escala gráfica de colores. En la figura 5 se muestran los valores de velocidad y presión puntuales del flujo y se relacionan con su ubicación en la sección del tubo en la zona de entrada; es decir, un valor nulo de velocidad en las paredes del dispositivo hasta un valor máximo de  $V = 1.8 \text{ m s}^{-1}$  en el centroide de la sección transversal del tubo y valores de presión de  $P = 78.7 \text{ cm de Hg}$  en la pared del tubo y de  $P = 78.4 \text{ cm de Hg}$  en el centroide de la sección transversal del tubo. Con esta información se determinó la velocidad y

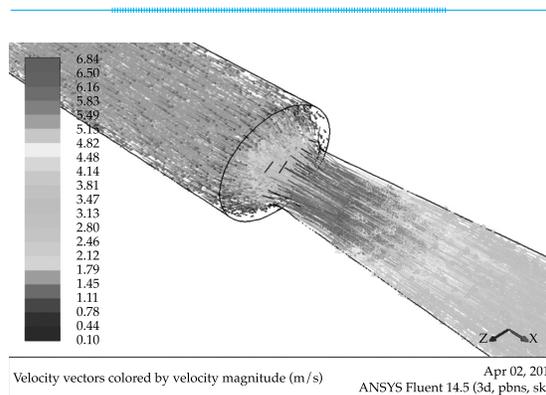


Figura 4. Distribución de velocidades.

presión medias del flujo en el punto de entrada con ayuda de las ecuaciones (6) y (7):

$$V_m = \frac{V_1 A_1 + V_2 A_2 + \dots + V_n A_n}{A_{\text{total}}} \quad (6)$$

Donde  $V_m$  = velocidad media del flujo en la sección;  $V_n$  = velocidad puntual en el círculo 1 hasta  $n$ ;  $A_n$  = área en el círculo 1 hasta  $n$ ;  $A_{\text{total}}$  = área total de la sección transversal del tubo:

$$P_m = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + \dots + P_n A_n}{A_{\text{total}}} \quad (7)$$

Donde  $P_m$  = presión media del flujo en la sección;  $P_n$  = presión puntual en el círculo 1 hasta  $n$ ;  $A_n$  = área en el círculo desde 1 hasta  $n$ ;  $A_{\text{total}}$  = área total de la sección transversal del tubo.

Este procedimiento se repite para las secciones correspondientes a las zonas de contracción y salida del dispositivo. Los valores de velocidad promedio de flujo presentes en las zonas del dispositivo estudiado se presentan en el cuadro 3.

Al comparar los valores reportados experimentalmente por Sotelo-Ávila (1979) y los obtenidos mediante DFC (cuadro 3), con base en el cálculo del error relativo absoluto  $|e_r|$  (ecuación (8)), se observa que son prácticamente iguales. Es decir, una velocidad media en la zona de

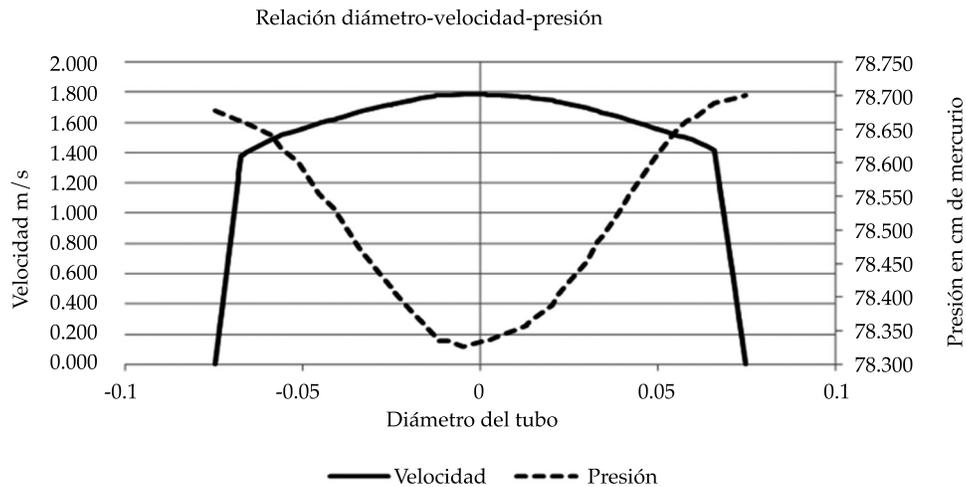


Figura 5. Perfiles de velocidades y presión (zona de entrada).

Cuadro 3. Resultados de la simulación con DFC del Venturi experimental.

Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
Presión media			Velocidad media	Presión			Velocidad media	Presión media			Velocidad media
Pascal	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>		Pascal	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>		Pascal	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>	
104 658	78.5	1.07	1.55	86 639	65	0.88	5.55	101 326	76	1.033	1.52

entrada ( $1.53 \text{ m s}^{-1}$ ;  $|e_r| = 0.013$ ), un gasto ( $0.027 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , por conservación de masa);  $|e_r| = 0.013$ ) y una presión en el manómetro diferencial, 15 cm de Hg (diferencia de presión en cm de Hg entre la zona de entrada hasta la zona de contracción;  $|e_r| = 0.100$ ):

$$|e_r| = \left| \frac{\text{valor observado} - \text{valor simulado}}{\text{valor observado}} \right| \quad (8)$$

Una vez validado el modelo construido por DFC, se simularon ocho escenarios adicionales, con velocidades medias desde  $0.028$  hasta  $2.264 \text{ m s}^{-1}$ , correspondientes a una variación de gasto desde  $0.005$  hasta  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En el cuadro 4 se reportan los resultados de los ocho escenarios simulados (E2 a E9), donde la presión se expresa

en pascales, cm de Hg y en  $\text{kg cm}^{-2}$ ; así como la velocidad media en las zonas de entrada, contracción y salida, en  $\text{m s}^{-1}$ .

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones para el rango de gasto de operación del Venturi ( $Q = [0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}; Q = 0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}]$ ), y reportados en el cuadro 4, se ha construido un modelo matemático de tipo regresivo entre las variables gasto del Venturi ( $Q$  en  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) y pérdida de carga en la zona de contracción del dispositivo ( $\Delta h$  en cm de Hg). Este modelo está representado por una ecuación de segundo grado y cuenta con un coeficiente de determinación  $R^2 = 1$  (figura 6). Lo anterior es totalmente congruente con la génesis del fenómeno hidráulico local en la sección de contracción, pues la caída de presión se debe a un cambio drástico de velocidad del flujo y donde

Cuadro 4. Resultados de las simulaciones con DFC para los ocho escenarios propuestos.

Versión	Zona de entrada				Zona de contracción				Zona de salida			
	Presión			Velocidad	Presión			Velocidad	Presión			Velocidad
	Pascales	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>	media m s <sup>-1</sup>	Pascales	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>	media m s <sup>-1</sup>	Pascales	cm de Hg	kg cm <sup>-2</sup>	media m s <sup>-1</sup>
E2	101 478	76.1	1.04	0.285	100 828	75.6	1.03	1.042	101 325	76.0	1.033	0.258
E3	101 829	76.4	1.04	0.577	99 319	74.5	1.01	2.082	101 323	76.0	1.033	0.569
E4	102 419	76.8	1.04	0.866	96 791	72.6	0.99	3.122	101 322	76.0	1.033	0.867
E5	103 223	77.4	1.05	1.140	93 237	69.9	0.95	4.161	101 327	76.0	1.033	1.126
E6	104 206	78.2	1.06	1.424	88 908	66.7	0.91	5.164	101 321	76.0	1.033	1.454
E7	105 397	79.1	1.08	1.725	82 770	62.1	0.84	6.202	101 326	76.0	1.033	1.690
E8	106 740	80.1	1.09	1.993	76 394	57.3	0.78	7.278	101 320	76.0	1.033	2.045
E9	108 301	81.2	1.10	2.268	69 015	51.8	0.70	8.316	101 319	76.0	1.033	2.234

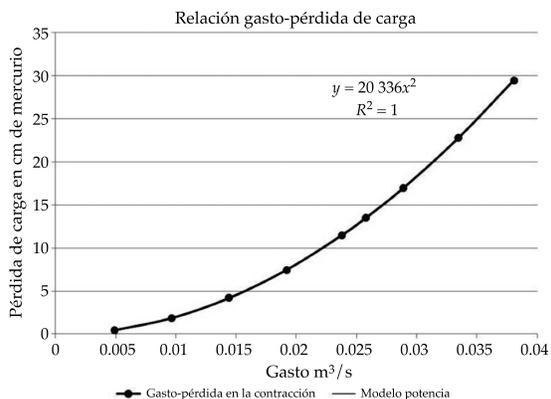


Figura 6. Determinación de las pérdidas en la sección contracción a partir del valor del gasto.

las pérdidas locales por fricción también están en función de la velocidad del flujo. Con este modelo se reduce la incertidumbre, al eliminar el requerimiento de selección del coeficiente de descarga  $C_d$  en el cálculo del gasto ante cualquier otra velocidad inicial dentro del rango modelado. Es decir, con ello se ha simplificado el problema a una ecuación con una sola incógnita. Por ejemplo, usando la gráfica de la figura 6 y considerando el diámetro del tubo del caso de estudio ( $D_1 = 0.15$  m), si se tiene una lectura en el manómetro diferencial de presión de

$\Delta h = 0.15$  m de Hg, se obtiene un gasto  $Q = 0.027$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, que corresponde a una velocidad de 1.53 m s<sup>-1</sup>.

Por otro lado, con la información proporcionada por las simulaciones con DFC, es posible construir un modelo matemático adicional que facilite la estimación de la pérdida total de carga ocurrida en el aforador Venturi para el rango de gastos estudiados. En efecto, en forma equivalente al caso anterior, se considera el valor de caída de presión entre la sección inicial y final del dispositivo, relacionando este diferencial de presión con el gasto de entrada al Venturi. El modelo encontrado presenta las pérdidas de presión ( $\Delta h$ ) en cm de columna de H<sub>2</sub>O versus el gasto ( $Q$  en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) mostrado por la figura 7, y cuenta con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior a 0.99. Cabe resaltar que este tipo de modelo no es posible construirlo cuando sólo se cuenta con estudios convencionales de experimentación en laboratorio.

Así, por ejemplo, utilizando el modelo de la figura 7, para un gasto máximo de 0.040 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> se obtiene una pérdida de carga total en la longitud de Venturi de 0.075 kg cm<sup>-2</sup>. Esta pérdida total de carga está considerada entre la distancia formada por  $\pm 4D_1$ , a partir de la sección de contracción y donde  $D_1$  es la sección de entrada al dispositivo.

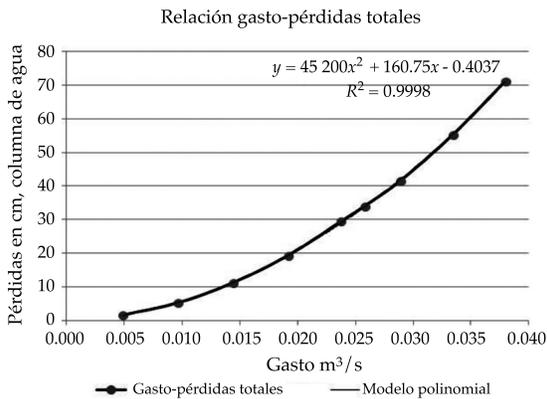


Figura 7. Determinación de las pérdidas totales ocurridas en el dispositivo Venturi entre las secciones inicial y final.

