

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 termale 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 km²; 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, Elsaadini 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

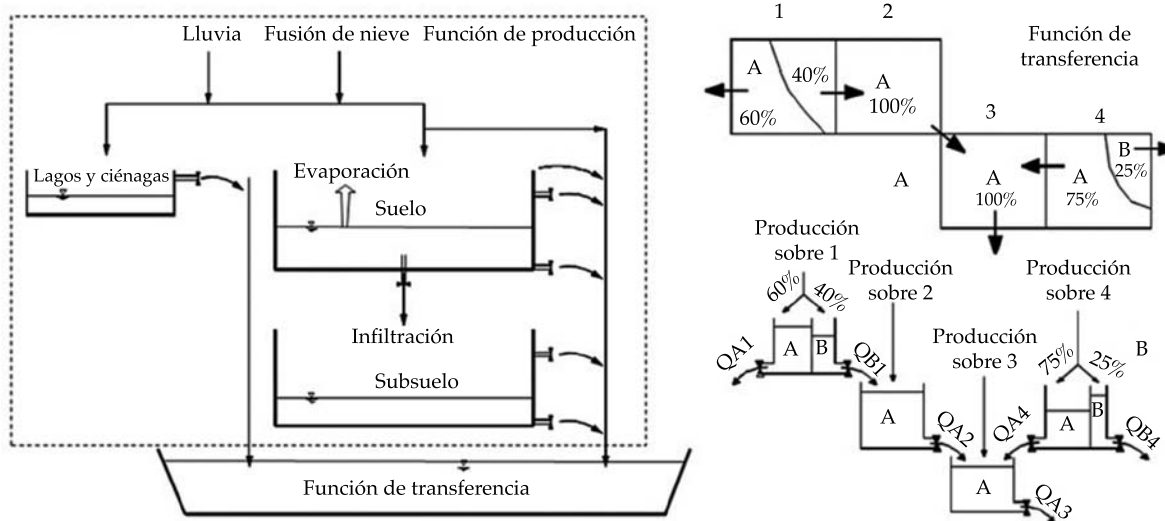


Figura 1. Función de producción (izquierda) y función de transferencia (derecha) del modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU (modificada de Morin & Paquet, 2007).

