Cheikh Fall (Coordinador)



SIVEA

Primera edición: enero 2015

Este libro contó con el aval de revisores externos conforme a los criterios editoriales de la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados

El contenido de esta publicación es responsabilidad de los autores.

D. R. © Universidad Autónoma del Estado de México Avenida Instituto Literario 100, Col. Centro Toluca, Estado de México, C.P. 50000

ISBN: 978-607-422-568-6

Impreso y hecho en México

Printed and made in Mexico

La reproducción parcial o total de contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización por escrito del editor en términos de la Ley Federal de Derecho de Autor y en su caso de los tratados internacionales aplicables, viola derechos reservados.

# Modelo hidrológico para la simulación de caudales diarios de una cuenca con la ayuda de un sig

V. Díaz-Mercado<sup>1</sup>, K. M. Bâ<sup>1</sup>, E. Quentin<sup>2</sup>, F. H. Ortiz-Madrid<sup>1</sup> y L. Gama<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

<sup>2</sup> Centro de Recursos Idrisi (CRI-UNL), Universidad Nacional de Loja, Ecuador

<sup>3</sup> División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

#### Resumen

a modelación hidrológica es una herramienta esencial en la evaluación de los recursos del agua en las cuencas hidrológicas, el tiempo invertido para tal propósito depende de la estructura del modelo hidrológico elegido, de la cantidad y calidad de la información requerida, y de los esfuerzos invertidos en la calibración. El modelo CEQUEAU, es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos. La cuenca se divide en celdas y el proceso lluviaescurrimiento se simula celda por celda hasta la salida. Los avances recientes en la geomática, permite el desarrollo de módulos integrados en los sistemas de información geográfica (SIG), para facilitar el procesamiento de la información requerida por los modelos hidrológicos. El objetivo de la presente investigación, consistió en implementar el modelo CEQUEAU en el sig Idrisi para la modelación hidrológica de cuencas, reduciendo con ello, los tiempos en el procesamiento de la información y dedicando más atención a la calibración de los resultados. En este documento, se muestran los resultados de la implementación del modelo CEQUEAU, la cual refiere a la modelación del flujo vertical (lluvia, evapotranspiración, infiltración, etc.) en cada uno de los tres recipientes que considera el

modelo: lagos y ciénegas, suelo y acuífero, así como la transferencia del volumen de agua correspondiente al caudal en cada celda hasta la salida de la cuenca.

#### Palabras claves:

Modelación hidrológica. Simulación de caudales. SIG.

#### Introducción

El conocimiento sistemático de la fase terrestre del ciclo hidrológico, la complejidad de éste y la dificultad para obtener observaciones meteorológicas e hidrométricas exactas y detalladas, sobre grandes áreas de las cuencas de drenaje, son las principales razones por las cuales la hidrología superficial ha alcanzado considerablemente su desarrollo como ciencia (Campos-Aranda, 1994).

De la necesidad de estimar las magnitudes de las variables que intervienen en el ciclo del agua, surgen los modelos hidrológicos. Un modelo, es útil para resolver un importante número de estudios hidrológicos tales como: la reconstitución y generación de series largas de datos, la detección de errores de observaciones, la previsión de eventos extremos, la estimación de caudales en puntos no aforados, la operación de embalses, la realización de estudios ambientales, etcétera. Con enfoques multidisciplinarios, los modelos hidrológicos son útiles en la simulación de la calidad del agua, ejemplo de ello son los modelos de simulación del transporte de contaminantes y los de simulación de los niveles de un acuífero en zonas agrícolas, entre otros (Bâ et al., 2001).

El desarrollo de la computación ha estimulado la generación de modelos hidrológicos distribuidos (MHD) desde los años setenta. La investigación en MHD sobre grandes regiones, se basa en la investigación hidrológica de procesos (Venneker y Bruijinzeel, 1997). De esta manera, se construyen modelos hidrológicos de macroescala, los cuales pueden ser ejecutados en forma repetida sobre grandes áreas geográficas (Arnell, 1999).

Los MHD se han utilizado para evaluar las condiciones hidrológicas (escurrimiento, infiltración, recarga de acuíferos), el estado de la vegetación (densidad, calidad), y el cambio climático en amplias regiones geográficas. De hecho, los modelos distribuidos pueden aplicarse a cualquier clase de problema hidrológico,

incluidas las predicciones en cuencas no instrumentadas (Magaña-Hernández, 2008).