Finalmente se resaltan otros tres resultados importantes que sólo pueden derivarse con base en la simulación efectuada con *DFC*: a) la carga hidráulica de funcionamiento en la contracción del Venturi deberá respetar una presión mínima disponible de  $0.4 \text{ kg cm}^{-2}$  para el gasto máximo de  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y con ello satisfacer la condición sugerida por Webber (1971) para evitar la generación del fenómeno transitorio de cavitación; b) por la condición anterior, el gasto límite superior para las dimensiones y condiciones de trabajo es precisamente el gasto de  $0.040 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; y c) la pérdida de carga total para la longitud de Venturi es de  $0.075 \text{ kg cm}^{-2}$  para  $Q_{\text{máx}} = 0.40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

## Conclusiones

En este trabajo se modeló, con ayuda de la dinámica de fluidos computacional, el funcionamiento de un dispositivo de medición de flujo tipo Venturi. La información experimental obtenida en laboratorio y reportada por Sotelo-Ávila (1979) facilitó la construcción del modelo matemático y su validación, obteniéndose una muy buena congruencia entre los valores experimentales y los simulados de velocidad del flujo, gasto y caída de presión en el manómetro diferencial. La modelación con *DFC* fue realizada con el empleo del programa *Fluent*, el cual utiliza el método del volumen finito y

se encuentra inserto en el *software* comercial *ANSYS Workbench v. 14.5*.

Con base en lo aquí analizado es posible enumerar las conclusiones siguientes:

1. Existe una congruencia altamente satisfactoria entre los resultados medidos en forma experimental en laboratorio y los encontrados por simulación numérica con *DFC*.

2. Los resultados obtenidos de los escenarios hidráulicos modelados con *DFC* han permitido comprender con mayor detalle el funcionamiento del Venturi y la determinación de modelos matemáticos de tipo regresivo sobre variabilidad de sus características de operación. Los modelos encontrados a partir de los resultados con *DFC* permiten, con un alto nivel de precisión, la determinación de condiciones de operación para situaciones no experimentadas ni simuladas.

3. En particular, con el procedimiento aquí propuesto, ha sido posible modelar, a través de una ecuación de segundo grado, la relación gasto *versus* pérdida de carga en la sección de contracción del Venturi y con ello eliminar la incertidumbre en la elección del coeficiente de descarga  $C_d$ . Igualmente fue modelada la relación gasto *versus* pérdida de carga total en el dispositivo Venturi, característica difícil de modelar bajo un contexto tradicional de experimentación en laboratorio.

4. La modelación con *DFC* puede ser usada para el diseño y la definición de dimensiones óptimas de un Venturi, considerando diferentes tamaños, formas, condiciones de funcionamiento y materiales, además de poder determinar las condiciones límite que ocasionarían la presencia del fenómeno transitorio de cavitación en las paredes del Venturi.

Por último, es importante resaltar que la modelación con *DFC* y la experimentación en laboratorio son métodos complementarios de análisis de fenómenos hidráulicos, y su combinación es la mejor estrategia para el encuentro de una solución técnica, práctica, económica y confiable, en particular en el caso de flujómetros tipo Venturi y su instalación en sistemas de riego.

## Referencias

- Anderson, J. D. Jr. (1995). *Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications* (328 pp.). New York: McGraw-Hill.
- ASME (1983). *Fluid Meters, their Theory and Application* (6th edition). In H. S. Bean (Ed.). New York: American Society of Mechanical Engineers, Research Committee on Fluid Meters.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos-fundamentos y aplicaciones* (978 pp.). (2a edición). México, DF: McGraw Hill.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Davies, J. A., & Stewart, M. (2002). *Predicting Globe Control Valve Performance. Part I. CFD, Modeling*. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 124(3), 772-777.
- Flores-Velazquez, J., Mejia, E., Rojano, A., & Montero, J. (2011). Análisis del clima en un invernadero con ventilación mecánica, *Agrociencia*, 45(5), 545-560.
- Fluent (1998). *Fluent, v. 5*. Sheffield, UK: Fluent, Europe Ltf.
- Gharahjeh, S., Aydin, I., & Altan-Sakarya, A. B. (2015). Weir Velocity Formulation for Sharp-Crested Rectangular Weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 50-56.
- IOS (1991). *Measurement of Flow by Means of Pressure Differential Devices*. Geneva: International Organization for Standardization ISO 5167-1.
- Levy, E. (1957). *Mecánica de los fluidos* (266 pp.). México, DF: Instituto de ingeniería, UNAM.
- Manzano, J., & Palau, G. (2005). *Hydraulic Modeling of Venturi injector by Means of CFD*. Tampa, USA: ASAE International Meeting.
- Naghavi, B., Esmaili, K., Yazdi J., & Vahid, F. K. (2011). An Experimental and Numerical Study on Hydraulic Characteristics and Theoretical Equations of Circular Weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(12), 1327-1334.
- Palau, G., Arviza, J., & Frankel, S. (2004). *Tree-Dimensional Control Valve with Complex Geometry: CFD Modeling and Experimental Validation*. 34TH AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. IN AIAA-2004- Portland, USA.
- Ranald, V. G. (1978). *Mecánica de fluidos e Hidráulica* (2a edición). México, DF: McGraw-Hill.
- Smetana J. (1957). *Hidráulika*. Praga: Ceskoslovenka Akademie, VED. Referencia de Sotelo-Ávila, G. (1995). *Hidráulica general* (277 pp.). México, DF: Limusa.
- Sotelo-Ávila, G. (1979). *Hidráulica general* (277 pp.). México, DF: Limusa.
- SARH (1973). *Proyecto de Zonas de Riego* (567 pp.). México, DF: Dirección de Proyectos de Irrigación, Departamento de Canales.
- Temeepattanapongsa, S., Merkle, G. P., Barfuss, S. L., & Smith, B. (2014). Generic Unified Rating for Cutthroat Flumes. *Irrigation Science*, 32(1), 29-40.
- USDI (1979). *Water Measurement Manual* (3rd edition). Denver: US Department of Interior, Bureau of Reclamation, US Govern Printing Office.
- Webber, N. B. (1971). *Fluid Mechanics for Civil Engineers* (330 pp.). London: Chapman & Hall.
- White, F. (1994). *Fluid Mechanics* (736 pp.) (3rd edition). New York: McGraw Hill, Inc.
- Wu, W., Rodi, W., & Wenka, T. (2000). 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 126(1), 4-15.
- Zheng, G. (2000). Applications of CFD Tools to Design and Development of Pumps. *Turbomachinery*, 28(11), 649-656.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias

Dr. Jorge Flores Velazquez

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Dr. Roberto Mercado Escalante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso

62550 Jiutepec Morelos, México

Teléfono: +52 (777) 3 29 36 00

Fax: +52 (777) 319 4220

mic@tlaloc.imta.mx

jorge\_flores@tlaloc.imta.mx

wojeda@tlaloc.imta.mx

rmercado@tlaloc.imta.mx

Dr. Carlos Díaz-Delgado

Universidad Autónoma del Estado de México

Centro Interamericano de Recursos del Agua

Facultad de Ingeniería

Carretera Toluca Atlacomulco km 14.5, Unidad San Cayetano

50200 Toluca, Estado de México, México.

Teléfono: +52 (722) 2965 550

cdiazd@uaemex.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

# Ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG con momentos $L$ depurados (1,0)

• Daniel Francisco Campos-Aranda •

Profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

\*Autor de correspondencia

## Resumen

Campos-Aranda, D. F. (julio-agosto, 2015). Nota técnica. Ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG con momentos  $L$  depurados (1,0). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 153-167.

Los momentos estadísticos han sido utilizados para caracterizar las distribuciones de probabilidad, así como las muestras de datos observados. En este trabajo se describe someramente la teoría de los momentos  $L$  y de los llamados momentos  $L$  depurados (1,0), que son capaces de reducir la influencia del valor más bajo de la muestra, para mejorar el ajuste y obtener predicciones extremas más confiables. Se citan las ecuaciones, recientemente expuestas en la literatura estadística, que permiten estimar los parámetros de ubicación ( $\mu$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $k$ ) de las tres funciones de distribución de probabilidades más utilizadas en los análisis de frecuencias de datos hidrológicos extremos, que son la General de Valores Extremos (GVE), la Logística Generalizada (LOG) y la Pareto Generalizada (PAG). Estas tres distribuciones se ajustaron con los métodos de momentos  $L$  y momentos  $L$  depurados (1,0), a los 21 registros de gasto máximo anual disponibles en la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa). Se evaluó la calidad de cada ajuste a través del error estándar. El análisis de los resultados indica que la distribución PAG conduce a los menores errores de ajuste en trece registros con el método de los momentos  $L$  depurados (1,0) y en el resto con el de momentos  $L$ . Las conclusiones sugieren la aplicación sistemática de los tres modelos probabilísticos utilizados y del método de los momentos  $L$  depurados (1,0), como una versión avanzada del procedimiento de los momentos  $L$ , actualmente de uso universal.

**Palabras clave:** momentos  $L$ , momentos  $L$  depurados (1,0), distribuciones de probabilidad GVE, LOG y PAG, error estándar de ajuste, Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa).

## Abstract

Campos-Aranda, D. F. (July-August, 2015). Technical Note. Fitting of GPA, GLO and GEV Distributions with Trimmed L-moments (1,0). *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 153-167.

Statistical moments have been used to characterize probability distributions and samples of observed data. This work briefly describes the theory of L-moments and trimmed L-moments (1,0), which can reduce the influence of the lowest value in a sample, in order to improve the fit and obtain more reliable extreme predictions. Recent equations found in the statistical literature that estimate the location, scale and shape of the probability distribution functions are cited, which are often used to analyze the frequencies of extreme hydrological data. These include the General Extreme Values (GEV), Generalized Logistic (GLO) and Generalized Pareto (GPA) equations. These three distributions were fitted with the methods of L-moments and trimmed L-moments (1,0) to 21 annual maximum flow registries from Hydrological Region No. 10 (Sinaloa). The quality of each fit was evaluated based on the standard error. The analysis of the results indicate that the GPA distribution provides the smallest fitting errors for 13 registries using the trimmed L-moments (1,0) and for the rest of the registries using L-moments. The conclusions suggest that the three probabilistic models studied can be applied with the trimmed L-moments (1,0) as an advanced version of the L-moments procedure which is universally used.

**Keywords:** L-moments, trimmed L-moments (1,0), probability distributions GEV, GLO and GPA, standard error of fit, Hydrological Region No. 10 (Sinaloa).

Recibido: 05/03/15

Aceptado: 11/05/15

## Introducción

Los momentos estadísticos han sido usados de modo tradicional para caracterizar las *funciones de distribución de probabilidades* (FDP), o bien las series de datos observados. Los momentos  $L$ , de creación más reciente, son combinaciones lineales de los valores esperados de los estadísticos de orden (Asquith, 2011), comparables a los momentos convencionales, pero tienen menores varianzas muestrales y son más robustos a la influencia de los valores dispersos o extremos (*outliers*). De manera análoga a los momentos estadísticos, los momentos  $L$  de orden uno a cuatro, también caracterizan, respectivamente, localización, escala, asimetría y curtosis.

De acuerdo con Karvanen (2006), el concepto de los momentos  $L$  se originó hacia finales de los años sesenta, con varios resultados desvinculados sobre combinaciones lineales de los estadísticos de orden, que culminan con el trabajo de Greenwood, Landwehr, Matalas y Wallis (1979). Hosking (1990) unifica la teoría de los momentos  $L$  y proporciona guías para sus aplicaciones prácticas, las cuales se han realizado en las disciplinas de la hidrología, meteorología, control de calidad e ingeniería civil. Karvanen (2006) también cita avances recientes en los aspectos teóricos, por ejemplo: (1) Mudholkar y Hutson (1998) reemplazan los valores esperados de los estadísticos de orden por funcionales que inducen estimadores rápidos como la mediana, el estimador Gastwirth y la media truncada; estos análogos, llamados momentos  $LQ$ , siempre existen y son simples de evaluar; (2) Elamir y Seheult (2003) introducen una extensión natural de los momentos  $L$ , llamados *momentos depurados*; se designan momentos  $TL$  de *Trimmed*, que significa depurado, truncado o cortado; (3) también Elamir y Seheult (2004) derivan la estructura exacta de la varianza de muestreo de los momentos  $L$ .