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

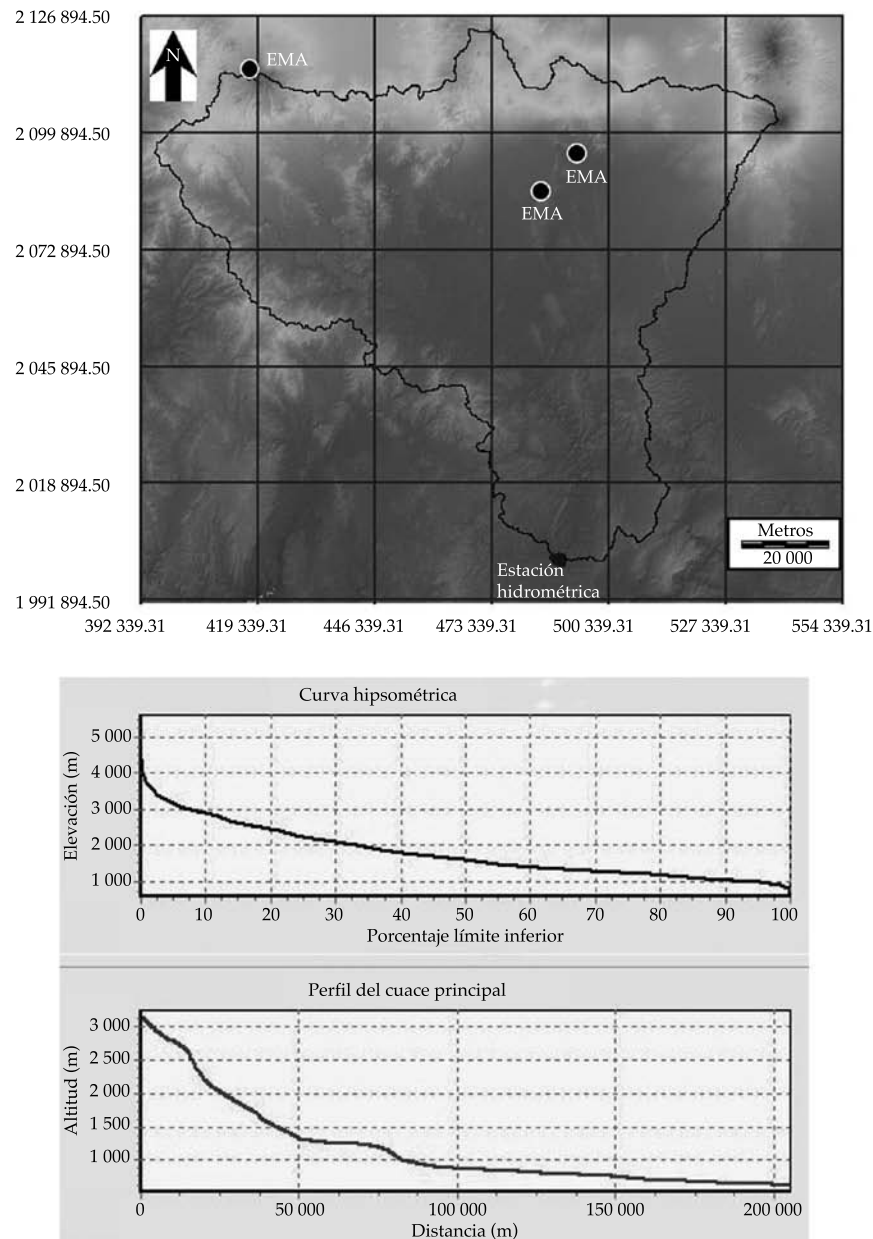


Figura 2. Delimitación, ubicación de EMA, curva hipsométrica y perfil de la cuenca hasta la estación hidrométrica Atenango del Río.

