

AVANCES EN CIENCIA DEL AGUA

**Cheikh Fall
(Coordinador)**



SIvEA
Sistema de Información y Vigilancia del Agua

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.

Modelación distribuida del fenómeno lluvia-escurrimiento: análisis de sensibilidad de la discretización espacial

C. Díaz Delgado¹, V. H. Guerra Cobián², K. M. Bâ¹ y E. Quentin³

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

² Centro Internacional del Agua, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Universidad Nacional de Loja, Ecuador. ³ Centro Integrado de Geomática Ambiental / Centro de Recursos Idrisi.

Resumen

El presente trabajo analiza el efecto que tiene la discretización espacial de una cuenca sobre los resultados de las simulaciones de caudal en la modelación distribuida. CEQUEAU es un modelo distribuido desarrollado en el INRS-ETE de la Universidad de Quebec, que se emplea en varios países para la modelación de los escurrimientos. El modelo discretiza la cuenca en elementos cuadrados y el balance hídrico se efectúa cuadro por cuadro tomando en cuenta las características de cada uno (precipitación, temperatura, porcentaje de lagos, porcentaje de bosque, etc.).

El objetivo del trabajo consistió en identificar criterios para determinar el tamaño de cuadro óptimo de discretización de una cuenca, bajo la condición de contar con una representación adecuada de la precipitación.

Se utilizaron 8 cuencas de diferentes tamaños y climas de la República Mexicana. Las características fisiográficas han sido determinadas a partir del SIG-Idrisi. Se calibró y validó el modelo CEQUEAU a nivel diario, con varios tamaños de cuadro, evaluando su nivel de certidumbre con los criterios numérico de Nash y gráficos. Con base en los resultados obtenidos bajo el diseño experimental elegido, se construyó un

modelo matemático de tipo regresivo para obtener el tamaño óptimo del cuadro de discretización espacial utilizando como variables explicativas parámetros fisiográficos de fácil obtención.

Palabras clave:

Discretización espacial.
modelo hidrológico distribuido.
CEQUEAU.
SIG-Idrisi.
cuenca.
caudal.
parámetros fisiográficos.

Introducción

La gestión y evaluación de los recursos hídricos en una cuenca es una función del conocimiento de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo dentro de la misma. Un modelo matemático es una herramienta que trata de simular un sistema, está formado por un conjunto de ecuaciones que representan un proceso, donde la calidad de los resultados depende de la precisión de los datos de entrada y del grado con el que la estructura del modelo representa adecuadamente el problema en estudio. Sin duda, los resultados obtenidos del modelado hidrológico dependen de diversos factores tales como: (1) una adecuada representación espacial de los procesos hidrológicos, (2) el método utilizado en la parametrización del modelo, (3) el procedimiento para estimar eficazmente los parámetros del modelo, y (4) la calidad de la información (Réménieras, 1999; Singh y Woolhiser, 2002; Guerra-Cobián *et al.*, 2011, Kumar *et al.*, 2010). Diversos estudios de modelado hidrológico destacan que la respuesta de una cuenca es sensible a la heterogeneidad espacial de sus características físicas (topografía, textura de suelo, cobertura vegetal, etc.), así como a la variabilidad espacio-temporal de los fenómenos meteorológicos (precipitación, temperatura, etc.) (Grayson y Blöschl, 2000; Bronstert *et al.*, 2002; Krajewski *et al.*, 1991; Koren *et al.*, 1999). Sin embargo, se espera que con un modelado hidrológico distribuido siempre se obtengan mejores resultados que bajo el empleo de un modelado global que no toma en consideración la variabilidad espacial de los parámetros que definen el proceso hidrológico en estudio.

Singh (1995) hace una clasificación de los modelos con base en la descripción del proceso utilizado en globales o distribuidos. Un modelo global, es aquel en que sus parámetros están promediados en toda la cuenca y no se toma en cuenta la variabilidad espacial y temporal de las características físicas de la misma. En cambio, un modelo distribuido considera la variabilidad de las características físicas, mediante una discretización espacial, la cual puede efectuarse con base en subcuencas, índices o en una malla de cuadros. Igualmente, según la aleatoriedad del fenómeno, los clasifica en determinísticos, estocásticos o una combinación de ambos. Además, de acuerdo con la escala temporal, este autor los clasifica en basados en eventos, de simulación continua o discreta y finalmente, en función de la técnica de solución, los clasifica en numéricos (diferencias finitas, elemento finito, etc.), analógicos y analíticos.

El desarrollo de los modelos hidrológicos distribuidos, tiene su punto de partida con la representación de la base física de los procesos hidrológicos (Freeze y Harlan, 1969). Las etapas que deben llevarse a cabo para desarrollar un modelo hidrológico distribuido incluyen la definición del objetivo para el cual se implementará el modelo (análisis de: inundaciones, erosión, contaminación, etc.) subrayando que los modelos matemáticos se deben evaluar mediante criterios numéricos y gráficos. Una vez que se ha calibrado y validado el modelo, éste constituye una herramienta valiosa que proporciona información sobre la certeza de las simulaciones. Sin embargo, al utilizar un modelo distribuido, una de las preguntas iniciales está relacionada con el tamaño de cuadro en que debe discretizarse la cuenca. Hoy en día, no existe una regla general que sugiera el tamaño o número de cuadros necesarios para discretizar una cuenca hidrológica (Molnar y Julien, 2000). En efecto, el rango de la variación espacial utilizada en los distintos modelos implementados alrededor del mundo es muy grande, pues varía desde un "píxel" con resolución de 50 por 50 m (Su *et al.* 2003), hasta 25 por 25 km (Bâ *et al.*, 2009). Con respecto a las áreas de las cuencas que han sido estudiadas, éstas varían desde 1.0 km² para cuencas experimentales (Cristiaens y Feyen, 2002) hasta 418 000 km², caso del río Senegal (Bâ *et al.*, 2009).