Por otra parte, el análisis de frecuencias de datos hidrológicos, crecientes, lluvias máximas y sequías, busca principalmente valores de éstos, asociados con bajas probabilidades de excedencia. Tales magnitudes, llamadas *predicciones*,

se obtienen con base en el ajuste de una FDP a la muestra de datos disponible. Entre las FDP que más se han utilizado en estos estudios y que incluso su aplicación ha sido establecida bajo precepto, se tienen los modelos probabilísticos: General de Valores Extremos (GVE), Logística Generalizada (LOG) y Pareto Generalizada (PAG). Estas FDP han sido adoptadas en los análisis de frecuencias debido a su extremo derecho grueso o denso (*heavy tail*), que es la porción donde se estiman las predicciones (El Adlouni, Bobée, & Ouarda, 2008).

El objetivo de este trabajo consiste en exponer con detalle los aspectos teóricos asociados con los llamados *momentos  $L$  depurados*, en especial de aquellos que eliminan el valor más bajo de la serie o muestra de datos, y su aplicación en el ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG. Lo anterior se complementa con un contraste numérico en los 21 registros disponibles de crecientes anuales de la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa), que no tienen régimen de escurrimientos afectado por embalses y que cuentan con más de 20 datos, según la información actualizada hasta el año 2011, proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

## Resumen de la teoría operativa

### Definición poblacional de los momentos $L$

Sea  $X$  una variable aleatoria y sea  $X_{j:n}$  uno de sus estadísticos de orden, es decir, una variable aleatoria distribuida como el  $j$ -ésimo elemento más pequeño de una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , tomada de la distribución de  $X$ , entonces, los momentos  $L$  de  $X$  son las cantidades siguientes (Hosking, 1990):

$$\lambda_1 = E(X_{1:1}) \quad (1)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} E(X_{2:2} - X_{1:2}) \quad (2)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{3} E(X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}) \quad (3)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4} E(X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}) \quad (4)$$

cuya expresión general es:

$$\lambda_r = \frac{1}{r} \sum_{j=0}^{r-1} (-1)^j \binom{r-1}{j} E(X_{r-j:r}) \quad r = 1, 2, \dots \quad (5)$$

En la ecuación (5), el segundo paréntesis es un cociente de factoriales que define el número de combinaciones posibles de los  $m$  términos, tomando  $q$  en cada arreglo; su expresión general es (Bhattacharai, 2004; Asquith, 2011):

$$\binom{m}{q} = \frac{m!}{q!(m-q)!} \quad \text{para } q \leq m \quad (6)$$

Por convención  $0! = 1$ . Recordar que la función factorial Gamma es  $\Gamma(m+1) = m!$ , la cual se puede estimar con la fórmula de Stirling (Davis, 1965), que será expuesta posteriormente. Por otra parte, los valores esperados de los estadísticos de orden de la ecuación (5) se estimarán con la expresión (Hosking & Wallis, 1997; Kottegoda & Rosso, 2008; Asquith, 2011):

$$E(X_{r:n}) = \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} \int_0^1 x(F) \cdot F^{r-1} \cdot (1-F)^{n-r} dF \quad (7)$$

siendo  $x(F)$  la función de cuantiles o solución inversa de la función de distribución de probabilidades acumuladas  $F(x) = F$ .

### Momentos L depurados poblacionales y de la muestra

Como ya se indicó brevemente, los momentos  $L$  tienen usos similares a los momentos convencionales, además existen siempre que la media de la distribución exista, aunque algunos momentos de orden superior puedan no existir y son relativamente robustos a los efectos de los valores extremos. Hosking (2007) indica que estas dos ventajas son insuficientes en el manejo de ciertos datos con muchos valores extremos y de FDP que involucran colas muy gruesas (*very heavy tails*), ya que el primer momento puede no existir. Los *momentos L depurados* son generaliza-

ciones que no requieren que exista la media de la FDP de soporte. Se definen de manera general como (Elamir & Seheult, 2003; Hosking, 2007):

$$\lambda_r^{(s,t)} = \frac{1}{r} \sum_{j=0}^{r-1} (-1)^j \binom{r-1}{j} E(X_{r+s-j:r+s+t}) \quad r = 1, 2, \dots \quad (8)$$

siendo  $s$  y  $t$  enteros positivos. El término depurado (*trimmed*), que también puede ser truncado o cortado, es apropiado debido a que la definición de  $\lambda_r^{(s,t)}$  no involucra los valores esperados de los estadísticos de orden de los  $s$  datos o valores más pequeños ni de los  $t$  mayores de la muestra de tamaño  $r + s + t$ ; es decir, les asigna peso cero. Los cocientes de momentos  $L$  depurados  $\tau_r^{(s,t)} = \lambda_r^{(s,t)} / \lambda_2^{(s,t)}$  son medidas adimensionales de la forma de la distribución. Hosking (2007) señala que una cuestión para decidir es el grado de depuración o de corte apropiado y al respecto indica que la inspección de los datos de la muestra puede ayudar en tal selección. De manera reciente, Elamir (2010) encontró que la cantidad de depuración conduce a diferentes varianzas de los estimados; entonces, una selección óptima será la suma mínima de los errores absolutos entre los datos y los estimados, con la FDP ajustada con tales momentos  $L$  depurados.

A partir de una muestra ordenada  $(x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n)$ , los momentos  $L$  depurados  $\lambda_r^{(s,t)}$  pueden ser estimados de manera no sesgada con la expresión siguiente (Elamir & Seheult, 2003; Hosking, 2007):

$$l_r^{(s,t)} = \frac{1}{r} \sum_{i=s+1}^{n-t} \left[ \frac{\sum_{j=0}^{r-1} (-1)^j \binom{r-1}{j} \binom{i-1}{r+s-j-1} \binom{n-i}{t+j}}{\binom{n}{r+s+t}} \right] \cdot x_i \quad (9)$$

### Momentos L depurados (1,0) poblacionales y de la muestra

Ahmad, Shabri y Zakaria (2011b) indican que los momentos  $L$  depurados fueron introducidos por Elamir y Seheult (2003) como una opción para

tomar en cuenta los valores extremos; son fáciles de calcular y más robustos que los momentos  $L$  a la presencia de tales datos atípicos o dispersos (*outliers*). También señalan que la mayoría de los trabajos de aplicación de los momentos  $L$  depurados se han centrado en casos simétricos de truncado, por lo general suprimiendo el valor más bajo y el más grande de la muestra conceptual ( $s = t = 1$ ); por ejemplo, Abdul-Moniem y Selim (2009), y Bílková (2014), proponen emplear los momentos  $L$  depurados  $(1,0)$ , en los cuales sólo el valor más bajo de la muestra es eliminado, buscando con ello un mejor ajuste de la FDP a los valores extremos superiores. De acuerdo con la ecuación (8) y considerando  $s = 1$  y  $t = 0$ , se definen los siguientes cuatro primeros momentos  $L$  depurados  $(1,0)$ , según Ahmad *et al.* (2011b):

$$\lambda_1^{(1,0)} = E(X_{2,2}) \quad (10)$$

$$\lambda_2^{(1,0)} = \frac{1}{2}E(X_{3,3} - X_{2,3}) \quad (11)$$

$$\lambda_3^{(1,0)} = \frac{1}{3}E(X_{4,4} - 2X_{3,4} + X_{2,4}) \quad (12)$$

$$\lambda_4^{(1,0)} = \frac{1}{4}E(X_{5,5} - 3X_{4,5} + 3X_{3,5} - X_{2,5}) \quad (13)$$

Los cocientes poblacionales de momentos  $L$  depurados de asimetría y curtosis son, respectivamente:

$$\tau_3^{(1,0)} = \frac{\lambda_3^{(1,0)}}{\lambda_2^{(1,0)}} \quad (14)$$

$$\tau_4^{(1,0)} = \frac{\lambda_4^{(1,0)}}{\lambda_2^{(1,0)}} \quad (15)$$

Las estimaciones no sesgadas de los momentos depurados  $(1,0)$  se basan en una muestra  $(x_i)$  de datos ordenados en forma progresiva y se obtienen a partir de la ecuación (8) modificada:

$$l_r^{(1,0)} = \frac{1}{r} \sum_{i=2}^n \left[ \frac{\sum_{j=0}^{r-1} (-1)^j \binom{r-1}{j} \binom{i-1}{r-j} \binom{n-i}{j}}{\binom{n}{r+1}} \right] \cdot x_i \quad (16)$$

Abdul-Moniem y Selim (2009) aplican los métodos de los momentos  $L$  y de los depurados simétricamente ( $s = t = 1$ ) al ajuste de la distribución Pareto Generalizada; manteniendo conocido el parámetro de forma ( $k$ ), estiman los parámetros de ubicación ( $u$ ) y de escala ( $a$ ) en muestras sintéticas de tamaños  $10(10)40$ , con diez mil replicaciones cada una, en las cuales  $u = 2$  y  $a = 0.20(0.20)1.40$ . Encontraron que el error cuadrático medio (ECM) entre los parámetros estimados y los reales o asignados decrece conforme  $n$  se incrementa, además creció conforme aumentó el parámetro de escala, pero tal error es siempre menor en las estimaciones realizadas con los momentos  $L$  depurados.

Ahmad *et al.* (2011b) también utilizan la distribución Pareto Generalizada y a través de simulación aleatoria encuentran que los momentos  $L$  depurados  $(1,0)$  reducen la influencia probable del dato más pequeño de la muestra en la estimación de los eventos de alto periodo de retorno. Sus resultados con datos reales muestran que, en algunos casos, los momentos  $L$  depurados  $(1,0)$  son una mejor opción que los momentos  $L$ , en especial en la estimación de predicciones de baja probabilidad de excedencia.

Ahmad, Shabri y Zakaria (2013) contrastan las distribuciones GVE, LOG y PAG ajustadas por momentos  $L$  y momentos depurados  $(1,0)$  y  $(1,1)$ , en 12 registros de gastos máximos anuales de la porción noreste de Malasia; encuentran que los momentos depurados  $(1,0)$  conducen a mejores ajustes en la mayoría de los registros procesados.

### Ajuste con momentos $L$ de las distribuciones GVE, LOG y PAG

De acuerdo con Hosking y Wallis (1997), según su tabla 5.1, estas tres funciones de distribución

de probabilidad (FDP), cuando su parámetro de forma  $k < 0$ , tienen sus colas derechas más gruesas o densas de entre todas las que son utilizadas de manera regular en los análisis de frecuencias de datos hidrológicos; además, ellas tienen una frontera superior cuando  $k > 0$  y cuando  $k = 0$  definen distribuciones de dos parámetros: la Gumbel, la logística y la exponencial, respectivamente.

El método de obtención de sus parámetros de ubicación, escala y forma ( $u$ ,  $a$  y  $k$ ) de las distribuciones GVE, LOG y PAG con base en los momentos  $L$  se puede consultar, respectivamente, en Stedinger, Vogel y Foufoula-Georgiou (1993), Hosking y Wallis (1997), y Rao y Hamed (2000). A continuación se citan para cada una de estas tres FDP su fórmula matemática o  $F(x)$ , su solución inversa o función de cuantiles  $x(F)$  y las ecuaciones de cálculo necesarias para estimar sus tres parámetros de ajuste.