La utilización de los sig en el modelado hidrológico, se ha vuelto más evidente en las últimas décadas. Por ejemplo, en 1998, el Centro de Investigación en Recursos Hídricos (CRWR) de la Universidad de Texas creó el CRWR-PrePro, un pre-procesador en ArcView que extrae información de datos espaciales digitales y la dispone para ser usada por el software hidrológico HEC-HMS, el cual estima caudales (Olivera et al., 1998; Olivera y Maidment, 1999).

Por su parte, Molnar y Julien (2000) modelaron el escurrimiento en una cuenca con el modelo distribuido CASCA2D. Fortin *et al.* (2001a, 2001b) desarrollaron el modelo distribuido HYDROTEL con el objetivo de que fuera compatible con los sig y lo aplicaron a la cuenca del río Chaudière (Canadá). Chávez y Estrada (2005) desarrollaron en el Centro de Recursos Idrisi México (CRI-Méx) una interfaz entre el modelo CEQUEAU y el sig ArcView, la cual permite extraer la información requerida para la simulación de caudales; en el mismo centro, Guerra-Cobián (2008) implemento una rutina en el sig Idrisi, capaz de extraer la información necesaria requerida por el modelo CEQUEAU que simula caudales.

Es evidente que, a lo largo de las últimas tres décadas se han desarrollado significativamente los modelos hidrológicos, esto propiciado principalmente por tres factores: 1) los avances tecnológicos en los sistemas de información geográfica (SIG); 2) la disponibilidad de modelos digitales de altitud (DEM, por sus siglas en inglés) utilizados en los SIG; y 3) la disponibilidad de diversas bases de datos digitales (climatológicas e hidrométricas); lo anterior ha permitido, paulatinamente, obtener los parámetros requeridos por los modelos hidrológicos, de una manera más rápida y precisa (He y Croley II, 2007). La calidad de los resultados, está en función de la precisión de los datos de entrada y del grado con en el que la estructura del modelo representa correctamente los procesos hidrológicos del problema estudiado (Campos-Aranda, 1998).

### **Objetivos**

El objetivo general de esta investigación es, implementar el modelo de parámetros distribuidos CEQUEAU en el sistema de información geográfica Idrisi y aplicar dicho modelo en el estudio de una cuenca hidrológica, para analizar la eficiencia y rapidez de esta nueva herramienta en la simulación de caudales.

Los objetivos específicos son: el implementar en un marco geomático, el modelo de parámetros distribuidos CEQUEAU para que sea una aplicación adicional

del sistema de información geográfica (SIG) Idrisi; analizar la información de ocupación de suelo e hidrometeorológica disponible en una cuenca de estudio, para organizar y generar la base de geodatos; aplicar el modelo hidrológico implementado en Idrisi en una cuenca; analizar los resultados de las simulaciones hidrométricas.

### Materiales y métodos

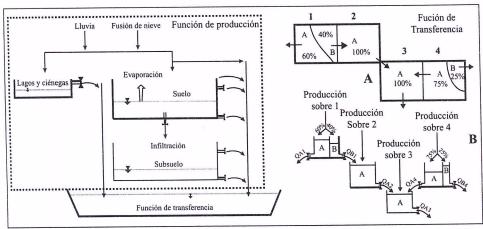
### Modelo hidrológico CEQUEAU

Este modelo fue desarrollado en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU, ahora INRS-ETE) de la Universidad de Québec, Canadá, para reproducir el escurrimiento de una cuenca (Morin y Paquet, 2007). Ha sido utilizado en diferentes países para simulaciones continuas de caudales o para la previsión hidrológica con fines de gestión de embalses (Llanos *et al.*, 1999; Ayadi y Bargaoui, 1998; Bâ *et al.*, 2001; Magaña, 2008; Guerra-Cobian, 2008). Es un modelo de parámetros distribuidos, donde 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. El modelo consta de dos partes para simular el flujo vertical y horizontal del agua en cada cuadro (Fig. 13.1), 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.), esta función, está orientada a obtener un volumen de agua en cada uno de los tres recipientes que considera el modelo: lagos y ciénegas, 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, toma en cuenta la influencia de lagos, ciénagas, presas, derivaciones, entre otras. El modelo examina cada parcela a intervalos de tiempo definidos, éstos puede ser de un día

o incluso de una hora.