En América del Norte, Kuo *et al.* (1999) emplearon el modelo TOPMODEL para analizar los efectos de la discretización espacial, aplicándolo al estudio del contenido de agua en el suelo de cuencas adyacentes en el estado de New York (EE.UU.) con áreas entre 647, 742 y 2 360 ha. Los tamaños de cuadros utilizados fueron modificados desde 10 m hasta 600 m por lado y encontraron que la estimación de humedad del suelo se incrementó al ir aumentando los cuadros de la malla. Esto se debió a que la variable humedad está directamente relacionada con un descenso del gradiente de la pendiente. Sin embargo, el escurrimiento fue el mismo para todos los tamaños de cuadros durante un año húmedo. Molnar y Julien (2000) trabajaron con el modelo distribuido CASC2D, con mallas de cuadros de 127, 254 y 380 m de lado. Aplicaron

el modelo en dos subcuencas del río Mississippi (EE.UU.) para examinar los efectos de los tamaños de cuadros en los cálculos del escurrimiento, así como los efectos de la variabilidad espacial de las características físicas de la cuenca y de las propiedades de la lluvia en la simulación de caudales. Encontraron que la calibración del modelo requirió diferentes parámetros de entrada para cada tamaño de cuadro con el fin de mejorar el ajuste entre los hidrogramas simulados y observados. El cambio más significativo encontrado corresponde al coeficiente de rugosidad del suelo, prácticamente duplicado al incrementar el tamaño de cuadro. Descubrieron, igualmente, que los parámetros del suelo y del almacenamiento, bajo condiciones de mayor saturación, no son sensibles al tamaño de cuadro utilizado.

En Canadá, Fortin *et al.* (2001) hacen una descripción de los componentes del modelo HYDROTEL, así como de sus ventajas al utilizar los Sistemas de Información Geográfica disponibles. El modelo numérico de altitud empleado consistió en una malla de cuadros de 100 m por lado. Morin *et al.* (1998) al desarrollar el modelo CEQUEAU, consideran satisfactorio para una cuenca relativamente homogénea, discretizarla utilizando entre 25 y 75 cuadros, sin embargo, no justifican esta selección.

En México, Bâ *et al.* (2001) utilizaron el modelo CEQUEAU para analizar el comportamiento hidrológico de los caudales de las cuencas de los ríos Amacuzac y San Jerónimo. Posteriormente, Bâ *et al.* (2005) utilizaron el modelo CEQUEAU con objeto de implementarlo y calibrarlo en la cuenca del río Conchos hasta la estación hidrométrica Peguis con buenos resultados.

En la presente investigación se utilizó el modelo CEQUEAU, debido a que forma parte de los modelos hidrológicos evaluados por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1986, 1992) en varias cuencas del mundo, proporcionando resultados satisfactorios bajo diversas condiciones climáticas (Morin *et al.* 1997; Ayadi y Bargouï 1998; Llanos *et al.* 1999 y 2004; Bâ *et al.* 1999, 2001 y 2005; Guerra-Cobián *et al.* 2011). Sin embargo, no se han realizado investigaciones que estén encaminadas a definir criterios en función de algunos parámetros fisiográficos e hidrológicos de la cuenca que proporcionen un tamaño de cuadro óptimo para la implementación de un modelo.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo consiste en analizar la sensibilidad de las simulaciones en función de la variación de la discretización espacial de cuencas hidrológicas, con regímenes climatológicos diferentes utilizando el modelo hidrológico distribuido CEQUEAU en la simulación de caudales diarios, así como construir una herramienta que facilite la determinación del tamaño de cuadro óptimo de discretización.

Metodología

Selección de cuencas hidrográficas

La selección de las cuencas analizadas se realizó con fundamento en la información de las estaciones hidrométricas contenidas en la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2000), del boletín hidrométrico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2000) y de información de las estaciones climatológicas contenidas en el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II, 2000).

Los criterios de selección de las cuencas consistieron en: a) la clasificación de tamaño propuesta por Campos (1998), b) analizar sólo cuencas no controladas, c) la cantidad y calidad de los registros hidrometeorológicos existentes, d) disponibilidad de información geoespacial digital como Modelos Digitales de Elevación (MDE) y sobre el uso de suelo de la zona en estudio (bosque y zona urbanizada).

Con base en los criterios anteriores se seleccionaron ocho cuencas, de las cuales sus desembocaduras están definidas por siete estaciones hidrométricas del BANDAS y una estación de la base de datos de la CFE. En la Tabla 14.1 se muestran: los ríos en los que se localizan las estaciones hidrométricas, las claves de las estaciones, el nombre, los períodos de disponibilidad de datos hidrometeorológicos, así como las coordenadas geográficas y el área drenada correspondiente. De las bases de datos antes mencionadas se extrajeron las series diarias de caudales medios, de precipitación así como de temperaturas máximas y mínimas.

Tabla 14.1 Ríos, estaciones hidrométricas seleccionadas y comparación de áreas de las cuencas en estudio

Río	Estación hidrométrica		Cuenca	Estado	Período de disponibilidad de datos hidrometeorológicos	Ubicación		Área de la cuenca en km ²				
	Nombre	Clave				Latitud Norte	Longitud Oeste	SIG Idrisi	BANDAS, CFE	Porcentaje de variación	Mapas topográficos ^b	Porcentaje de variación
Tlapaneco	Ixcamilpa	IXCa	Balsas	Puebla	1970 a 1990	18°02'23"	98°43'12"	4979.2	4665.0	-6.3	4914.6	-1.3
Tacotalpa	Tapijulapa	30093	Grijalva	Tabasco	1970 a 1990	17°28'23"	92°46'51"	3177.6	3219.0	1.3	2799.0	-11.9
Tamazula	Tamazula	10087	Culiacán	Durango	1963 a 1983	24°56'48"	106°58'50"	2261.0	2241.0	-0.9	2296.9	1.6