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

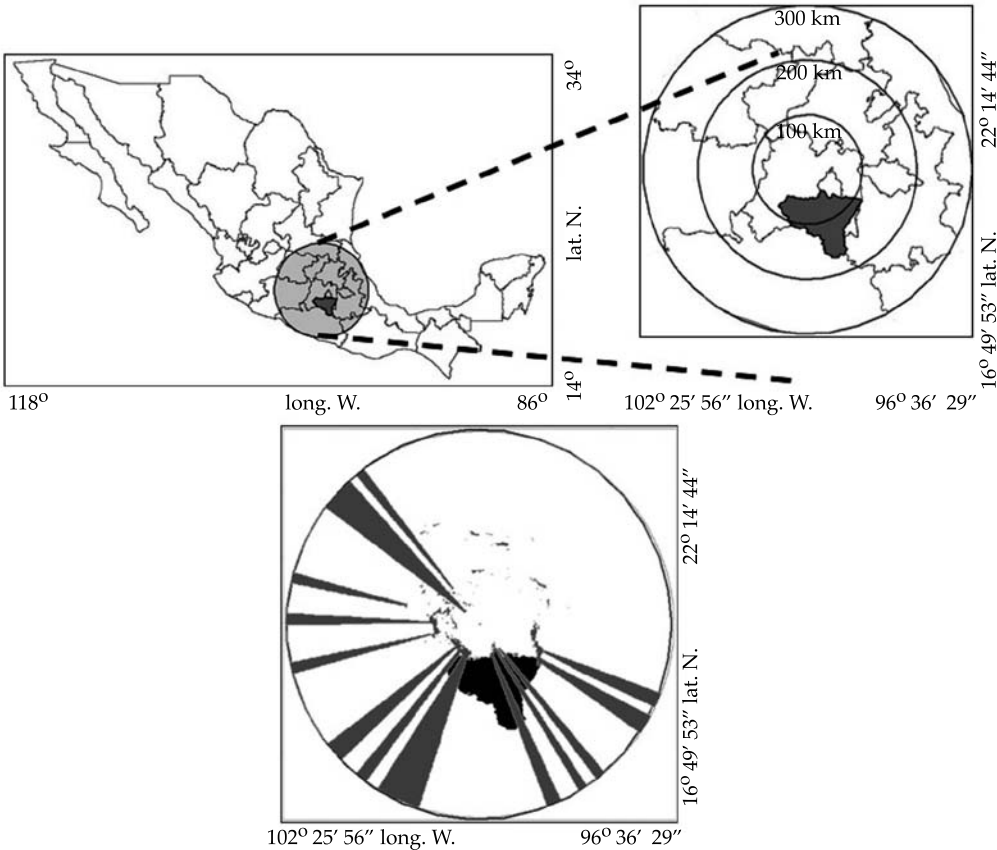


Figura 3. Ubicación de la cuenca en el radio de influencia del radar de Cerro Cathedral y afectaciones por bloqueos orográficos.

Cuadro 2. Caudales interanuales medios diarios.

Fuente de información	Caudal observado (m³/s)	Caudal calculado (m³/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 (m³/s)	Caudal calculado (m³/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 (m³/s)	Caudal calculado (m³/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 (m³/s)	Caudal calculado (m³/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 km², 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-