#### Distribución General de Valores Extremos

Intervalo de  $x$ :  $u + a/k \leq x < \infty$  si  $k < 0$ ;  $-\infty < x < \infty$  si  $k = 0$  y  $-\infty \leq x < u + a/k$  si  $k > 0$ .

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (17)$$

siendo  $y$  la variable reducida:

$$y = -\frac{1}{k} \ln \left[ 1 - k \left( \frac{x-u}{a} \right) \right] \quad \text{para } k \neq 0 \quad (18)$$

$$y = \frac{x-u}{a} \quad \text{para } k = 0 \quad (19)$$

$$x(F) = u + \frac{a}{k} \left[ 1 - (-\ln F)^k \right] \quad \text{para } k \neq 0 \quad (20)$$

$$x(F) = u - a \cdot \ln(-\ln F) \quad \text{para } k = 0 \quad (21)$$

$$c = \frac{2}{3+t_3} - 0.63093 \quad (22)$$

$$k \cong 7.8590 \cdot c + 2.9554 \cdot c^2 \quad (23)$$

$$a = \frac{l_2 \cdot k}{(1-2^{-k}) \cdot \Gamma(1+k)} \quad (24)$$

$$u = l_1 - \frac{a}{k} [1 - \Gamma(1+k)] \quad (25)$$

La función factorial Gamma fue estimada con la fórmula de Stirling (Davis, 1965), que para valores grandes del argumento  $\varepsilon$  es bastante aproximada con un error cercano a cero, y está dada por:

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon} \cdot \varepsilon^{\varepsilon-1/2} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \left( 1 + \frac{1}{12 \cdot \varepsilon} + \frac{1}{288 \cdot \varepsilon^2} - \frac{139}{51840 \cdot \varepsilon^3} - \frac{571}{2488320 \cdot \varepsilon^4} + \dots \right) \quad (26)$$

#### Distribución Logística Generalizada

Intervalo de  $x$ , idéntico al de la GVE:

$$F(x) = \frac{1}{1+e^{-y}} \quad (27)$$

siendo  $y$  igual a la ecuación (18):

$$x(F) = u + \frac{a}{k} \left\{ 1 - \left[ \frac{(1-F)}{F} \right]^k \right\} \quad \text{para } k \neq 0 \quad (28)$$

$$x(F) = u - a \cdot \ln \left[ \frac{(1-F)}{F} \right] \quad \text{para } k = 0 \quad (29)$$

$$k = -t_3 \quad (30)$$

$$a = \frac{l_2 \cdot \text{sen}(\pi \cdot k)}{\pi \cdot k} \quad (31)$$

$$u = l_1 - a \left( \frac{1}{k} - \frac{\pi}{\text{sen}(\pi \cdot k)} \right) \quad (32)$$

### Distribución Pareto Generalizada

Intervalo de  $x$ :  $u \leq x < \infty$  si  $k \leq 0$ ;  $u \leq x \leq u + a/k$  si  $k > 0$ .

$$F(x) = 1 - e^{-y} \quad (33)$$

siendo  $y$  igual a la ecuación (18):

$$x(F) = u + \frac{a}{k} \left[ 1 - (1-F)^k \right] \quad \text{para } k \neq 0 \quad (34)$$

$$x(F) = u - a \cdot \ln(1-F) \quad \text{para } k = 0 \quad (35)$$

$$k = \frac{(1-3t_3)}{(1+t_3)} \quad (36)$$

$$a = l_2(1+k) \cdot (2+k) \quad (37)$$

$$u = l_1 - l_2(2+k) \quad (38)$$

### Ajuste con momentos L depurados (1,0) de las distribuciones GVE, LOG y PAG

Ahmad, Shabri y Zakaria (2011a), y Ahmad *et al.* (2013) obtienen las expresiones para estimar los tres parámetros de ajuste de estas distribuciones, basados en los momentos L depurados (1,0), éstas son:

#### Distribución General de Valores Extremos

$$k = 0.4813 - 2.1364 \cdot t_3^{(1,0)} + 0.6994 (t_3^{(1,0)})^2 - 0.1991 \cdot (t_3^{(1,0)})^3 \quad (39)$$

$$a = \frac{-2(6)^k \cdot l_2^{(1,0)} \cdot [1/\Gamma(k)]}{3(2^k - 3^k)} \quad (40)$$

$$u = l_1^{(1,0)} - \frac{a}{k} + \frac{a}{2^k \cdot [1/\Gamma(k)]} \quad (41)$$

La ecuación (39) fue obtenida con base en la expresión de  $t_3$ , en función  $k$  expuesta por Ahmad *et al.* (2013), y es válida en el intervalo para  $k$  de -0.70 a 0.50. El recíproco de la función Gamma fue estimado con la siguiente fórmula del producto infinito de Euler (Davis, 1965), la cual fue evaluada para  $np = 50$ ; con ello, ya no cambian sus cinco cifras decimales:

$$1/\Gamma(z) = z \cdot e^{\gamma z} \prod_{np=1}^{\infty} \left[ \left( 1 + \frac{z}{np} \right) \cdot e^{-z/np} \right] \quad (42)$$

siendo  $\gamma = 0.5772156649$  la constante de Euler con el valor aproximado indicado. La función  $1/\Gamma(z)$  es continua y pasa por cero en los puntos  $z = 0, -1, -2, -3, \dots$

#### Distribución Logística Generalizada

$$k = \frac{4 - 27 \cdot t_3^{(1,0)}}{20} \quad (43)$$

$$a = \frac{4 \cdot k \cdot l_2^{(1,0)}}{6 \cdot \Gamma(2-k) \cdot \Gamma(1+k) - 3 \cdot \Gamma(3-k) \cdot \Gamma(1+k)} \quad (44)$$

$$u = l_1^{(1,0)} - \frac{a}{k} + \frac{a \cdot \Gamma(2-k) \cdot \Gamma(1+k)}{k} \quad (45)$$

#### Distribución Pareto Generalizada

$$k = \frac{4 - 12 \cdot t_3^{(1,0)}}{4 + 3 \cdot t_3^{(1,0)}} \quad (46)$$

$$a = \frac{l_2^{(1,0)}(1+k) \cdot (2+k) \cdot (3+k)}{3} \quad (47)$$

$$u = l_1^{(1,0)} - a \left[ \frac{3+k}{(1+k) \cdot (2+k)} \right] \quad (48)$$

#### Indicador cuantitativo del ajuste

Coles (2001) indica que la motivación para ajustar una FDP a los datos es poder obtener

conclusiones respecto a la población de la cual probablemente proceden los valores disponibles. Como la confiabilidad de tales conclusiones depende de la exactitud de la FDP ajustada, entonces es necesario verificar que tal modelo probabilístico es capaz de reproducir los datos que se emplearon para estimarlo (Flowers-Cano, Flowers, & Rivera-Trejo, 2014).

Desde mediados de la década de los años setenta se estableció el *error estándar de ajuste (EEA)* como una medida cuantitativa que estima la calidad estadística del ajuste y que además permite la comparación objetiva entre las diversas distribuciones de probabilidad que se prueban o ajustan a una muestra, ya que tiene las unidades de los datos. Su expresión es la siguiente (Kite, 1977):

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - npa}} \quad (49)$$

en donde  $n$  es el número de datos de la muestra;  $x_i$ , los datos ordenados de menor a mayor;  $\hat{x}_i$ , los valores estimados con la función de cuantiles o solución inversa, utilizando las ternas de parámetros de ajuste ( $u, a, k$ ) que se prueban para una probabilidad de no excedencia  $P(X < x)$ , estimada con la fórmula de Weibull (Benson, 1962):

$$P(X < x) = \frac{m}{n+1} \quad (50)$$

en la cual  $m$  es el número de orden del dato, con 1 para el menor y  $n$  para el mayor. Por último,  $npa$  es el número de parámetros de ajuste; para las distribuciones GVE, LOG y PAG es tres.

### Indicadores cualitativos del ajuste

Recientemente se han popularizado dos *gráficos de diagnóstico*: el de *Probabilidades* y el de *Cantidades* (Coles, 2001; Wilks, 2011); el primero emplea en el eje de las abscisas la probabilidad empírica estimada con la ecuación (50) y en las ordenadas la probabilidad que define el modelo

para cada dato disponible ordenados en forma progresiva de magnitud ( $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ), la cual se estima con las ecuaciones (17), (27) y (33) para las distribuciones GVE, LOG y PAG, respectivamente. En el gráfico de Cantidades se indican en las abscisas el valor del dato observado ( $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ) y en las ordenadas el valor estimado con la solución inversa del modelo; es decir, con las ecuaciones (20), (28) y (34) para las funciones GVE, LOG y PAG, para la probabilidad empírica estimada con la ecuación (50). En resumen, las coordenadas  $x$  y  $y$  de cada gráfico son (Coles, 2001):

*Probabilidades*

$$\left[ \left( \frac{i}{n+1}, F(x_i) \right) : i = 1, 2, \dots, n \right] \quad (51)$$

*Cantidades*

$$\left[ \left( x_i, x \left( \frac{i}{n+1} \right) \right) : i = 1, 2, \dots, n \right] \quad (52)$$

## Descripción de la aplicación numérica

### Registros hidrométricos procesados

La aplicación numérica que se describe utilizó los 21 registros de crecientes máximas anuales disponibles en la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa) en estaciones hidrométricas cuyo régimen de escurrimiento no está afectado por embalses y cuentan con más de 20 años de datos en el sistema BANDAS (IMTA, 2002). Los registros de las estaciones hidrométricas Huites y Guamúchil abarcan hasta el año en que la construcción del embalse respectivo afectó su régimen; los datos de la estación San Francisco proceden del *Boletín Hidrológico* 36 (SRH, 1975). Esta información hidrométrica se actualizó en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y entonces 12 registros fueron ampliados con datos que abarcan, como máximo, hasta el año 2011, los cuales fueron Santa Cruz, Jaina, Palo Dulce, Ixpalino, Chinipas, Tamazula, Acatitán, Choix, Badiraguato, Zopilote, Chico

Ruiz y El Bledal. En las primeras cinco columnas del cuadro 1 se exponen las características generales de los registros que serán procesados, expuestos en orden decreciente de tamaño de cuenca; el registro más corto tiene 23 años y los más amplios 60 años, con un valor mediano de 33 años. Campos-Aranda (2014a) presenta un mapa con la localización de las 21 estaciones hidrométricas procesadas y sus respectivas cuencas de drenaje.

### Pruebas estadísticas aplicadas a los registros

Para verificar la calidad estadística de los registros hidrométricos que serán procesados, se aplicó una prueba general y seis tests específicos que buscan persistencia (Anderson y Sneyers), tendencia (Kendall y Spearman), exceso o déficit de variabilidad (Bartlett) y cambio en

la media (Cramer). La prueba general fue la de Von Neumann, que detecta aleatoriedad contra componentes determinísticas no especificadas. Todas estas pruebas se pueden consultar en WMO (1971), y Machiwal y Jha (2008, 2012).

La prueba de Von Neumann encontró sólo dos registros no homogéneos: Choix y Pericos, ambos con persistencia detectada por los tests de Anderson y de Sneyers. Tres registros (Santa Cruz, Jaina y Acatitán) mostraron tendencia descendente y uno (Badiraguato) ascendente ligera, de acuerdo con los tests de Kendall y Spearman. Al tomar en cuenta que los registros que mostraron tendencia descendente tienen años faltantes, principalmente en su lapso final de 1995 al 2011, se consideraron susceptibles de procesamiento probabilístico, ya que tal componente determinística puede estar siendo inducida por la falta de continuidad.

Cuadro 1. Características generales y momentos L depurados (1,0) de los 21 registros de crecientes máximas anuales disponibles en las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa).