AVANCES EN CIENCIA DEL AGUA

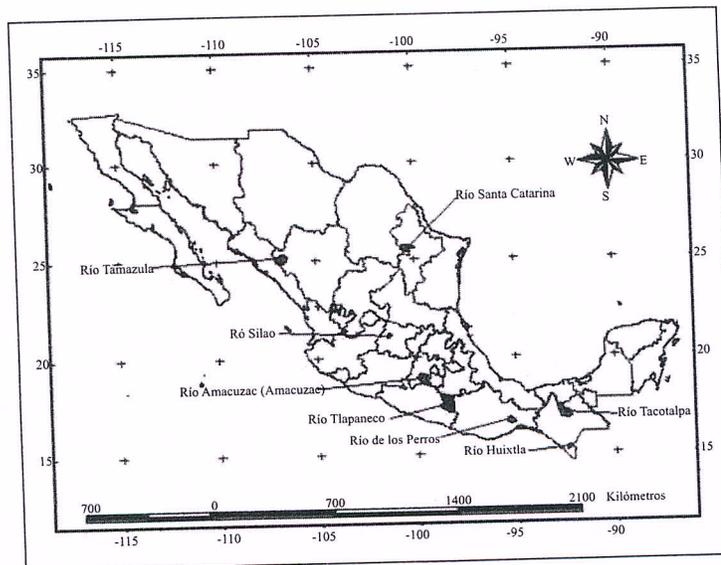
Amacuzac	Amacuzac	18232	Balsas	Morelos	1962 a 1986	18°36'00"	99°22'15"	2240.7	2371.7	5.8	2244.1	0.2
Santa Catarina	Cadereyta II	24327	San Juan	Nuevo León	1966 a 1980	25°35'25"	99°58'30"	1804.7	1871.0	3.7	1772.3	-1.8
De Los Perros	Ixtepec	22017	Suchiate	Oaxaca	1961 a 1980	16°33'15"	95°05'30"	929.7	886.0	-4.7	995.2	7.0
Silao	Silao	12512	Lerma	Guanajuato	1962 a 1974	20°57'30"	101°26'30"	353.8	372.0	5.1	376.9	6.5
Huixtla	Huixtla	23008	Suchiate	Chiapas	1980 a 1994	15°07'42"	92°28'33"	352.0	377.0	7.1	346.2	-1.6

Fuente: elaboración propia.

a Estación operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), b Se utilizaron cartas topográficas del INEGI a escala 1:250,000

La Fig. 14.1 muestra la ubicación de las ocho cuencas hidrográficas seleccionadas. El río Sta. Catarina se localiza al noreste de México, en el estado de Nuevo León. La cuenca del río Tamazula se ubica al noroeste en el estado de Durango. La cuenca del río Silao está en la zona del bajío, específicamente en el estado de Guanajuato. Las cuencas de los ríos Amacuzac y Tlapaneco se ubican en el centro de México en los estados de México y Puebla, respectivamente. En el Istmo de Tehuantepec, estado de Oaxaca, se encuentra la cuenca del río De Los Perros; y al sur de México, en el estado de Chiapas, las cuencas de los ríos Tacotalpa y Huixtla.

Fig. 14.1 Ubicación en el contexto nacional de las cuencas en estudio.



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, estas cuencas se insertan entre latitudes extremas de México. En efecto, las cuencas están distribuidas en regiones climatológicas distintas, abarcando desde zonas semiáridas con precipitación media anual menor de 400 mm (río Sta. Catarina), hasta zonas de alta pluviosidad con más de 4 000 mm/año como la cuenca del Huixtla.

Modelo hidrológico distribuido CEQUEAU

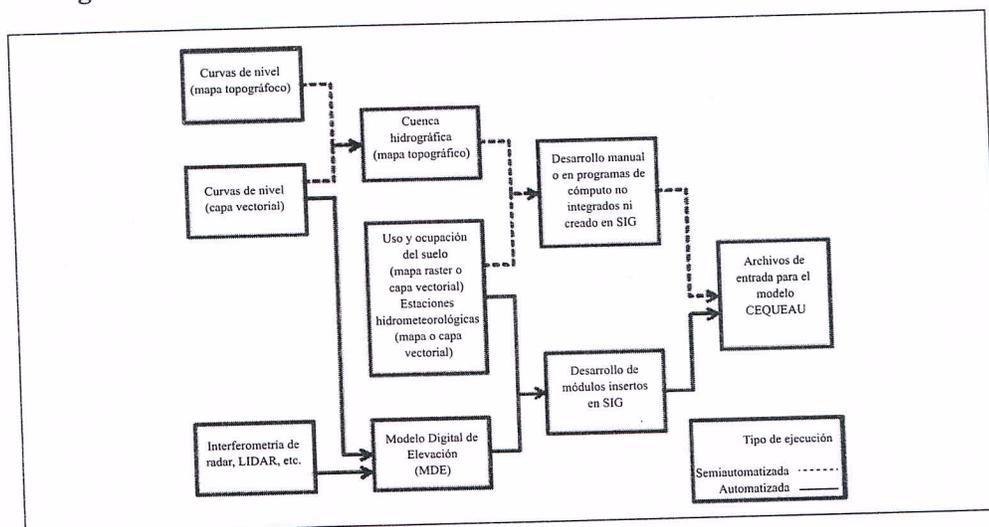
El modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU (Morin *et al.*, 1998; Morin y Paquet, 2007; Singh, 2002) es de tipo determinístico y de simulación continua que discretiza la cuenca en una malla de cuadros considerando las variaciones espacio-temporales tanto de las características físicas, de precipitación y de temperatura (Bâ *et al.* 2001).

La arquitectura del modelo se basa en tres recipientes: a) lagos y ciénegas, b) suelo y, c) subsuelo. Consta de dos partes que definen la forma en que se obtiene el caudal a la salida de la cuenca. La primera corresponde a la función de producción, que modela el movimiento vertical del agua en los recipientes. Para cada cuadro, el modelo asigna la precipitación promedio obtenida de la ponderación con respecto a la distancia, de las tres estaciones más cercanas a dicho cuadro o bien por el método de Thiessen. La segunda parte, está definida por la función de transferencia, que se encarga de modelar el movimiento del agua de elemento en elemento o de cuadro por cuadro hasta la desembocadura de la cuenca. El coeficiente de transferencia de cada cuadro está relacionado con las características hidráulicas parciales predominantes del flujo, es decir, la capacidad de amortiguar la onda mediante el depósito en la red hidrográfica. El modelo CEQUEAU utiliza los coeficientes de transferencia, para cada cuadro, considerando el área cubierta por el agua y la zona aguas arriba de dicha unidad espacial. Cada uno de los cuadros puede ser subdividido hasta en cuatro áreas parciales, ello permite: a) dar seguimiento espacio-temporal a las variaciones del caudal en el río principal en cualquier punto de la cuenca y b) simular el efecto de cualquier modificación física en la cuenca, tales como modificaciones de uso de suelo, la construcción de embalses o derivaciones de caudal.