Fig. 13.1 Función de producción (izquierda) y función de transferencia (derecha) del modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU (modificada de Morin y Paquet, 2007).



Fuente: Morin y Paquet (2007).

La evapotranspiración se estima a partir de la fórmula de Thornthwaite modificada (Morin y Paquet, 2007), los cálculos se realizan en intervalos de tiempo indicados por el usuario. De acuerdo con la ilustración de la Fig. 13.1, 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. Estos parámetros gobiernan el comportamiento del flujo de agua en los tres recipientes (lagos y ciénegas, suelo y acuífero), fusión de nieve, evapotranspiración y transferencia.

Los datos de entrada requeridos por el modelo son de dos tipos: fisiográficos e hidrometeorológicos, esta información se procesa para cada una de las parcelas en las que se discretiza la cuenca. Es recomendable que para la etapa de calibración del modelo (estimación de parámetros) se empleen dos terceras partes de los datos hidrométricos y para la etapa de validación, la restante tercera parte (Llamas, 1993).

El modelo cuenta con una aplicación para la optimización de los parámetros del modelo, el algoritmo está basado en el método de Powell (1964), cuya función objetivo es el coeficiente de Nash (1970) o el coeficiente de correlación (r), las ecuaciones de cálculo se muestran en las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Qc_{i} - Qo_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Qo_{i} - \overline{Q}o)^{2}}$$
 [1]

$$r = \frac{n\sum_{i=1}^{n} (Qo_{i}Qc_{i}) - \left(\sum_{i=1}^{n} Qo_{i}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} Qc_{i}\right)}{\sqrt{n\left(\sum_{i=1}^{n} Qo_{i}^{2}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} Qo_{i}^{2}\right) - \sqrt{n\left(\sum_{i=1}^{n} Qc_{i}^{2}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} Qc_{i}^{2}\right)^{2}}}}$$
[2]

Donde el coeficiente de Nash es adimensional;  $Q_i$  es el caudal calculado en el día i (m³/s);  $Q_i$  es el caudal observado del día i (m³/s) y  $\overline{Q}_i$  es el promedio de los n caudales observados (m³/s). El dominio del coeficiente de Nash va de -∞ a 1, el valor de 1 corresponde a una simulación perfecta.

### Metodología

Para la implementación del modelo CEQUEAU en Idrisi, se siguió la metodología para el desarrollo de módulos geomáticos propuesta por Quentin *et al.* (2007):

- 1) Se *conceptualizó* el modelo hidrológico para su incorporación en un ambiente SIG. Esto significa principalmente, considerar la variabilidad espacial de la información (lluvias, temperaturas, uso de suelo).
- 2) A partir del modelo conceptual se elaboró el *modelo geomático*, considerando las estructuras y tipos de operaciones disponibles en el SIG. Es posible construir diferentes modelos geomáticos con un mismo modelo conceptual, por ello fue necesario identificar el de mayor utilidad según los objetivos y requerimientos planteados.
- 3) Se implementó el modelo como *módulo geomático* del SIG, es decir, se construyó el algoritmo escrito en lenguaje de programación.
- 4) Finalmente, se probó el modelo hidrológico implementado, considerando aplicaciones variadas para corregir el algoritmo y validar los resultados.

### Implementación del modelo CEQUEAU en Idrisi

El modelo hidrológico CEQUEAU está escrito en lenguaje Fortran y las aplicaciones en Idrisi se implantan en Delphi, por ello fue necesario el análisis de los algoritmos referentes al modelo hidrológico para facilitar la implementación en Delphi.

Se aumentó del número de cuadros (parcelas) en los que se puede discretizar una cuenca, ya que el modelo hidrológico CEQUEAU está limitado el uso a máximo 1,000 cuadros, sin embargo, ahora puede discretizarse la cuenca hasta el tamaño de la celda (pixel), por lo que, las dimensiones del cuadro estarían definidas por la resolución del archivo matricial (tamaño de píxel).