Núm.	Estación hidrométrica	Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	Años de registro (n)	$I_1 = I_1^{(0,0)}$	$I_1^{(1,0)}$	$I_2^{(1,0)}$	$I_3^{(1,0)}$	$t_3^{(1,0)}$
1	Huites	26 057	1942-1992 (51)	3328.333	4854.961	1706.992	802.426	0.4701
2	San Francisco	17 531	1941-1973 (33)	1724.636	2444.118	769.869	312.918	0.4065
3	Santa Cruz	8 919	1944-2011 (56)	972.500	1464.255	525.671	247.989	0.4718
4	Jaina	8 179	1942-2011 (60)	973.850	1441.582	519.757	259.900	0.5000
5	Palo Dulce	6 439	1958-1986 (26)	1083.423	1552.551	551.855	320.997	0.5817
6	Ixpalino	6 166	1953-2009 (46)	1191.891	1663.188	510.515	251.830	0.4933
7	La Huerta	6 149	1970-1999 (28)	945.107	1272.204	258.448	10.619	0.0411
8	Chinipas	5 098	1965-2008 (33)	981.030	1310.680	308.185	81.948	0.2659
9	Tamazula	2 241	1963-1999 (33)	593.909	772.023	181.468	78.403	0.4321
10	Naranjo	2 064	1939-1984 (45)	633.311	965.053	350.734	136.605	0.3895
11	Acatitán	1 884	1955-2008 (49)	797.878	1242.170	462.272	182.957	0.3958
12	Guamúchil	1 645	1940-1971 (32)	702.344	1003.141	319.356	141.162	0.4420
13	Choix	1 403	1956-2005 (41)	334.927	469.731	143.144	66.263	0.4629
14	Badiraguato	1 018	1960-1999 (40)	1033.350	1650.228	763.269	464.662	0.6088
15	El Quelite	835	1961-2001 (33)	479.091	697.343	216.313	71.132	0.3288
16	Zopilote	666	1939-2010 (60)	337.117	493.580	143.607	29.706	0.2069
17	Chico Ruiz	391	1977-2006 (23)	206.343	296.257	79.715	12.380	0.1553
18	El Bledal	371	1938-1994 (57)	288.895	411.405	126.451	53.259	0.4212
19	Pericos	270	1961-1992 (30)	250.800	336.685	81.431	22.299	0.2773
20	La Tina	254	1960-1983 (24)	104.958	165.297	67.297	36.277	0.5391
21	Bamícori	223	1951-1983 (33)	189.182	280.225	94.765	33.181	0.3501

### Momentos $L$ depurados (1,0)

Con base en la ecuación (16) se calcularon estos momentos, los cuales se han concentrado en las columnas 6, 7 y 8 del cuadro 1; en su columna final se tiene el cociente de asimetría, evaluado según la ecuación (14).

### Errores estándar de ajuste

Con base en los momentos  $L$  y sus cocientes (Hosking & Wallis, 1997; Campos-Aranda, 2014a), se obtuvieron los tres parámetros de ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG, por medio de las ecuaciones (22) a (26), (30) a (32) y (36) a (38), respectivamente. Después, haciendo uso de sus soluciones inversas,

ecuaciones (20), (28) y (34), se realizaron las estimaciones  $\hat{x}_i$  o predicciones necesarias para aplicar la ecuación (49) del error estándar de ajuste (EEA). Los resultados se han concentrado en el cuadro 2, en las columnas indicadas con "moL".

De manera similar, pero utilizando los valores de los momentos  $L$  depurados (1,0) del cuadro 1, se estimaron los tres parámetros de ajuste de las funciones GVE, LOG y PAG, a través de las ecuaciones (39) a (42), (43) a (45) y (46) a (48). En seguida, a partir de sus soluciones inversas, expresiones (20), (28) y (34), se obtuvieron los valores de  $\hat{x}_i$  para obtener los errores estándar de ajuste, los cuales se tienen en el cuadro 2, en las columnas con designación "moLD".

Cuadro 2. Errores estándar de ajuste ( $m^3/s$ ) obtenidos con los métodos de momentos  $L$  y momentos  $L$  depurados (1,0), en las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa).

Núm.	Estación hidrométrica	Error estándar de ajuste (EEA)						Error relativo del máximo EEA (%)
		GVE		LOG		PAG		
		moL	moLD	moL	moLD	moL	moLD	
1	Huites	979	925	1061	976	834	(822)	29.1
2	San Francisco	377	351	419	385	302	(295)	42.0
3	Santa Cruz	388	389	402	398	393	(378)	6.3
4	Jaina	349	352	369	362	337	(335)	10.1
5	Palo Dulce	745	763	767	765	(716)	743	7.1
6	Ixpalino	346	354	366	364	(335)	337	9.3
7	La Huerta	96	134	124	211	(53)	54	298.1
8	Chinipas	101	102	118	123	90	[90]	36.7
9	Tamazula	144	145	148	148	146	(142)	4.2
10	Naranjo	156	148	173	164	127	(124)	39.5
11	Acatitán	189	191	210	207	176	(174)	20.7
12	Guamúchil	235	236	247	243	(225)	226	9.8
13	Choix	101	102	106	105	99	(98)	8.2
14	Badiraguato	838	836	888	829	808	(801)	10.9
15	El Quelite	87	86	98	98	74	[74]	32.4
16	Zopilote	51	56	63	79	28	(27)	192.6
17	Chico Ruiz	28	33	35	44	[17]	17	158.8
18	El Bledal	64	65	67	67	69	(64)	7.8
19	Pericos	29	28	33	34	(24)	25	41.7
20	La Tina	90	92	92	93	(87)	90	6.9
21	Bamícori	52	49	57	54	43	(41)	39.0

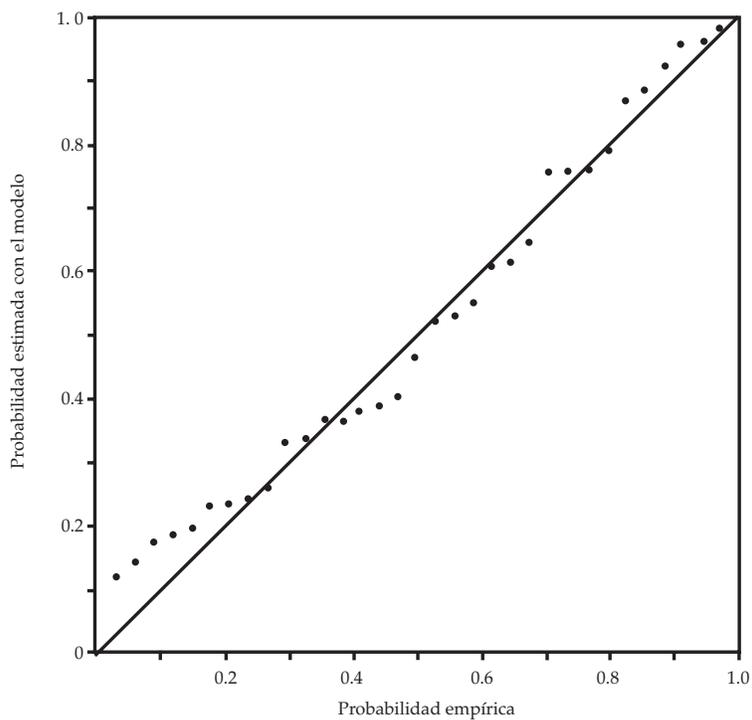


Figura 1. Gráfico de probabilidad para el registro de crecientes anuales de la estación hidrométrica San Francisco, a través del ajuste de la distribución GVE con un  $EEA = 351 \text{ m}^3/\text{s}$ .

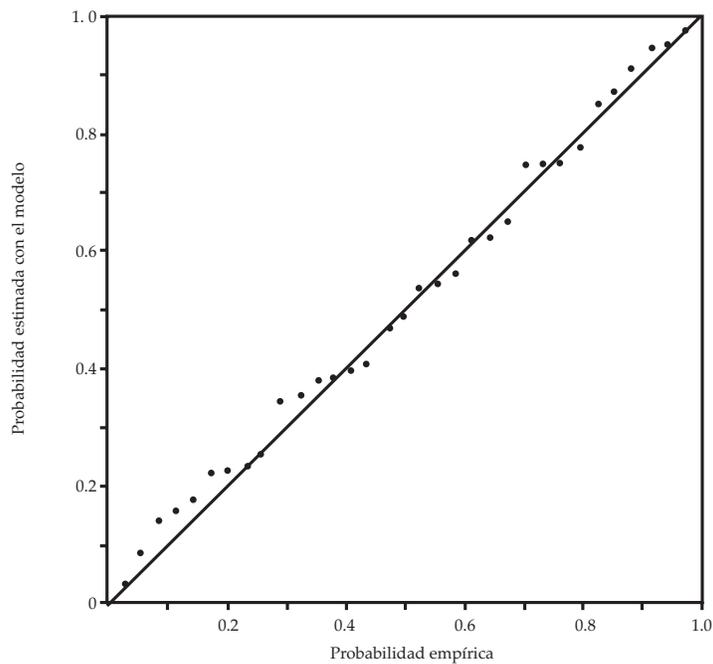


Figura 2. Gráfico de probabilidad para el registro de crecientes anuales de la estación hidrométrica San Francisco, a través del ajuste de la distribución PAG con un  $EEA = 295 \text{ m}^3/\text{s}$ .

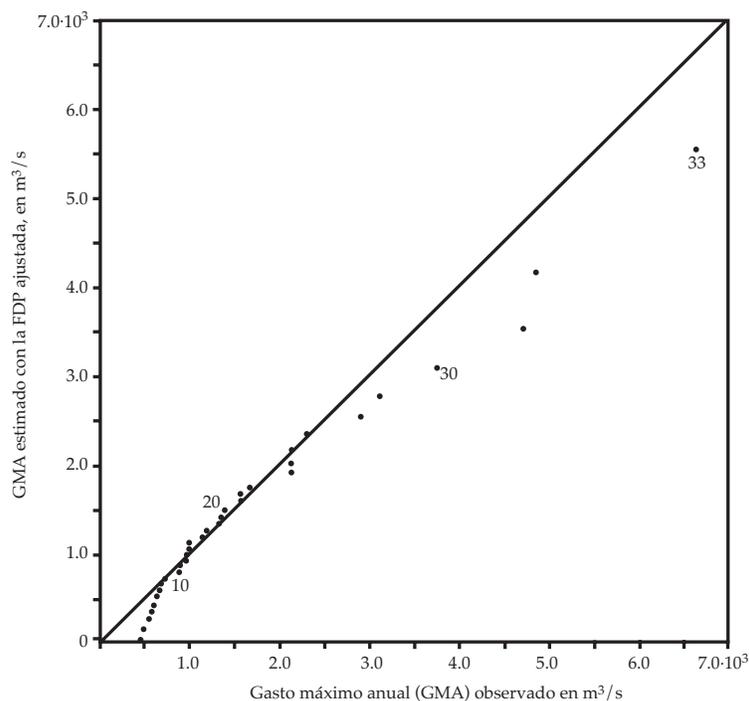


Figura 3. Gráfico de cantidades para el registro de crecientes anuales de la estación hidrométrica San Francisco, a través del ajuste de la distribución LOG con un  $EEA = 385 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Gráficos de diagnóstico

En las figuras 1 y 2 se presentan los gráficos de probabilidad del registro de la estación hidrométrica San Francisco, con  $n = 33$ , para las distribuciones GVE y PAG. Se observa, en general, un mejor ajuste del modelo PAG con todos los datos de la muestra, sobre todo para los valores bajos, en los que la función GVE presenta la mayor dispersión.

Respecto a los gráficos de cantidades, se exponen los de las distribuciones LOG y PAG en las figuras 3 y 4, para el mismo registro en la estación de aforos San Francisco, destacando el ajuste excelente que tiene la función PAG en los valores bajos y cómo ambas funciones no pueden reproducir los valores altos del registro a partir del dato 28.