Para el trazo de las cuencas analizadas y la generación de archivos en el formato requerido por el modelo CEQUEAU, se utilizaron MDE generados por interferometría a través de un radar (Foni y Seal, 2003), éstos se obtuvieron gratuitamente del Seamless Data Distribution System Earth Resources Observation and Science del US Geological Survey (USGS, 2005). Los modelos cubrieron la zona que contiene cada una de las áreas de las cuencas en estudio incluyendo a todas las estaciones

meteorológicas seleccionadas. Cabe mencionar que los MDE obtenidos con radar de apertura sintética están sujetos a varios tipos de anomalías que deben corregirse. Estas anomalías obedecen a factores como presencia de obstáculos orográficos, o bien por causas específicas de operación del radar (Hall *et al.*, 2005). Particularmente, consisten en huecos (o valores de altitud de -9999 m) en algunos de los píxeles que en ocasiones llegan a cubrir zonas extensas. El proceso de corrección necesario se llevó a cabo en el SIG Idrisi versión kilimanjaro (Eastman, 2004) con base en un proceso de reclasificación de los valores de píxeles con altitud registrada como -9999 por un valor nulo y, posteriormente, se empleó un filtro para la asignación de altitud obtenida por interpolación.

Fig. 14.2 Proceso para la obtención de archivos del modelo CEQUEAU.



Fuente: elaboración propia.

Una vez los MDE corregidos, el trazo de las cuencas analizadas se mejoró mediante la metodología del *encauzamiento forzado de ríos* sobre los píxeles que representan la red de drenaje principal de la cuenca (Gómez, 2005). Esta adecuación consiste en reducir artificial y temporalmente la altitud de los píxeles que representan las corrientes o ríos principales de la cuenca. De esta forma, se facilita notablemente la definición de los parteaguas, especialmente en zonas planas. La obtención de los archivos requeridos por el modelo CEQUEAU, puede llevarse a cabo de una manera semiautomatizada, utilizando cartas topográficas o capas digitales de datos vectoriales. Sin embargo, también pueden obtenerse de forma

automatizada, con base en el empleo de módulos hidrogeomáticos que operan al interior del SIG Idrisi-kilimanjaro.

La validación numérica de las simulaciones se llevó a cabo con base en el criterio propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este criterio cuantifica la precisión de los resultados relacionando los caudales observados Q_o y los caudales calculados Q_c expresados por la ecuación (1). El dominio matemático de existencia del valor del coeficiente de Nash es de $-\infty$ hasta 1, donde la unidad representa la simulación perfecta.

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \overline{Q_o})^2} \quad -\infty < NTD \leq 1 \quad \text{Ecuación 1}$$

El diseño experimental del análisis del efecto de la discretización espacial sobre el modelado hidrológico distribuido se efectuó modificando el lado del cuadro que discretiza la cuenca. Esta variación partió de un tamaño mínimo de lado de cuadro incrementando 100 m por lado en cuencas pequeñas y 500 m para cuencas grandes hasta alcanzar el tamaño máximo y garantizando un número de simulaciones por cuenca entre 16 y 34 (Tabla 14.2). La selección del tamaño mínimo de cuadro se efectuó tomando en cuenta la restricción del modelo CEQUEAU en cuanto al número máximo de cuadros que intersectan la cuenca (1000 cuadros). La obtención de los archivos para el modelado hidrológico se realizó de una manera automatizada para cada tamaño de cuadro y para cada cuenca empleando, para ello, el módulo Idrisi-CEQUEAU desarrollado con este propósito (Guerra-Cobián *et al.*, 2006).

El modelado hidrológico consistió en ingresar en CEQUEAU los archivos en formato texto generados por el módulo de SIG, antes mencionado, para la simulación lluvia – escurrimiento de cada cuenca y cada nivel de discretización de la misma. Es de subrayar que para cada cuenca en estudio, se realizó el proceso de calibración del modelo. Para la simulación hidrológica se dividió el registro de datos hidrometeorológicos disponibles en dos períodos, el primero se empleó en la calibración del modelo, y el segundo en la validación. Este proceso se efectuó variando los parámetros que gobiernan el proceso lluvia-escurrimiento en dos etapas: la primera se realizó manualmente (prueba y error), y la segunda consistió

en la optimización automática de los parámetros, utilizando el método de Powell (Powell, 1964) como herramienta de optimización disponible en CEQUEAU.

Tabla 14.2 Diseño experimental del análisis de discretización espacial, escenarios de calibración de las cuencas en estudio.

Río	Estación hidrométrica		Lado del cuadro (m)		Simulaciones por cuenca	Incrementos por lado de cuadro	Escenarios de calibración (m)		
	Nombre	Clave	Mínimo	Máximo			1	2	3
Tlapaneco	Ixcamilpa	IXC	2500	10000	16	@ 500 m	5000	7000	10000
Tacotalpa	Tapijulapa	30093	2000	10000	17	@ 500 m	5000	7000	10000
Tamazula	Tamazula	10087	2000	10000	17	@ 500 m	5000	7000	10000
Amacuzac	Amacuzac	18232	2000	10000	17	@ 500 m	5000	7000	10000
Santa Catarina	Cadereyta II	24327	1500	10000	18	@ 500 m	5000	7000	10000
De Los Perros	Ixtepec	22017	1100	4000	30	@ 100 m	2000	3000	4000
Silao	Silao	12512	700	4000	34	@ 100 m	2000	3000	4000
Huixtla	Huixtla	23008	700	4000	34	@ 100 m	2000	3000	4000

Fuente: elaboración propia.