El límite de estaciones meteorológicas se incrementó, ya que anteriormente sólo se podía interpolar la información de hasta 100 estaciones, lo que resultaba ser un inconveniente cuando se contaba con un número mayor. Sin embargo, ahora se puede procesar la información del número de estaciones que se disponga. También, es posible utilizar la información meteorológica estimada con radar o satélite.

El modelo CEQUEAU, toma en cuenta el efecto del uso de suelo (bosque, lagos y ciénegas) en la función de transferencia de manera constante, es decir, para todo el periodo de simulación se considera un sólo archivo fisiográfico, con esto, se asume que las superficies de bosques, lagos y cienegas permanecen inalteradas con el paso del tiempo. En el modelo CEQUEAU implementado en Idrisi, es posible el uso de más de un archivo fisiográfico.

La fórmula de Thornthwaite modificada (Morin y Paquet, 2007), es el único método que el modelo CEQUEAU utiliza para estimar la evapotranspiración, ahora se implementaron cuatro criterios más: Makkink, Turc, Hargreaves-Samani y Penman-Monteith FAO 56. Los tres primeros métodos que se mencionan, se implementaron por ser considerados los de mayor aplicabilidad en los diferentes ambientes climáticos de México y el último de ellos, por tener el carácter de ser el más confiable de los métodos de evapotranspiración (Campos-Aranda, 2005).

### Base de geodatos propuesta

Para el desarrollo de cualquier herramienta con la cual se pretenda realizar diferentes aplicaciones, es necesario definir las fuentes de extracción de la información de entrada, pues sin estos datos, es imposible su uso. En la presente investigación, se proponen y consideran cuatro fuentes, de donde es posible obtener la información de entrada del modelo CEQUEAU implementado en el sig Idrisi: CLICOM, BANDAS, USGS, CONABIO.

### Datos meteorológicos

Las precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas diarias, se obtienen de la base de datos CLICOM (2009), misma que puede adquirirse en el Servicio Meteorológico

Nacional (SMN). CLICOM es la base del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) en su versión 2 y 3.

#### Datos hidrométricos

Los datos hidrométricos se toman del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2000), esta base de datos se obtiene en el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA).

#### Modelo numérico de altitud (MNA)

La topografía de la zona de estudio es representada por una imagen de Modelo Numérico de Altitud (MNA) generada por la US Geological Survey (USGS), a través de imágenes de radar (Brown *et al.*, 2005). La información es del tipo raster (matricial) con una resolución de 90 m x 90 m. La imagen del MNA se descarga del sitio de la USGS (http://seamless.usgs.gov/), introduciendo las coordenadas geográficas del polígono de estudio.

#### Uso de suelo

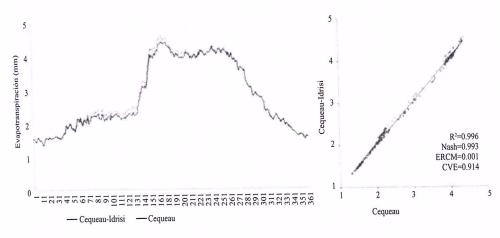
Para la imagen de uso de suelo del territorio mexicano, se usan las imagenes de uso de suelo elaborados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), son de tipo vectorial a escala 1:250,000 la comisión los elaboró digitalizando las cartas topográficas de la República Mexicana a dicha escala. La CONABIO desarrolló un sitio interactivo de descarga desde donde se puede obtener la información (http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/).

### Resultados de la implementación

Una vez que se implementó el modelo hidrológico CEQUEAU en Idrisi, se realizaron pruebas para comprobar su correcto funcionamiento, estas consistieron en comparar los resultados obtenidos con dicha aplicación y los que arroja el modelo original, para un mismo conjunto de datos de entrada. En las Fig. 13.2, 13. 3, 13.4 y 13.5 se muestran respectivamente, las evapotranspiraciones, los niveles de agua en los recipientes suelo (*HS*) y acuífero (*HN*), así como los caudales calculados con el modelo CEQUEAU y el implementado en Idrisi, en todos los casos, se tiene coeficientes de

determinación  $(R^2)$  y coeficientes de Nash, muy cercanos a la unidad, con lo que se comprueba la correcta implementación del modelo hidrológico.

Fig. 13.2 Comparación entre la evapotranspiración interanual (mm) calculada con el modelo Cequeau y el implementado en Idrisi.