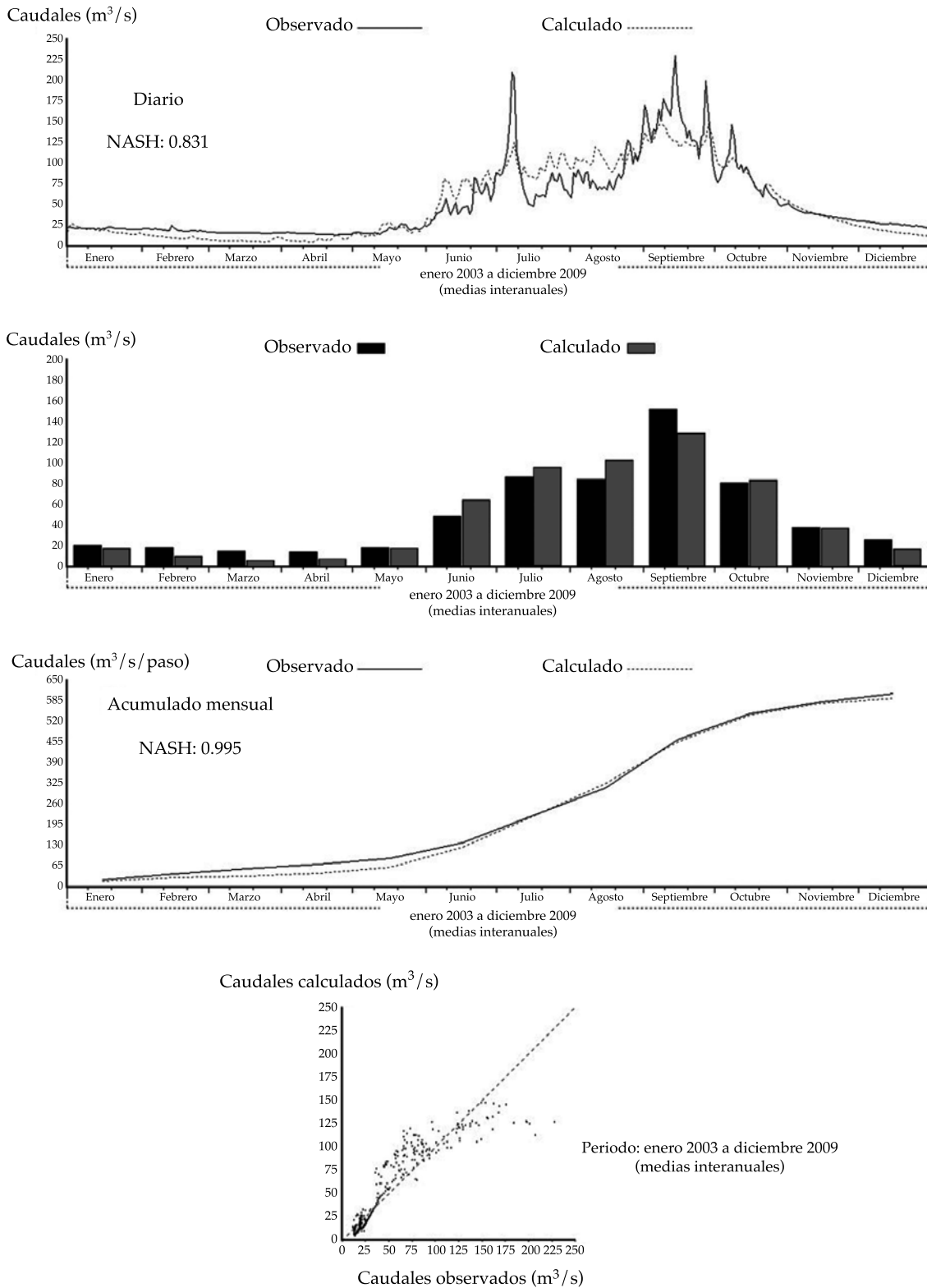


Figura 4. Histogramas e hidrogramas con EMA.

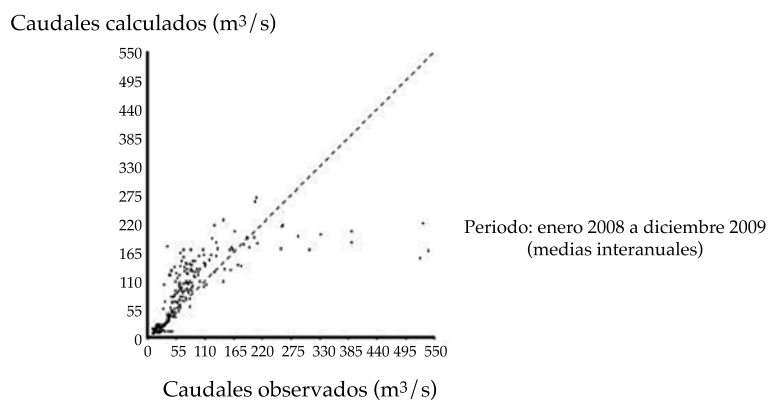