Para cada cuenca se plantearon tres escenarios de calibración, empleando un tamaño de cuadro distinto en cada uno (Tabla 14.2). El conjunto de parámetros obtenidos con el primer tamaño de cuadro (escenario 1), se utilizó como base de la segunda calibración (escenario 2), y éste a su vez se aplicó para la tercera calibración (escenario 3). Por último, el conjunto de parámetros de cada escenario se utilizó para efectuar las simulaciones, de los distintos tamaños de cuadros en que se discretizaron las cuencas.

Posteriormente, con base en las características fisiográficas e hidrológicas de cada una de las cuencas en estudio se procedió a la construcción de un modelo matemático predictivo de tipo regresivo entre dichos parámetros y el tamaño óptimo del cuadro de discretización. Las características hidrológicas y fisiográficas consideradas fueron: a) área de la cuenca; b) perímetro de la cuenca; c) longitud del cauce principal; d) pendiente del cauce principal; e) caudal medio interanual; f) lluvia media interanual; g) cobertura de bosque; h) latitud media de la cuenca; i) altitud media de la cuenca; j) pendiente media de la cuenca; k) coeficiente de compacidad; l) relación de circularidad; m) relación hipsométrica.

Resultados

Las áreas de captación de las ocho cuencas seleccionadas variaron desde 352 km² (río Huixtla) hasta 4,980 km² (río Tlapaneco), la altitud media de las cuencas oscila desde 523 m.s.n.m. (río De Los Perros), hasta 2198 m.s.n.m. (río Silao). La cobertura vegetal considerada como área de bosques en el modelo CEQUEAU, y que es utilizada en el cálculo de la evapotranspiración de las cuencas, fluctuó entre 31.9 % (río Sta. Catarina) y 88.9 % (río Tamazula).

Como parte de la evaluación de los resultados del módulo hidrogeomático desarrollado en esta investigación, se llevó a cabo la comparación entre las áreas de las cuencas obtenidas con el mismo, y las áreas de las cuencas reportadas en las bases de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS); así como en el boletín hidrológico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de mapas topográficos a escala 1:250,000 editados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). La Tabla 14.3 muestra que la mayor diferencia (valor absoluto) entre las áreas de las cuencas es de 11.9%, y corresponde a la información obtenida del INEGI de la cuenca del río Tacotalpa y la menor diferencia es de 0.2% para la cuenca del río Amacuzac, obtenida del INEGI igualmente.

La diferencia encontrada con respecto a las superficies de las cuencas, se debió al manejo de distintas fuentes de información. Además, en la base de datos del BANDAS se reporta el área de la cuenca hasta la estación hidrométrica seleccionada, aunque no se especifica la fuente de información utilizada, ni el procedimiento empleado para el cálculo de la misma. De igual forma, en el boletín hidrométrico de la CFE, tampoco se define la manera en la que se obtuvo el área de la cuenca. Sin embargo, las diferencias encontradas en las superficies no son significativas, debido a que en la modelación hidrológica que se efectuó, se consideró como 100% el área obtenida con el módulo hidrogeomático.

Tabla 14.3 Características fisiográficas retenidas y resultados del efecto de la discretización en la simulación hidrológica.

Río	Estación	Características fisiográficas retenidas				Coeficiente de Nash			Tamaño de cuadro utilizado (km ²)	
		A (km ²)	P (km)	B (%)	Sc (Grados)	Máximo	Mínimo	Diferencia	Para Nash máximo	Para Nash mínimo
Huixtla	Huixtla	352.00	130.00	40.8	37.5	0.9823	0.9640	0.0183	13.69	7.84

AVANCES EN CIENCIA DEL AGUA

Amacuzac (Amacuzac)	Amacuzac	2240.60	368.70	41.8	23.89	0.9807	0.9591	0.0216	81.00	16.00
Tlapaneco	Ixcamilpa	4979.17	521.80	67.4	28.39	0.9635	0.9402	0.0233	100.00	81.00
De Los Perros	Ixtepec	929.74	214.80	88.0	26.04	0.9142	0.8846	0.0296	9.61	13.69
Tamazula	Tamazula	2260.99	324.20	88.9	42.14	0.9427	0.9109	0.0318	42.25	100.00
Tacotalpa	Tapijulapa	3177.61	429.60	70.8	30.96	0.9545	0.9183	0.0362	42.25	56.25
Silao	Silao	353.78	129.10	34.3	21.61	0.8105	0.6701	0.1404	4.00	16.00
Sta. Catarina	Cadereyta II	1804.69	344.20	31.9	39.75	0.8876	0.7220	0.1656	30.25	2.25