Fuente: Díaz-Mercado (2010).

Fig. 13.3 Comparación entre el nivel de agua HS interanual (mm) calculado con el modelo Cequeau y el implementado en Idrisi.

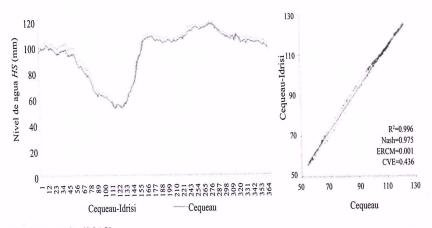
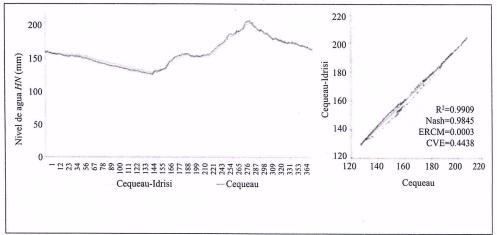
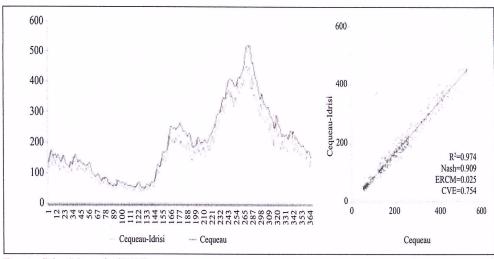


Fig. 13.4 Comparación entre el nivel de agua HN interanual (mm) calculado con el modelo Cequeau y el implementado en Idrisi.



Fuente: Díaz-Mercado (2010).

Fig. 13.5 Comparación entre los caudales interanuales (mm) calculados con el modelo Cequeau y el implementado en Idrisi.



### Aplicación

El modelo hidrológico CEQUEAU implementado en Idrisi, se utilizó para la simulación de los caudales diarios de la cuenca del río La Sierra (Fig. 13.6), tiene su origen en el altiplano central de Chiapas, con una longitud de 227 km y una pendiente media de 0.96 %. La cuenca es alargada, exorreica de orden 5, aguas arriba es de relieves altos, y en la salida es plana, tiene una superficie de 4,800 km² y un perímetro de 686 km, se encuentra ubicada en la región hidrológica No.30 Grijalva-Usumacinta, el régimen de precipitación anual de la zona es de 4,000 mm.

En la Fig. 13.7, se muestra una imagen compuesta del MNA de la zona de estudio con proyección UTM zona 15 y resolución de 50 m x 50 m. En la Fig. 13.8, se presenta la imagen de uso de suelo en formato matricial (raster), reclasificado según los usos de suelo que considera el modelo hidrológico CEQUEAU: 1) cuerpos de agua, 2) bosques, 3) ciénegas y 4) otros.

Fig. 13.6 Cuenca del río "La Sierra" ubicada en la región hidrológica No.30 Grijalva-Usumacinta, se encuentra entre los estados de Chiapas y Tabasco en la República Mexicana.

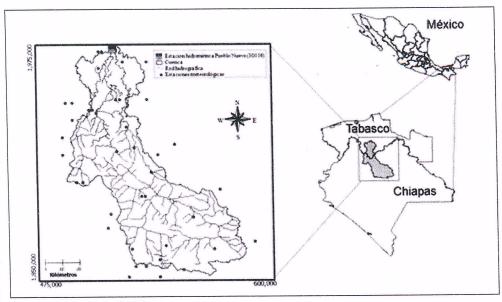
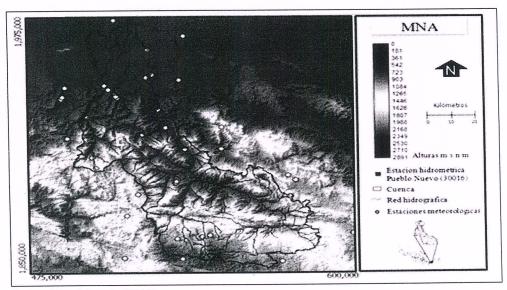
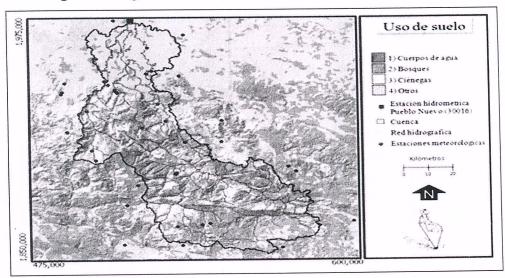


Fig. 13.7 Imagen compuesta del MNA, cuenca y red hidrográfica del río "La Sierra".