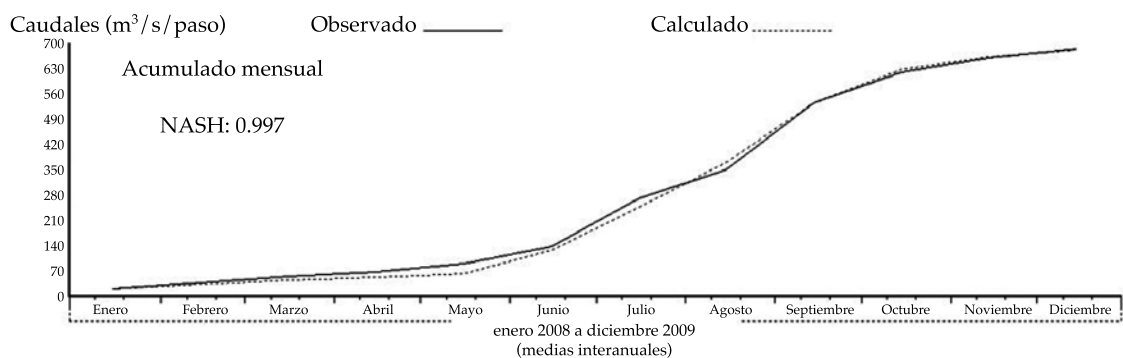
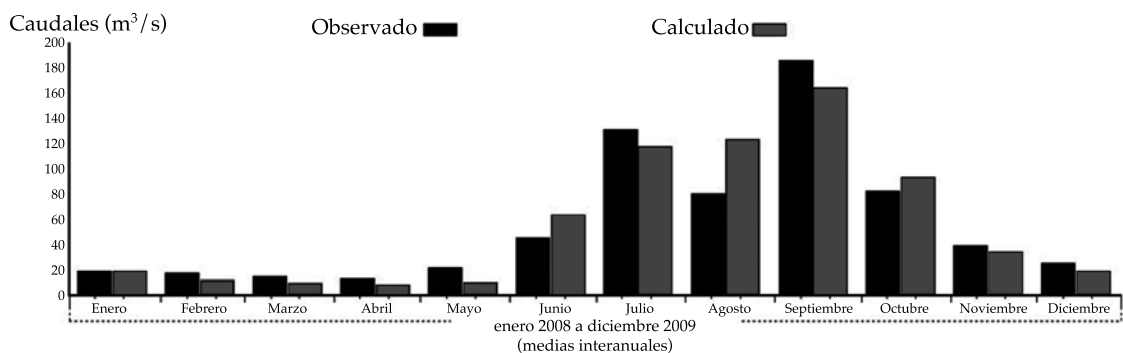
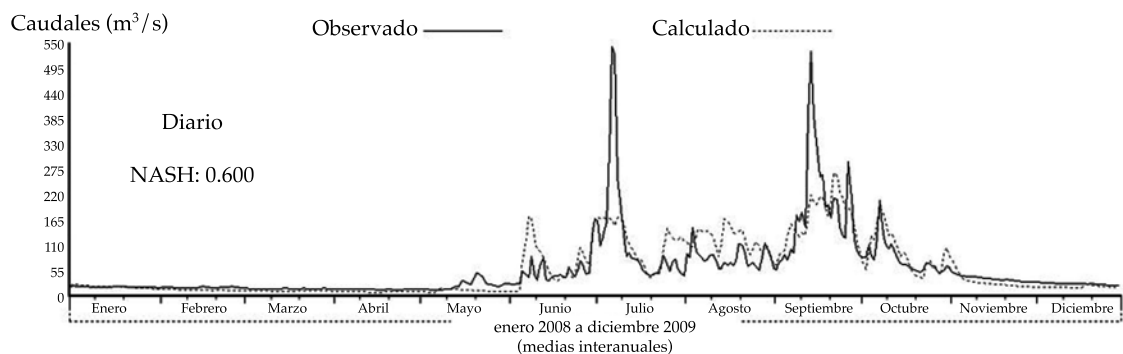