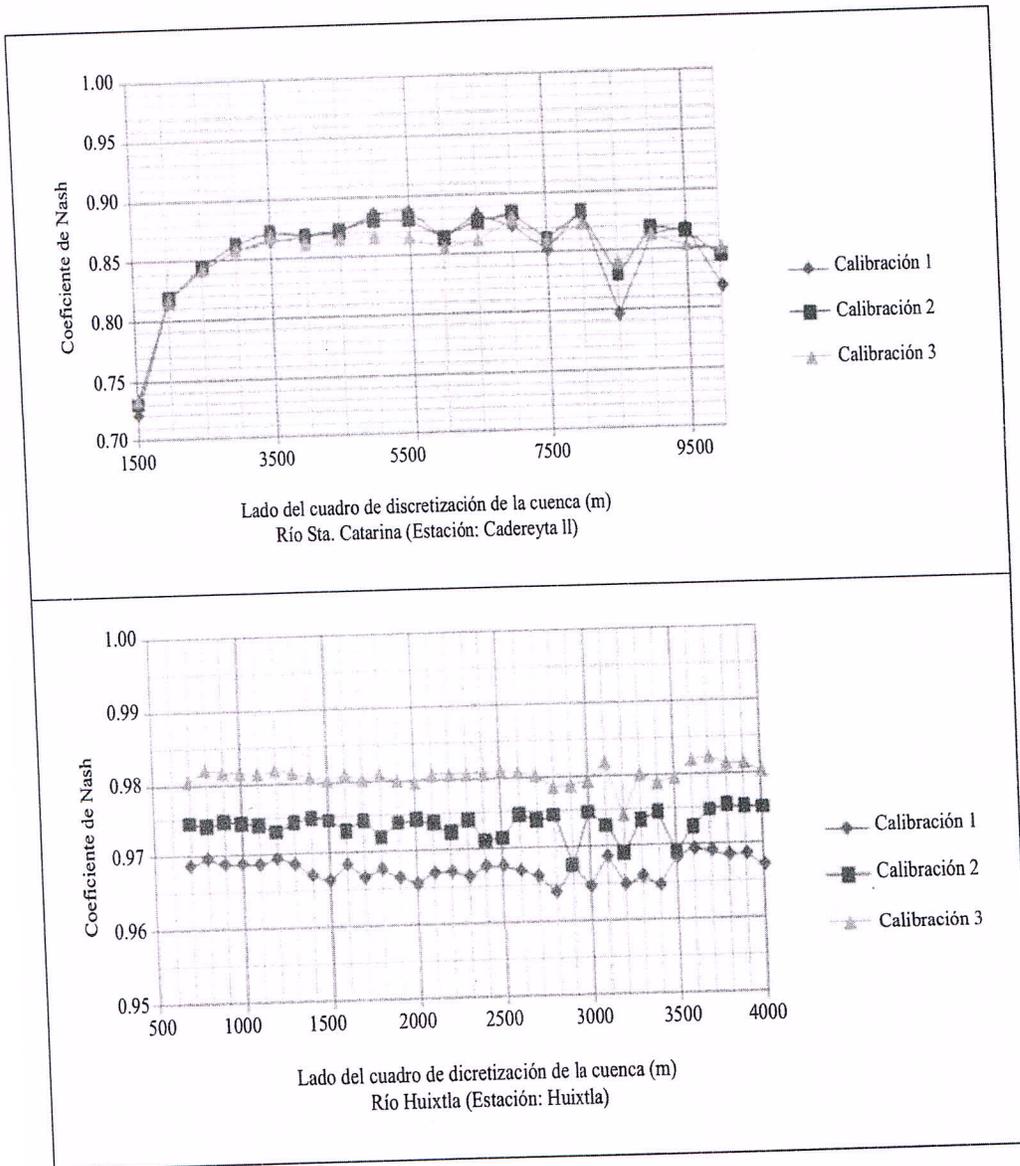
Fuente: elaboración propia.

A: Área de captación de la cuenca; P: Perímetro de la cuenca; B: Porcentaje de área cubierta por bosque; Sc: Pendiente media de la cuenca.

Por otro lado, es importante recordar que esta investigación pretende evaluar la hipótesis, de que, al incrementar el grado de discretización de una cuenca para llevar a cabo la simulación lluvia-escurrimiento con un modelo distribuido, los resultados podrían ser más adecuados si se disminuye el tamaño de cuadro que discretiza la cuenca. Se suponía que esto reproduciría de una forma más real los escurrimientos dentro de la misma y por lo tanto se obtendrían mejores resultados en las simulaciones. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que no necesariamente ello ocurre. Esta evaluación de las simulaciones se realizó con base en criterios numéricos (coeficiente de Nash en

Fig. 14.3, y las láminas de agua observada y calculada), y criterios gráficos (hidrogramas observados y simulados, así como la gráfica de dispersión de caudales). Se encontró que, en las cuencas de los ríos: Huixtla y Amacuzac (Amacuzac), se obtuvieron valores del coeficiente de Nash de 0.9823 y 0.9807, respectivamente. Estos resultados representan las mejores simulaciones obtenidas y son superiores a los reportados para otras cuencas en las investigaciones realizadas por: Ayadi y Bargaoui (1998), Carpenter y Georgakakos (2004), Eckhardt *et al.* (2005) y Jayakrishnan *et al.* (2005). Además, en las cuencas de los otros ríos aquí analizados también se obtuvieron valores ampliamente satisfactorios (Tabla 14.3). Es importante resaltar que, la menor variación del coeficiente que se obtuvo fue de 0.0183 para la cuenca del río Huixtla. En cambio la mayor variación se presentó en la cuenca del río Sta. Catarina y fue de 0.1656, lo cual puede sugerir que la simulación de caudal es sensible al nivel de cobertura de bosques presente en una cuenca.

Fig. 14.3 Resultados de la simulación hidrológica: a) río Santa Catarina (gráfica superior) y b) río Huixtla (gráfica inferior).



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que, la variación global en el coeficiente de Nash fue entre 0.9823, que corresponde a la cuenca del río Huixtla, y 0.6701 para la cuenca del río Silao. Con respecto a las diferencias entre valores máximos del coeficiente de Nash de las simulaciones realizadas, en la

Tabla 14.4 se observa que la mínima diferencia es de 0.0183, y se presentó en las simulaciones efectuadas en la cuenca del río Huixtla. Por el contrario, las máximas diferencias que se obtuvieron en las simulaciones fueron 0.1404 y 0.1656, y corresponden a los ríos Silao y Sta. Catarina, respectivamente.