Fuente: Díaz-Mercado (2010).

Fig. 13.8 Imagen de uso de suelo de la cuenca del río "La Sierra".



### Resultados de la aplicación

Las Fig. 13.9 y 13.10, muestran los resultados de la simulación de los caudales diarios interanuales y mensuales medios respectivamente, de la cuenca del río La Sierra, usando el método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. La simulación resulta ser satisfactoria, pues para el caso de los caudales diarios interanuales se tuvo un coeficiente de Nash en todo el periodo de 0.88 y para el caso de los caudales medios mensuales el coeficiente de Nash fue de 0.89.

Se muestran los resultados de la simulación de los caudales diarios interanuales y mensuales medios respectivamente en las Fig. 13.11 y 13.12, empleando el método de Penman-Monteith FAO 56 en el cálculo de la evapotranspiración. La simulación resulta ser satisfactoria, ya que para el caso de los caudales diarios interanuales se tuvo un coeficiente de Nash para todo el periodo de 0.83 y en el caso de los caudales medios mensuales el coeficiente de Nash fue de 0.84.

Los resultados del coeficiente Nosh para el caso del método de Penman-Monteith FAO 56 son menores que los correspondientes a la simulación con el método de Thornthwaite, sin embargo, para tal simulación se calibró el método de evapotranspiración, situación que no se efectuó para el caso de Penman-Monteith FAO 56, además, este método ha demostrado tener una aplicación mayor bajo diferentes climas y latitudes (Allen *et al.*, 2006) que el método de Thornthwaite, por lo que, con una mayor calibración los resultados mejoraran.

Fig. 13.9 Caudales diarios interanuales (m³/seg) calculados y observados en la estación Pueblo Nuevo (30016), con el modelo hidrológico Cequeau implementado, método de Thornthwaite.

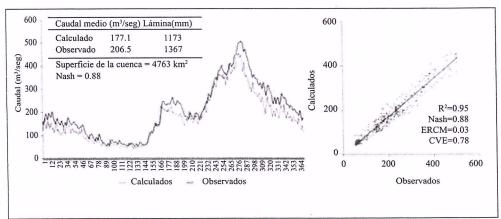
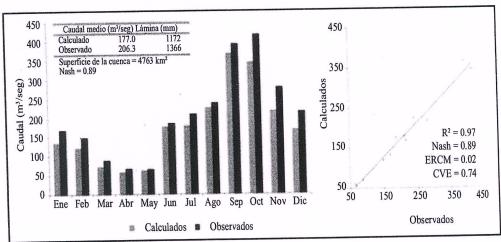


Fig. 13.10 Caudales medios mensuales (m³/seg) calculados y observados en la estación Pueblo Nuevo (30016), con el modelo hidrológico Cequeau implementado, método de Thornthwaite.



Fuente: Díaz-Mercado (2010).

Fig. 13.11 Caudales diarios interanuales (m³/seg) calculados y observados en la estación Pueblo Nuevo (30016), con el modelo hidrológico Cequeau implementado, método de Penman-Monteith FAO 56.

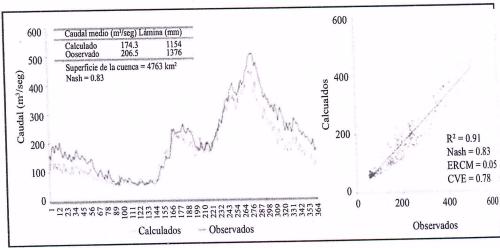
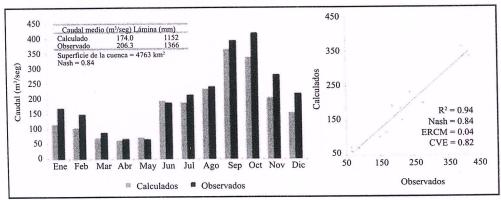


Fig. 13.12 Caudales medios mensuales (m³/seg) calculados y observados en la estación Pueblo Nuevo (30016), con el modelo hidrológico Cequeau implementado, método de Penman-Monteith FAO 56.