Figura 5. Histogramas e hidrogramas con imágenes radar (interanuales, 2008-2009).

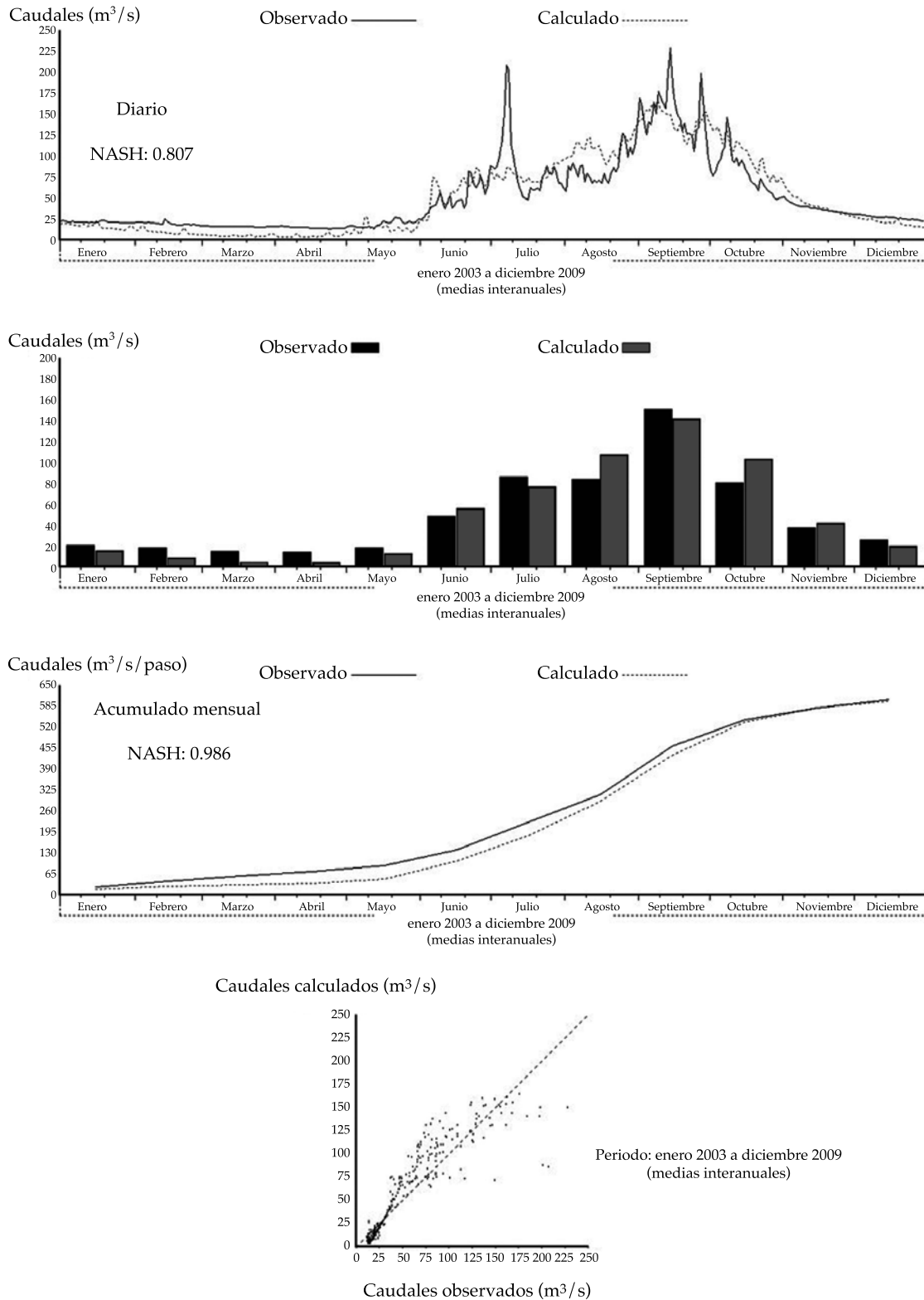


Figura 6. Histogramas e hidrogramas con imágenes *PERSIANN* (interanuales, 2003-2009).