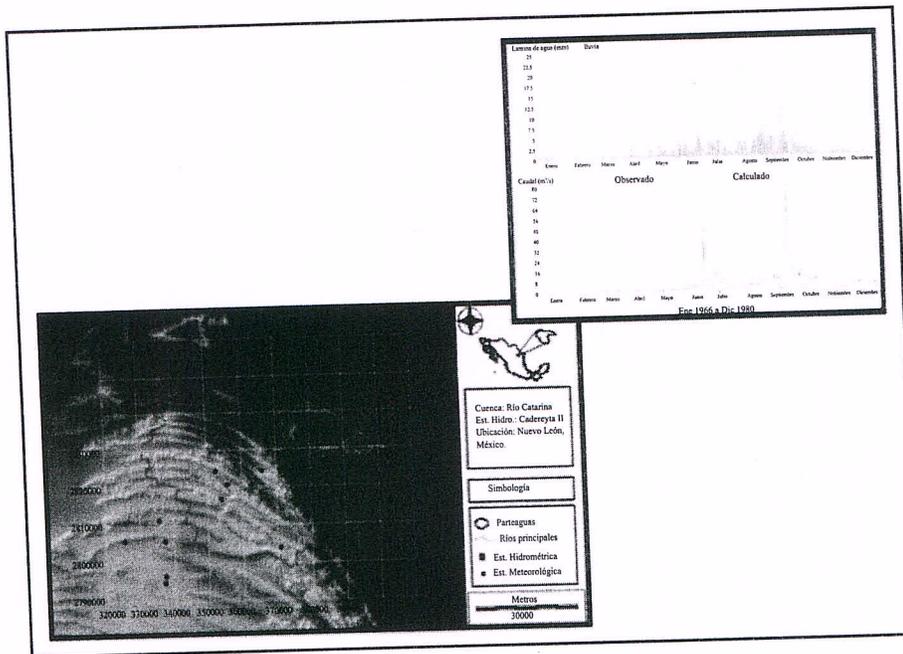
Tabla 14.4 Resumen del modelo matemático predictivo del tamaño de cuadro óptimo de discretización espacial en la simulación hidrológica distribuida.

Modelo	r	r ²	r ² corregido	Error típico de la estimación	Variables explicativas
Retenido	0.983	0.967	0.923	6.296	A: área de la cuenca (km ²). P: perímetro de la cuenca (km). B: cobertura de bosque (decimales). Sc: pendiente media de la cuenca (Grados).
<i>Análisis de varianza del modelo retenido (ANDEVA)</i>					
Modelo retenido	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significado
Regresión	3468.233	4	867.058	21.873	0.015
Residual	118.919	3	39.640		
Total	3587.152	7			
<i>Coefficientes del modelo retenido</i>					
<i>Variable independiente: Tamaño de cuadro óptimo de discretización espacial (a) en km².</i>					
Modelo retenido	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes tipificados	t	Significado
	β	Error típico	Beta		
Constante	-47.680	13.647	-2.860	-3.494	0.040
A	-0.042	0.006	3.195	-6.699	0.007
P	0.515	0.068	-0.332	7.624	0.005
B	-31.818	11.030	0.192	-2.885	0.063
Sc	0.566	0.319		1.771	0.175

Fuente: elaboración propia.

En la Fig. 14.4 se muestra, a manera de ejemplo, la delimitación del parteaguas y la simulación hidrológica efectuada de la cuenca del río Sta. Catarina (zona semiárida).

Fig. 14.4 Modelado distribuido del fenómeno lluvia-escorrentamiento de la cuenca Sta. Catarina (zona semiárida)



Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que esta variabilidad en el coeficiente de Nash, sugiere que, las simulaciones efectuadas con el modelo CEQUEAU, son más sensibles en cuencas localizadas en zonas semiáridas, donde la época lluviosa es errática y con variaciones interanuales significativas. Por el contrario, las variaciones menores del coeficiente, se obtuvieron en cuencas localizadas en zonas de alta pluviosidad, como es el caso de las cuencas de los ríos Huixtla, Amacuzac (Amacuzac), Tlapaneco, Tacotalpa; así como de los ríos Tamazula y De Los Perros. Las cuencas con las mayores coberturas de bosques (De los Perros y Tamazula), aunque no arrojaron las menores diferencias entre los valores máximos y mínimos del coeficiente de Nash, si mostraron un amortiguamiento en la sensibilidad al cambio de discretización espacial de análisis en la cuenca. Por el contrario, en las cuencas con las menores coberturas de bosque (Silao y Sta Catarina) se obtuvieron los menores valores del coeficiente de Nash.

Con la finalidad de construir el modelo matemático predictivo de tipo regresivo sobre el tamaño óptimo del cuadro de discretización, se empleó la técnica de modelación iterativa de regresión múltiple paso a paso (Johnson y Wichern, 2002). En

cada etapa de la modelación se verificó el nivel de ajuste con base en el coeficiente de determinación (r^2), el análisis de varianza, así como el análisis gráfico de los residuos (Hair *et al.*, 1998). Para la construcción del modelo predictivo se eligió el conjunto óptimo de variables explicativas que maximizan el valor de la varianza explicada. Los valores de variables finales retenidas de las cuencas en estudio se presentan en la Tabla 14.3. El resumen del análisis del modelo construido se presenta en la

Tabla 14.4, del cual se destaca que las variables explicativas retenidas corresponden a: a) el área de la cuenca; b) el perímetro de la cuenca; c) la cobertura de bosque y; d) la pendiente media de la cuenca. El coeficiente de determinación del mejor modelo de ajuste obtenido es $r^2= 0.967$ y el modelo matemático está representado por la ecuación (2).

$a=-0.042(A)+0.515(P)-31.818(B)+0.566(Sc)-47.68$	Ecuación 2
--	------------

Donde: es el área del cuadro de discretización (km^2); A : es el área de la cuenca (km^2); P : es el perímetro de la cuenca (km); B : es la cobertura de bosque en la cuenca (en decimales) y; Sc : es la pendiente media de la cuenca (Grados).

Conclusiones

Es importante resaltar que los resultados obtenidos en las simulaciones hidrológicas dependen en gran medida del esfuerzo de calibración empleado, así como de la cantidad y calidad de la información hidrometeorológica.

Por otro lado, tal como se tenía pensado al inicio de esta investigación, se comprobó con base en los resultados de las simulaciones que, los valores máximos del coeficiente de Nash no se obtuvieron para los tamaños de cuadro con mayor resolución que discretiza la cuenca. Por el contrario se observa que este parámetro de evaluación de la calidad de la modelación disminuye, por lo general, al efectuar las simulaciones con tamaño de cuadros más pequeños.