Fuente: Díaz-Mercado (2010).

#### **Conclusiones**

Se implementó el modelo hidrológico CEQUEAU en Idrisi, tomando en cuenta la necesidad de poder utilizar la información de todas las estaciones meteorológicas de las que se dispongan datos, el discretizar la cuenca en más de 1,000 cuadros, el emplear otros métodos de evapotranspiración y el analizar el efecto de la variabilidad fisiográfica.

En la estimación de la evapotranspiración, fue posible implementar varios métodos de cálculo, considerando un mínimo de información necesaria para el análisis, como son temperaturas máximas y mínimas, así como, la ubicación geográfica de la zona de estudio. Además del método de Thornthwaite, que lo considera el modelo hidrológico CEQUEAU, se eligió, aquellos métodos que mejor se adaptan a las características climáticas de México: Penman-Monteith FAO 56, Hargreaves-Samani, Turc y Makkink.

La disponibilidad de la información espacialmente distribuida, los datos hidrometeorológicos, así como, el Modelo Numérico de Altitud (MNA), ayudaron a generar la base de geodatos requerida en el estudio. Con lo cual, fue posible el desarrollo y aplicación del modelo hidrológico CEQUEAU, implementado en Idrisi.

Se cumplió con el objetivo principal, que fue implementar el modelo de parámetros distribuidos CEQUEAU en Idrisi y se aplicó dicho modelo, en el estudio de

una cuenca hidrológica bajo diferentes escenarios de estudio. Además, se analizó la eficiencia de esta nueva herramienta en la simulación de caudales obteniendo resultados satisfactorios (coeficientes de Nash de 0.83 a 0.88, respecto a los caudales diarios interanuales).

### Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar estudios de maestría. Por otro lado, este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CONACyT 90637 y el proyecto UAEM2752/2009 auspiciado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

#### Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Dirk, R., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua para los cultivos. FAO. Roma.
- Arnell, N. W. (1999). "A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain", en Journal of Hydrology (217), 314-335.
- Ayadi, M., y Bargaoui, Z. (1998). «Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUeau", en Journal des Sciences Hydrologiques, 43 (5), 741-758.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., y Rodríguez-Osorio, V. (2001). "Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de Mexico", en México. Ingeniería Hidráulica en México (IHM), XVI (4), 117-126.
- BANDAS (2000). "Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales", Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Comisión Nacional del Agua, México, Discos Compactos.
- Brown, C. G., Sarabandi, K., Pierce, L. E. (2005). "Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data", en IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 43, No. 8, pp. 1707-1715.
- Campos-Aranda, D. F. (2005). "Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana", en Ingeniería Hidráulica en México (IHM), XX (3), 99-110.
- Campos-Aranda, D. F. (1994). "Modelo matemático determinístico para pronóstico de crecientes en cuencas rurales", en Ingeniería Hidráulica en México, IX (1), 43-62.

- Campos-Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosi, México: Editorial Universitaria Potosina, Tercera reimpresión.
- Chávez, M. I., y Estrada, B. (2005). Programación de una interfaz entre el modelo hidrológico CEQUEAU y el sig ArcView. Tesis de licenciatura, Universidad
- Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Toluca, México.
- CONABIO (s.f.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Consultado el 25 de junio de 2009, http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/.
- CLICOM (2009). Climating Computing Program, Base de Datos Meteorológicos, Servicio Meteorológico Nacional, México.
- Díaz Mercado, V. (2010), Diseño geomático del modelo hidrológico CEQUEAU para cuencas no controladas. Tesis de maestría, Universidad Autonoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Toluca.
- Fortin, J. P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., y Villeneuve, J. P. (2001b). "A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data II: Application to Chaudiere watershed", en J. Hydrologic Eng., 6 (2), 100–108.
- Fortin, J. P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., y Villeneuve, J. P. (2001a). "A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model", en J. Hydrologic Eng., 6 (2), 91–99.
- Guerra-Cobián, V. H. (2008). Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU. Tesis doctoral, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Toluca, México.
- He, C., y Croley II, T. E. (2007). "Application of a distributed large basin runoff model in the Great Lakes basin", en Control Engineering Practice, 15, 1001-1011.
- Llamas, J. (1993). Hidrología General Principios y Aplicaciones. España: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Llanos, H., Bâ, K. M., y Castiella, A. (1999). "Modelación Hidrológica de la Cuenca Alta del Río Ega (País Vasco y Navarra)", en Ingeniería del Agua, 6 (3), 241-250.
- Magaña-Hernández, F. (2008). Obtención de caudales en sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa utilizando el modelo hidrológico de parámetros distribuidos Cequeau-ONU. Tesis de licensiatura, Universidad Júarez Autónoma de Tabasco, División Académica Autónoma de Tabasco, Tabasco.
- Molnar, D. K., y Julien, P. Y. (2000). "Grid-size effects on surface runoff modeling", en Journal of Hydrologic Engineering, 8-16.