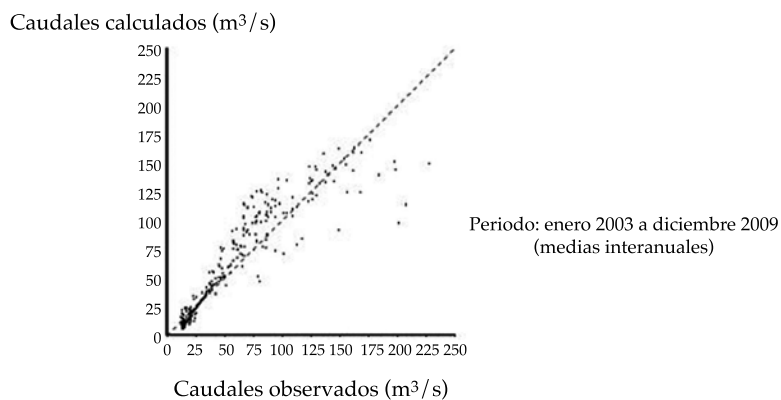
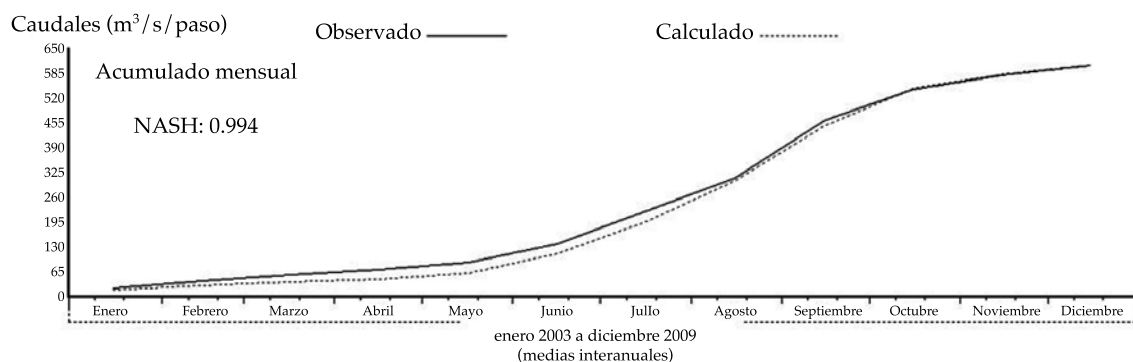
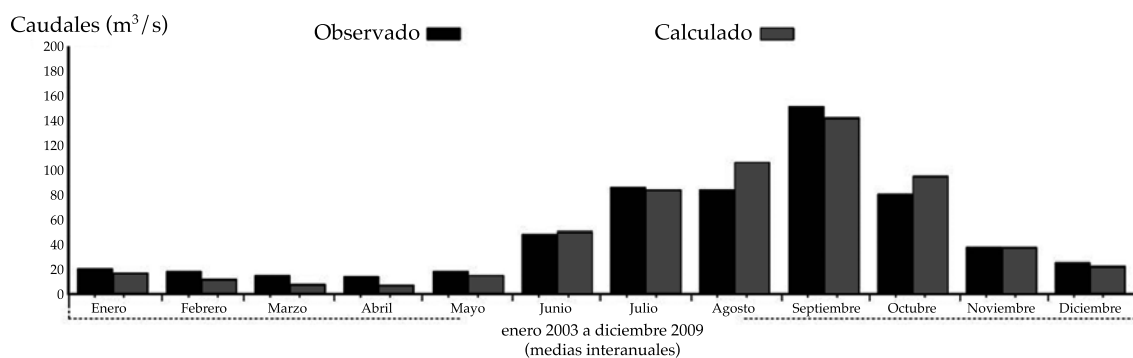
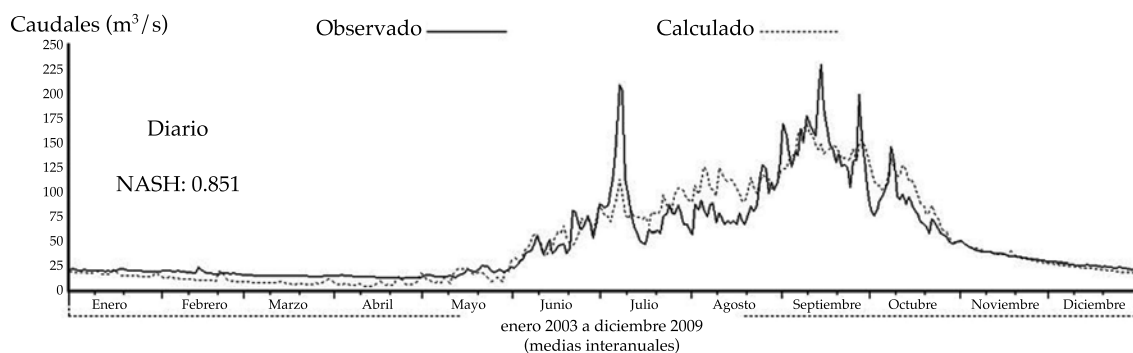


Figura 7. Histogramas e hidrogramas con imágenes CMORPH (interanuales, 2003-2009).

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. Hydrometeor.*, 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