### Análisis de los resultados y predicciones de diseño

En el cuadro 2 se han indicado entre paréntesis circular los valores mínimos del error estándar de ajuste; se observa que en todos los registros, la distribución PAG condujo a los valores menores, por ello es la seleccionada para exponer sus predicciones, las cuales se han concentrado en el cuadro 3. Campos-Aranda (2014b) expone varios métodos simples para el ajuste de la función PAG.

En tres registros, los de las estaciones Chipipas, El Quelite y Chico Ruiz, ocurren valores iguales del  $EEA$  y para tales casos se decidió adoptar las predicciones más altas del método de momentos  $L$  o de los momentos  $L$  depurados (1,0), lo cual se indica con paréntesis rectangular

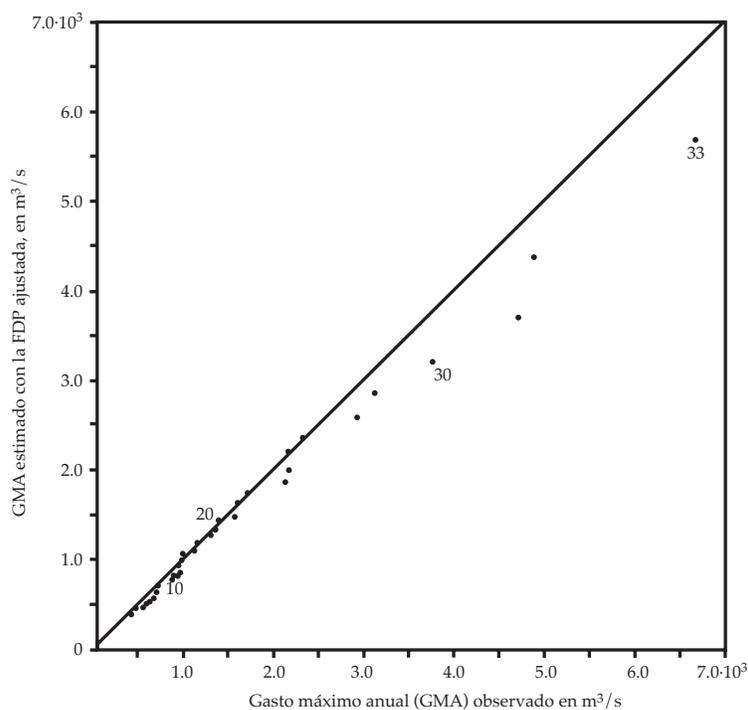


Figura 4. Gráfico de cantidades para el registro de crecientes anuales de la estación hidrométrica San Francisco, a través del ajuste de la distribución PAG con un  $EEA = 295 \text{ m}^3/\text{s}$ .

en el cuadro 2. Conviene destacar que en dos primeros registros citados, el ajuste de la distribución PAG con momentos  $L$  depurados (1,0), condujo a predicciones más altas en los periodos de retorno elevados.

También se debe destacar que el ajuste por momentos  $L$  depurados (1,0) de la función PAG llevó a un valor menor del  $EEA$  en más de la mitad (catorce) de los 21 registros procesados. Lo anterior demuestra que tal método en efecto otorga mayor ponderación a los datos de mayor magnitud a través de un mejor ajuste de la FDP, lo que conduce a predicciones más confiables.

Con el método de momentos  $L$  depurados (1,0), se obtienen menores  $EEA$  apreciables en el ajuste de la distribución GVE en ciertos registros, como Huites, San Francisco, Naranjo, Badiraguato y Bamícori. En relación con la función LOG, lo anterior ocurre en los mismos registros y en Jaina y Guamúchil.

Un contraste individual entre las predicciones mostradas en el cuadro 3 y las adoptadas

por Campos-Aranda (2014a), procedentes de las distribuciones GVE, LOG y Log-Pearson tipo III, demostró una similitud alta en todas las estaciones hidrométricas hasta los periodos de retorno de 100 años, pero también mostró que la función PAG aporta, en algunos registros, predicciones menores en los periodos de retorno elevados (>100 años). En la última columna del cuadro 2 se tiene el llamado error relativo del máximo  $EEA$ , calculado con la expresión siguiente:

$$ER = \frac{EEA_M - EEA_m}{EEA_m} 100 \quad (53)$$

en la cual  $EEA_M$  y  $EEA_m$  son los errores estándar de ajuste máximo y mínimo de los seis valores calculados. Destacan los  $ER$  de las estaciones de aforos La Huerta, Zopilote y Chico Ruiz, cuyos registros carecen de valores extremos, ya que el parámetro de forma ( $k$ ), estimado con momentos  $L$  de la distribución PAG, resultó

Cuadro 3. Predicciones ( $m^3/s$ ) obtenidas con la distribución Pareto Generalizada en los 21 registros de crecientes anuales de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa).

Núm.	Estación hidrométrica	Método de ajuste	Periodos de retorno en años						
			5	10	25	50	100	500	1 000
1	Huites	moLD	4 480	6 760	10 612	14 326	18 909	34 121	43 336
2	San Francisco	moLD	2 433	3 500	5 116	6 515	8 086	12 525	14 840
3	Santa Cruz	moLD	1 346	2 047	3 235	4 383	5 804	10 538	13 417
4	Jaina	moLD	1 278	1 951	3 146	4 355	5 910	11 464	15 058
5	Palo Dulce	moL	1 301	1 973	3 251	4 635	6 526	14 025	19 350
6	Ixpalino	moL	1 608	2 307	3 421	4 433	5 622	9 236	11 256
7	La Huerta	moL	1 521	1 764	1 935	2 002	2 041	2 079	2 085
8	Chinipas	moLD	1 442	1 853	2 328	2 642	2 921	3 455	3 645
9	Tamazula	moLD	754	1 003	1 398	1 754	2 171	3 428	4 125
10	Naranjo	moLD	979	1 467	2 184	2 786	3 445	5 226	6 115
11	Acatitán	moLD	1 251	1 894	2 848	3 659	4 555	7 017	8 267
12	Guamúchil	moL	996	1 438	2 111	2 696	3 357	5 237	6 225
13	Choix	moLD	442	634	955	1 261	1 635	2 853	3 580
14	Badiraguato	moLD	1 154	1 966	3 668	5 691	8 689	22 446	33 516
15	El Quelite	moLD	748	1 047	1 440	1 734	2 026	2 696	2 981
16	Zopilote	moLD	579	759	943	1 049	1 133	1 269	1 309
17	Chico Ruiz	moL	348	446	540	593	633	694	710
18	El Bledal	moLD	404	578	849	1 089	1 366	2 177	2 616
19	Pericos	moL	374	480	599	676	742	865	906
20	La Tina	moL	150	239	392	539	722	1 335	1 709
21	Bamícori	moLD	296	428	608	749	893	1 245	1 403

positivo en las tres, y en la función GVE también es positivo en la primera y cercano a cero en las restantes. En estos tres registros, el ajuste de las distribuciones GVE y LOG a través del método de los momentos  $L$  depurados (1,0) conduce a *EEA* mayores que los del método de momentos  $L$ , lo cual indica que no es conveniente eliminar su dato más bajo.

## Conclusiones

Los resultados numéricos de este trabajo establecen a la distribución Pareto Generalizada como un modelo probabilístico que conviene probar en los análisis de frecuencias de crecientes y de otros datos hidrológicos extremos, ya que conduce a errores estándar de ajuste (*EEA*) bajos.

En diez de los 21 registros procesados en la aplicación numérica descrita, los *EEA* obtenidos con las distribuciones GVE y LOG están dentro del 10% del error relativo (ecuación (53)), como se observa en la columna final del cuadro 2; por lo anterior, su aplicación debe seguir siendo una norma o precepto.

Los resultados concentrados en el cuadro 2 relativos al *EEA* demuestran que en determinados registros de crecientes anuales, más de la mitad de los 21 procesados, el método de los momentos  $L$  depurados (1,0) es una buena opción para abatirlo y lograr mejores ajustes con cada una de las tres funciones de probabilidad aplicadas (GVE, LOG y PAG); por ello se sugiere utilizarlo sistemáticamente, como una versión avanzada del procedimiento de los momentos  $L$ , el cual ya es de uso universal en los análisis de frecuencias hidrológicas.

## Agradecimientos

Se agradece a los ingenieros de la Conagua, José Luis Juárez Rubio de la Dirección Local San Luis Potosí y Alejandro García Ruiz de la GASIR, el haber proporcionado al autor la información hidrométrica actualizada de crecientes anuales en 19 estaciones de aforos de la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa).

## Referencias

- Abdul-Moniem, I. B., & Selim, Y. M. (2009). TL-Moments and L-Moments Estimation for the Generalized Pareto Distribution. *Applied Mathematical Sciences*, 3(1), 43-52.
- Ahmad, U. N., Shabri, A., & Zakaria, Z. A. (2011a). Flood Frequency Analysis of Annual Maximum Stream Flows Using L-Moments and TL-Moments Approach. *Applied Mathematical Sciences*, 5(5), 243-253.
- Ahmad, U. N., Shabri, A., & Zakaria, Z. A. (2011b). Trimmed L-Moments (1,0) for the Generalized Pareto Distribution. *Hydrological Sciences Journal*, 56(6), 1053-1060.
- Ahmad, U. N., Shabri, A., & Zakaria, Z. A. (2013). An Analysis of Annual Maximum Stream Flows in Terengganu, Malaysia using TL-Moments Approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3-4), 649-663.
- Asquith, W. H. (2011). *Distributional Analysis with L-moment Statistics using the R Environment for Statistical Computing*. Chapter 3: Order Statistics (pp. 47-59) and Chapter 6: L-Moments (pp. 87-122). Texas, USA: Author Edition (ISBN-13: 978-1463508418).
- Benson, M. A. (1962). Plotting Positions and Economics of Engineering Planning. *Journal of Hydraulics Division*, 88(6), 57-71.
- Bhattacharai, K. P. (2004). Partial L-Moments for the Analysis of Censored Flood Samples. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 855-868.
- Bílková, D. (2014). Trimmed L-Moments: Analogy of Classical L-Moments. *American Journal of Mathematics and Statistics*, 4(2), 80-106.
- Campos-Aranda, D. F. (2014a). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa), México. 2: contraste de predicciones locales y regionales. *Agrociencia*, 48(3), 255-270.
- Campos-Aranda, D. F. (octubre-diciembre, 2014b). Predicción de crecientes usando la distribución Pareto Generalizada ajustada con tres métodos simples. *Revista digital Tláloc*, 65.
- Coles, S. (2001). Theme 2.6.7: Model Diagnostics (pp. 36-44). In *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer-Verlag.
- Davis, P. J. (1965). Gamma Function and Related Functions. Chapter 6 (pp. 253-296). In M. Abramowitz & I. A. Stegun (Eds.). *Handbook of Mathematical Functions*. New York: Dover Publications.
- El Adlouni, S., Bobée, B., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). On the Tails of Extreme Event Distributions in hydrology. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 16-33.
- Elamir, E. A. H. (2010). Optimal Choices for Trimming in Trimmed L-Moment Method. *Applied Mathematical Sciences*, 4(58), 2881-2890.
- Elamir, E. A. H., & Seheult, A. H. (2003). Trimmed L-Moments. *Computational Statistics & Data Analysis*, 43(3), 299-314.
- Elamir, E. A. H., & Seheult, A. H. (2004). Exact Variance Structure of Sample L-Moments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 124(2), 337-359.
- Flowers-Cano, R. S., Flowers, R. F., & Rivera-Trejo, F. (2014). Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 189-197.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1979). Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.
- Hosking, J. R. M. (1990). L-moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, 52(1), 105-124.
- Hosking, J. R. M. (2007). Some Theory and Practical Uses of Trimmed L-Moments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 137(9), 3024-3039.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). Chapter 2: L-Moments (pp. 14-43); Chapter 5: Choice Of A Frequency Distribution (pp. 73-86); Appendix: L-Moments For Some Specific Distributions (pp. 191-209). In *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-moments*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- IMTA (2002). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. 8 CD. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Karvanen, J. (2006). Estimation of Quantile Mixtures Via L-Moments and Trimmed L-Moments. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51(2), 947-959.
- Kite, G. W. (1977). Chapter 12: Comparison of Frequency Distributions (pp. 156-168). In *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Kottegoda, N. T., & Rosso, R. (2008). Chapter 3: Random Variables and their Properties (pp. 83-164). In *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*. Chichester, United Kingdom: Blackwell Publishing.

- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2008). Comparative Evaluation of Statistical Tests for Time Series Analysis: Application to Hydrological Time Series. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 353-366.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). Chapter 4: Methods for Time Series Analysis (pp. 51-84). In *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Mudholkar, G. S., & Hutson, A. D. (1998). LQ-Moments: Analogs of L-Moments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 71(1-9), 191-208.
- Rao, A. R., & Hamed, K. H. (2000). Chapter 9: The Logistic Distribution (pp. 291-321). In *Flood Frequency Analysis*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- SRH (1975). *Boletín Hidrológico núm. 36. Región Hidrológica núm. 10 (Sinaloa)*. Tomos I y VI. México, DF: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Hidrología.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Chapter 18: Frequency Analysis of Extreme Events (pp. 18.1-18.66). In D. R. Maidment (Ed.). *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Wilks, D. S. (2011). Theme 4.5: Qualitative Assessments of the Goodness Fit (pp. 112-116). In *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd edition). San Diego, USA: Academic Press (Elsevier).
- WMO (1971). Annexed III: Standard Tests of Significance to Be Recommended in Routine Analysis of Climatic Fluctuations (pp. 58-71). Technical Note No. 79. In *Climatic Change*. Geneva: World Meteorological Organization.

## Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos Aranda

Profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Genaro Codina 240, Colonia Jardines del Estadio  
78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO  
campos\_aranda@hotmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor



Arroyo El pescador, municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México.

Foto: Gerardo Esquivel Arriaga.

# DISCUSIÓN

Las notas o artículos técnicos se encuentran abiertos a discusión de acuerdo con los siguientes lineamientos:

- La discusión se escribirá en tercera persona.
- El redactor de la discusión deberá usar el término polemista cuando se refiera a él mismo y el término autor cuando se trate del responsable de la nota o artículo técnicos.
- La discusión deberá remitirse durante los doce meses posteriores al último día del trimestre en que se publicó el artículo o la nota técnicos.
- El periodo de discusión puede ser extendido mediante la solicitud por escrito del polemista.
- La discusión se presentará conforme a la *Guía para colaboradores* publicada en esta misma revista (se hará caso omiso de los datos referentes a la extensión, resumen y *abstract*). Además, contará con la cita bibliográfica de las notas o artículos técnicos aludidos.
- La extensión de la discusión ocupará como máximo cuatro páginas de la revista (aproximadamente diez cuartillas, incluyendo figuras y cuadros).
- Las figuras y los cuadros presentados por el polemista deberán marcarse progresivamente con números romanos y cuando se citen los realizados por el autor se habrá de respetar la numeración original.
- Los editores suprimirán los datos ajenos al objeto de la discusión.
- La discusión se rechazará si contiene temas tratados en otras fuentes, promueve intereses personales, está descuidadamente preparada, pone en controversia hechos ya establecidos, es puramente especulativa o es ajena a los propósitos de la revista.
- La discusión se publicará junto con los comentarios del autor o autores aludidos.
- La discusión se dirigirá al editor en jefe.



Se muestra la parte alta de la cuenca desde Bacantón Alto, donde se aprecia la diferencia en la cobertura de bosque entre Guatemala (izquierda) y México (derecha), lo cual se traduce en mejor captación de agua cuenca abajo.

Foto: Neptalí Ramírez Marcial.

# GUÍA PARA COLABORADORES

La revista *Tecnología y Ciencias del Agua*, invita a los especialistas a colaborar con artículos o notas técnicas **inéditos, relacionados con el agua, derivados de una investigación, que brinden aportaciones originales** y se desarrollen dentro de la hidrología, hidráulica, gestión del agua, agua y energía, calidad del agua, ciencias físicas, biológicas y químicas, así como ciencias políticas y sociales, entre otras disciplinas, conforme a las normas que se enunciarán a continuación.

## PREPARACIÓN DEL ARTÍCULO

### FORMATO

**TIPO DE LETRA:** Palatino en todo el documento (cuerpo del texto, cuadros e ilustraciones).

**TAMAÑO DE LETRA:** el documento se presentará en ocho, nueve, diez y veinte puntos de acuerdo con el siguiente cuadro:

8 PUNTOS (PALATINO)	9 PUNTOS (PALATINO)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Cuadros.</li><li>• Figuras.</li><li>• Agradecimientos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre de los autores.</li><li>• Institución de los autores.</li><li>• Resumen.</li><li>• <i>Abstract</i> y <i>keywords</i>.</li><li>• Dirección institucional de los autores.</li></ul>
10 PUNTOS (PALATINO)	20 PUNTOS VERSALES (PALATINO)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Cuerpo del texto.</li><li>• Título del trabajo en inglés.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Título del trabajo en español.</li></ul>

**INTERLINEADO:** doble espacio.

**NUMERACIÓN DE PÁGINAS:** todas las páginas deben ir numeradas.

### EXTENSIÓN

**Artículo técnico:** treinta páginas (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.

**Nota técnica:** diez páginas (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.

### CONTENIDO

#### CONTENIDO

El artículo deberá presentar aportes significativos al conocimiento científico y tecnológico dentro de la especialidad; se basará en trabajos terminados o que hayan cumplido un ciclo en su desarrollo; mostrará resultados de una serie de experiencias de un año o más de investigación y estará respaldado por una revisión bibliográfica adecuada. **La estructura básica del texto deberá contener una introducción, el desarrollo y las conclusiones.** De preferencia, seguir el esquema clásico: resumen (abstract), introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

#### TÍTULO

El título, **redactado en español e inglés**, deberá ser informativo, sin que exceda de 12 palabras.

### RESUMEN

El resumen, **redactado en español e inglés** (*abstract*), deberá ser conciso y proporcionar un amplio panorama de la investigación (objetivo, método, resultados y conclusiones), sin que sobrepase las 250 palabras.

### PALABRAS CLAVE

Se debe proporcionar una relación de ocho palabras o frases clave (máximo) redactadas **en español e inglés** (*keywords*), que faciliten la recuperación de la información.

### PIES DE PÁGINA

No se admiten. Deberán incorporarse al texto.

### AGRADECIMIENTOS

Se incluirán después del texto y antes de las referencias.

### CUADROS

- Deberá usarse una página para cada cuadro.
- Después de las referencias se presentará la lista de todos los cuadros que se citen.

### FIGURAS

- Deberá usarse una página para cada figura.
- Todos los nombres de las figuras deberán incluirse después de los cuadros.
- Deberán tener alta resolución (300 dpi).

*Nota:* cuando el artículo se apruebe para publicación, el autor deberá remitir cada figura en archivo JPG, en alta resolución (300 dpi).

### REFERENCIAS

- Toda la bibliografía debe estar referenciada en el cuerpo principal del documento.
- En el caso del abordaje de temas del dominio común en el ámbito científico y tecnológico, deberán citarse trabajos que denoten el conocimiento de los autores sobre el estado del arte.
- En la medida de lo posible, evitar las autocitas.
- Se tomará como base el formato APA de citación.

Algunos ejemplos con base en el formato APA:

#### Libros completos

Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Ciudad de edición: Editorial.

Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Recuperado de <http://www.xxxxx>

Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. doi:xxxxx

Apellido, A. A. (Ed.). (año). Ciudad de edición: Editorial.

#### Capítulos de libros

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Apellido, B. Apellido & C. Apellido (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Lugar: Editorial.

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Editor & B. Editor (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Recuperado de <http://www.xxxxxxx>

#### Artículo o nota de publicación periódica recuperado de la web

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, volumen(número), pp. Recuperado de [http:// www.xxxxxx](http://www.xxxxxx)

**Esto es:** Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 1(2), 5-17. Recuperado de <http:// www.xxxxxx>

#### Artículo o nota de publicación periódica impresa

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82.

#### Artículo de publicación periódica con DOI

Apellido, A. A., Apellido, B. B., & Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82, doi:xxxxxx

#### Congresos y simposia

Colaborador, A. A., Colaborador, B. B., Colaborador, C. C., & Colaborador, D. D. (Mes, año). Título de la colaboración. En E. E. Presidente (Presidencia), Título del simposio. Simposio llevado a cabo en la conferencia de Nombre de la Organización, Lugar.

#### IDIOMA

Español o inglés.

#### Citas dentro del cuerpo del texto

Tipo de cita	Primera cita en el texto	Citas subsecuentes en el texto	Formato entre paréntesis, primera cita en el texto	Formato entre paréntesis, citas subsecuentes en el texto
Un trabajo por un solo autor	Apellido (Año)	Apellido (Año)	(Apellido, año)	(Apellido, año)
Un trabajo por dos autores	Apellido y Apellido (Año)	Apellido y Apellido (Año)	(Apellido & Apellido, Año)	(Apellido & Apellido, Año)
Un trabajo por tres autores	Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , año)
Un trabajo por cuatro autores	Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , año)
Un trabajo por cinco autores	Apellido, Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , 2008)
Una obra por seis o más autores	Apellido del primer autor <i>et al.</i> (Año)	Apellido del primer autor <i>et al.</i> (Año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , Año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , año)
Grupos (identificados fácilmente a través de abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (Siglas, año)	Siglas (Año)	(Nombre completo de la institución [siglas], año)	(Institución, año)
Grupos (sin abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (año)	Nombre completo de la institución (año)	(Nombre completo de la institución, año)	

#### SEPARACIÓN DE NÚMEROS Y USO DE PUNTO DECIMAL

En *Tecnología y Ciencias del Agua* se marcará la división entre millares con un espacio en blanco; mientras que para separar los números enteros de sus fracciones, cuando las haya, se usará el punto.

Al respecto, se retoma lo que indica el *Diccionario panhispánico de dudas*, editado por la Real Academia Española y la Asociación de Academias de la Lengua Española, en 2005, sobre las expresiones numéricas: “**se acepta el uso anglosajón del punto, normal en algunos países hispanoamericanos...:  $\pi = 3.1416$ .**”.

#### ENVÍO DEL ARTÍCULO

Enviar el artículo en *Word* con nombre de autores y dirección institucional a [revista.tyca@gmail.com](mailto:revista.tyca@gmail.com), con copia a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, [elipena@tlaloc.imta.mx](mailto:elipena@tlaloc.imta.mx).

#### INFORMACIÓN GENERAL

Una vez recibido el material, comenzará un proceso de revisión, durante el cual es posible que el manuscrito se rechace; si el texto es susceptible de ser dictaminado, pues cumple a cabalidad con la Política Editorial y así lo considera el Consejo Editorial, pasará a la etapa de arbitraje.

De acuerdo con el proceso de arbitraje, el texto puede ser aceptado sin cambios, con cambios menores, cambios mayores o ser rechazado.

Al ser publicado un trabajo, el autor principal tiene derecho, en forma gratuita a dos revistas y diez sobretiros.