- Morin, G., y Paquet, P. (2007). Modèle hydrologique CEQUEAU. rapport de recherche no R000926, INRS-ETE.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual model", en Journal of Hydrology, 10, 282-290.
- Olivera, F., y Maidment, D. R. (1999). GIS Tools for HMS Modeling Support. 1999 ESRI User's Conference, Sandiego, California.
- Olivera, F., Reed, S., y Maidment, D. R. (1998). HEC-PrePro v. 2.0: An ArcView Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System. 1998 ESRI User's Conference july 25-31, San Diego, California.
- Powell, M. J. (1964). "An efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives", en ComputerJournal, 7, 155-162.
- Quentin, E., Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M. A., Manzano-Solís, L. R., y Franco-Plata, R. (2007). "Desarrollo geomático para la gestión integrada del agua". XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (XI CONFIBSIG), 21p.
- Venneker, R. G., y Bruijinzeel, L. A. (1997). The IHE-VUA Cathment Research and Modelling Inifiafive (CRMI), The IHE-VUA Catchment research and modelling initiative CRMI-RN-001. IIHHEE, Delfl, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.

## Contenido

Prólogo	13
Explotación intensiva del acuífero del Valle de Toluca: análisis de algunos efectos económicos-ambientales	15
Comportamiento y efecto de iones nitratos en agua de uso y consumo humano, de pozos localizados en la zona urbana y rural del municipio de Toluca .	35
Balance de masa de materia orgánica en el curso alto del Río Lerma	53
Plaguicidas organoclorados en el curso alto del Río Lerma	77
Evaluación de los factores de bioacumulación y translocación de metales pesados en sombrerillo de agua (hydrocotyle ranunculoides) del curso alto del Río Lerma	97
Nuevas direcciones en vermiestabilización de lodos residuales	117
Aislamiento de bacterias resistentes y transformadoras de Cr(vi) y metil paratión	137
Electro-reducción de Cr(vI) proveniente de la industria de la galvanoplastia, empleando electrodos de diamante dopados con boro (DDB)	153
Determinación de la eficiencia de las unidades de tratamiento en un sistema de recirculación acuícola	183

Evaluación de la colmatación de un sistema de infiltración percolación como tratamiento secundario: un caso de estudio	205
Estimación del aporte de la contaminación difusa al agua superficial a escala de cuenca por medio de una metodología hidrogeomática	225
Efectos de la variabilidad climática en el cultivo de maíz de temporal: análisis exploratorio en la cuenca alta del Río Lerma (1960-2009)	253
Modelo hidrológico para la simulación de caudales diarios de una cuenca con la ayuda de un sig	275
Modelación distribuida del fenómeno lluvia-escurrimiento: análisis de sensibilidad de la discretización espacial	293
Avances en el análisis de frecuencia de valores extremos en hidrología: software y caso de estudio	313
La antropología en la planificación regional como elemento para la gestión integrada de los recursos hídricos	339
Corrosividad del agua y su estimación	367
Problemática del manganeso en agua de abastecimiento	387
Sorción de iones fluoruro fundamentos, materiales y aplicaciones	405
Procesos de sorción en carbón activado	435
Producción de carbón activado	455

Fitorremediación de contaminantes orgánicos	477
Fitorremediación de metales pesados	493
Programas de doctorado en ciencias del agua impartidos en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA)	511