En caso de cualquier duda, escribir a la licenciada Helena Rivas López, [hrrivas@tlaloc.imta.mx](mailto:hrrivas@tlaloc.imta.mx) o a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, [elipena@tlaloc.imta.mx](mailto:elipena@tlaloc.imta.mx).

# Política Editorial

## Misión

Diffundir el conocimiento y los avances científicos y tecnológicos en materia de agua, a través de la publicación de artículos y notas técnicas inéditas, que brinden aportaciones originales.

## Nuestros principios

- Imparcialidad.
- Objetividad.
- Honestidad.

## Nuestros valores

- Conocimiento.
- Experiencia.
- Autoridad temática.

## Contenido

Interdisciplinario, integrado con artículos y notas técnicas inéditas, relacionadas con el agua, derivadas de una investigación, que brinden aportaciones o innovaciones científicas y tecnológicas originales, que se desarrollen dentro del campo del conocimiento de diversas disciplinas.

## Cobertura temática

Interdisciplinaria, relacionada con agua, con prioridad temática en los siguientes ámbitos de conocimiento:

- Agua y energía.
- Calidad del agua.
- Ciencias físicas, biológicas y químicas.
- Ciencias hidroagrícolas.
- Ciencias políticas y sociales.
- Desarrollo e innovación científica y tecnológica.
- Gestión del agua.
- Hidrología.
- Hidráulica.

## Tipo de contribuciones

**Artículo técnico:** documento científico que trata y comunica por primera vez los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual en materia de agua.

**Nota técnica:** texto que trata avances en el campo de la ingeniería hidráulica y de la práctica profesional en materia de agua, sin que necesariamente se trate de una aportación original, aunque siempre deberá tratarse de un trabajo inédito.

Algunos trabajos sometidos al proceso de arbitraje pueden terminar publicándose como notas, o viceversa. Esto se hará bajo propuesta y un proceso de mutuo acuerdo entre los autores y el editor por tema responsable. Ambos tienen prácticamente la misma estructura (resumen, introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones, referencias).

## Proceso de arbitraje

La revista se rige por un riguroso proceso de arbitraje, el cual establece que cada trabajo sea analizado separadamente por tres revisores, quienes recomiendan su aceptación, su aceptación con cambios menores, su aceptación con cambios mayores, su rechazo o su aceptación como nota técnica con los cambios necesarios.

Se buscará que al menos uno de los revisores sea de alguna institución del extranjero.

Los revisores no podrán pertenecer a la misma institución de los autores que proponen el artículo para publicación.

Cuando los dictámenes se contrapongan o resulten poco consistentes, se podrá optar por solicitar la intervención de otros revisores o de los miembros del Consejo Editorial.

En ocasiones se podrá decidir sobre la aprobación o no de un artículo con el dictamen de dos revisores, más la opinión del editor por tema correspondiente, o la del editor en jefe.

Un artículo rechazado no se admitirá para un nuevo proceso de revisión.

El proceso de arbitraje se desarrollará de tal manera que tanto los autores como los revisores no conozcan el nombre de su contraparte.

El proceso de arbitraje lo llevan a cabo especialistas y expertos de alto nivel, de reconocido prestigio nacional e internacional en su ámbito profesional, con la capacidad para evaluar, de manera confiable y expedita, tanto la calidad como las aportaciones originales como el grado de innovación científica y tecnológica del material que se somete para posible publicación.

Esta participación se considera una contribución profesional, que se realiza de manera honorífica.

Los árbitros cuentan con la "Guía para el revisor", que les proporciona la Coordinación Editorial de la revista.

## Dictamen final

El dictamen derivado del proceso de arbitraje es inapelable.

## Autores

Se publican trabajos de autores de cualquier nacionalidad que presenten sus contribuciones en español; sin embargo, también aceptamos trabajos que remitan en español o inglés.

## Responsabilidad de los autores

La propuesta de un trabajo compromete a su autor a no someterlo simultáneamente a la consideración de otras publicaciones. En caso de que el artículo haya sido entregado a otro medio para su eventual publicación, se compromete a hacerlo del conocimiento de la Coordinación Editorial, que suspenderá el proceso de arbitraje e informará al Consejo Editorial sobre la decisión tomada por los autores.

Los colaboradores, cuyos artículos hayan sido aceptados, cederán formalmente los derechos de autor a **Tecnología y Ciencias del Agua**.

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde a los autores.

El autor es responsable de la calidad del español que utilice. Si su redacción es deficiente, se rechazará su contribución. **Tecnología y Ciencias del Agua** sólo se hará cargo del cuidado editorial.

El autor se compromete a realizar los ajustes que sean señalados por el editor temático en el tiempo fijado por éste; en caso de incumplimiento, el artículo será retirado del proceso de dictaminación y será calificado como rechazado.

El autor deberá estar atento para resolver las dudas y propuestas que presenten el editor y el coordinador editorial.

Cada autor deberá aprobar las pruebas finales de imprenta de sus textos.

Se sugiere revisar la "Guía para colaboradores".

## Lectores

Académicos, investigadores, especialistas y profesionales interesados en el análisis, investigación y búsqueda del conocimiento y soluciones de problemas relacionados con el agua.

Recepción de trabajos

La recepción de artículos y notas es permanente.

## Periodicidad

Edición bimestral. Aparecerá en el segundo mes del bimestre.

## Suscripción y distribución

La revista se distribuye por medio de suscripciones pagadas y honorarias.

## Acceso abierto

**Tecnología y Ciencias del Agua**, antes *Ingeniería hidráulica en México*, permite consultar en su versión digital todo el material publicado desde 1985.

## Ediciones especiales y números extraordinarios

**Tecnología y Ciencias del Agua** podrá publicar números especiales por sí misma o en colaboración con otras revistas, asociaciones profesionales o casas editoriales de reconocido prestigio relacionadas con el recurso agua.

De la misma manera, podrá publicar artículos por invitación, en reconocimiento a la trayectoria profesional de destacados investigadores.

En ambos casos se cuidará la calidad de los contenidos técnicos y las aportaciones científicas.

**Tecnología y Ciencias del Agua** está registrada en los siguientes índices y resúmenes (abstracts) nacionales e internacionales:

• Thomson Reuters Science Citation Index® (ISI) • Expanded Thomson Reuters Research Alert® (ISI) • Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) (2013-2018) • Sistema de Información Científica Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal), Universidad Autónoma del Estado de México • EBSCO (Fuente Académica Premier NISC; Geosystems, como Marine, Oceanographic and Freshwater Resources) • ProQuest (Cambridge Scientific Abstracts) • Elsevier (Fluid Abstracts: Process Engineering; Fluid Abstracts: Civil Engineering) • CAB Abstracts, CAB International • Latindex (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), Universidad Nacional Autónoma de México • Periódica (Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias), Universidad Nacional Autónoma de México • Catálogo Hela (Hemeroteca Latinoamericana), Universidad Nacional Autónoma de México • Actualidad Iberoamericana, CIT-III, Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología.

## Otras fuentes

También puede encontrarse su acervo en *Google académico*.



## Artículos técnicos

Pronóstico de caudales con Filtro de Kalman Discreto en el río Turbio

Fernando González-Leiva

Laura Alicia Ibáñez-Castillo

Juan B. Valdés

Mario Alberto Vázquez-Peña

Agustín Ruiz-García

Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y

transferencia de información

Oswaldo Ortiz-Vera

Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológico

Iván Vilchis-Mata

Khalidou M. Bâ

Roberto Franco-Plata

Carlos Díaz-Delgado

Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala

Rafaela María Laino-Guane

Ricardo Bello-Mendoza

Mario González-Espinosa

Neptalí Ramírez-Marcial

Francisco Jiménez-Otárola

Karim Musálem-Castillejos

Cambios de uso de suelo y sus efectos sobre la dinámica de GEI

en el estado de Durango

Palmira Bueno-Hurtado

Armando López-Santos

Ignacio Sánchez-Cohen

Miguel Agustín Velásquez-Valle

José Luis González-Barrios

Elasticidad-precio de corto y largo plazo de la demanda de agua residencial de una zona árida. Caso de estudio: La Paz, B.C.S., México

Gerzain Avilés-Polanco

Marco A. Almendarez-Hernández

Víctor Hernández-Trejo

Luis Felipe Beltrán-Morales

Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México

Juan Gabriel Brigido

Iouri Nikolskii

Liliana Terrazas

Sergio Santiago Herrera

Validación del modelo ClimGen en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos

Gerardo Esquivel

Julían Cerano

Ignacio Sánchez

Armando López

Oscar G. Gutiérrez

Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo

Fidencio Cruz-Bautista

Alejandro Zermeño-González

Vicente Álvarez-Reyna

Pedro Cano-Ríos

Miguel Rivera-González

Mario Siller-González

Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional

Mauro Iñiguez-Covarrubias

Jorge Flores-Velazquez

Waldo Ojeda-Bustamante

Carlos Díaz-Delgado

Roberto Mercado-Escalante

## Notas técnicas

Ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG con momentos  $L$  depurados (1,0)

Daniel Francisco Campos-Aranda

## Discusión

### Guía para colaboradores

## Technical articles

*Streamflow Forecasting for the Turbio River using the Discrete Kalman Filter*

Fernando González-Leiva

Laura Alicia Ibáñez-Castillo

Juan B. Valdés

Mario Alberto Vázquez-Peña

Agustín Ruiz-García

5

*Hydraulic Similarities among the High Andean Hydrological Systems and Transfer of Hydrometeorological*

Oswaldo Ortiz-Vera

25

*Hydrological Modeling based on Rainfall Estimates using Hydrometeorological Sensors*

Iván Vilchis-Mata

Khalidou M. Bâ

Roberto Franco-Plata

Carlos Díaz-Delgado

45

*Metal Concentrations in Water and Sediments in the Upper Grijalva River Basin, Mexico-Guatemala border*

Rafaela María Laino-Guane

Ricardo Bello-Mendoza

Mario González-Espinosa

Neptalí Ramírez-Marcial

Francisco Jiménez-Otárola

Karim Musálem-Castillejos

61

*Land Use Changes and their Effects on GHG Dynamics in the State of Durango*

Palmira Bueno-Hurtado

Armando López-Santos

Ignacio Sánchez-Cohen

Miguel Agustín Velásquez-Valle

José Luis González-Barrios

75

*Short-and Long-Term Price Elasticity of Residential Water Demand in an Arid Region. Case Study of La Paz, BCS, Mexico*

Gerzain Avilés-Polanco

Marco A. Almendarez-Hernández

Víctor Hernández-Trejo

Luis Felipe Beltrán-Morales

85

*Estimate of the Impact of Climate Change on Soil Fertility and Coffee Production in Veracruz, Mexico*

Juan Gabriel Brigido

Iouri Nikolskii

Liliana Terrazas

Sergio Santiago Herrera

101

*Validation of the ClimGen Model to Estimate Climate Variables when Lacking Data for Modeling Processes*

Gerardo Esquivel

Julían Cerano

Ignacio Sánchez

Armando López

Oscar G. Gutiérrez

117

*Modeling to Estimate the Dimensions of the Wet Bulb in Trickle Irrigation*

Fidencio Cruz-Bautista

Alejandro Zermeño-González

Vicente Álvarez-Reyna

Pedro Cano-Ríos

Miguel Rivera-González

Mario Siller-González

131

*Comparison of Venturi Tube-Meter Experimental Data with Computational Fluid Dynamics Simulations*

Mauro Iñiguez-Covarrubias

Jorge Flores-Velazquez

Waldo Ojeda-Bustamante

Carlos Díaz-Delgado

Roberto Mercado-Escalante

141

## Technical notes

*Fitting of GPA, GLO and GEV distributions with trimmed L-moments (1,0)*

Daniel Francisco Campos-Aranda

153

## Discussion

### Contributor's guide

169

171