El modelo matemático predictivo del tamaño de cuadro óptimo de discretización espacial, en la modelación distribuida lluvia-escorrentamiento, ha sido construido con base en características fisiográficas de la cuenca y su representatividad es ampliamente satisfactoria ($r^2= 0.967$). Este modelo predictivo del cuadro óptimo de discretización es válido para un rango de superficies de captación entre 100 y 5000 km^2 . Finalmente, se recomienda extender el estudio a un mayor número de cuencas para incrementar el rango de aplicación a superficies de captación mayores a 5000 km^2 .

Referencias

- Ayadi, M., Bargaoui, Z., (1998). “Modélisation des écoulements de l’oued Miliane par le modèle CEQUEau”, en *Journal des Sciences Hydrologiques*, 43(5), pp. 741-758.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., Esteller, M. V., (1999). Estudio Hidrológico Superficial y Subterráneo de la Cuenca del Río Balsas dentro del Estado de México (Etapa I). Reporte No. CIRA/012, Universidad Autónoma del Estado de México, México. Diciembre de 1999. 125 pp.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., Rodríguez, V., (2001). “Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México”, en *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVI, No. 4, pp. 117-126.
- Bâ, K. M., Quentin, E., Carsteanu, A., Ojeda, I., Díaz-Delgado, C., Guerra-Cobián, V.H., (2009). “Modelling a large watershed using the cequeau model and GIS: case of the Senegal river at Bakel”, en *Geophysical Research Abstracts*, Col. II –EGU2009-0.
- Bâ, K. M., Guerra-Cobián, V. H., Pérez-Cámara, A. G., Díaz-Delgado, C., Quentin, E., Franco-Plata, R., (2005). Implementación y Calibración de un Modelo Hidrológico Distribuido en la Cuenca del Río Conchos, Clave: UAEM1971/2004, Universidad Autónoma del Estado de México, México. 75 pp.
- 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.
- Bronstert, A., Niehoff, D., Bürger, G., 2002. “Effects of climate and land-use on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities”, en *Hydrol. Process.* 16 (2), 509-529 pp.
- Campos-Aranda, D. F., (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, tercera reimpression, Editorial Universitaria Potosina, México.
- Carpenter, T. M., Georgakakos, K. P., (2004). “Continuous streamflow simulation with the HRCDHM distributed hydrologic model”, en *Journal of Hydrology*, 298, 61-79 pp.
- CFE, (2000). Boletín hidrométrico No. 41 Año 1999, Departamento de Hidrometría de la Comisión Federal de Electricidad, Informe de la Subdirección Técnica, México, 67 pp.
- Cristiaens, K., Feyen, J., (2002). “Use of sensitivity and uncertainty measures in distributed hydrological modeling with an application to the MIKE SHE model,” en *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 9, 1-15 pp.

- Eastman, J. R., (2004). Idrisi Kilimanjaro. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs, Clark University, USA.
- Eckhardt, K., Fohrer, N., Frede, H-G., (2005). Automatic model calibration, *Hydrological Processes*, 19, 651-658 pp.
- ERIC II., (2000). Extractor Rápido de Información Climatológica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México, Disco compacto.
- Foni, A., Seal, D., (2003). Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control, *Acta Astronautica*, No. 54, pp. 565-570.
- Fortin, J-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, J. F., Villeneuve, J-P., (2001). "Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of Model", en *Journal of Hydrologic Engineering*, pp. 91-99.
- Freeze, R., Harlan, R., (1969). "Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model", en *Journal of Hydrology*, 9: 237-258 pp.
- Gómez, M. A., (2005). Desarrollo de una metodología geomática para la evaluación por subcuenca de indicadores de deficiencias en tratamiento de aguas residuales, Tesis de Maestría, Centro Interamericano de Recursos del Agua de la U.A.E.M., México, 155 pp.
- Grayson, R., Blöschl, G., 2000. Spatial patterns in catchman hydrology: observations and modelling. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge, UK, ISBN: 0-521-63316-8.
- Guerra-Cobián, V.H., Bâ, K.M., Quentin-Joret, E., Díaz-Delgado, C., Cârsteanu, A., 2011. "Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente" en *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, Vol. II, núm. 3, julio-septiembre de 2011, pp. 35-48
- Guerra-Cobián, V.H., Bâ, K.M., Quentin-Joret, E., Díaz-Delgado, C., Franco-Plata, R., Manzano-Solís, L.R. 2006. Modelación hidrológica distribuida utilizando un mapa topográfico generado a partir de información de altitud obtenida por radar. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica y Simposio Internacional de Estructuras Hidráulicas. Del 9 al 14 de octubre en Ciudad Guayana, Venezuela.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C., (1998). *Multivariate data analysis*, fifth edition, Prentice Hall, 730 pp.
- Hall, O., Falorni, G., Bras, R. L., (2005). "Characterization and Quantification of Data Voids in the Shuttle Radar Topography Mission Data", en *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 2, No. 2, pp. 177-181.
- Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santi, C., Arnold, J. G., (2005). "Advances in the application of the SWAT model for water resources management", en *Hydrological Processes*, 19, 749-762 pp.

- Johnson, R.A., Wichern, D.W., (2002) Applied multivariate statistical analysis, fifth edition, prentice Hall, 767 pp.
- Koren, V., Finnerty, R., Shaake, J., Smith, M., SEO, D., Duan, Q.Y. (1999). "Scale dependencies of hydraulic models to spatial variability of precipitation", en *J. Hydrol.* 217, 285-302 pp.
- Krajewski, W., Lakshmi, V., Georgakakos, K., Jain, S., (1991). "A Montecarlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model", en *Water Resour. Res.* 27 (1), 119-128 pp.
- Kumar, R., Samaniego, L., Attinger, S. (2010). "The effects of spatial discretization and model parametrization on the prediction of extreme runoff characteristics", en *J. Hydrol.* 392, 54-89 pp.
- Kuo, W-L., Steenhuis, T., McCulloch, C., Moler, C. Weinstein, D., DeGloria, S., Swaney, D., (1999). "Effects of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model", en *Water Resources Research*, vol. 35, No. 11, pp 3419-3428.
- Llanos, H., Bâ, K. M., Castiella, A., (1999). "Modelación Hidrológica de la Cuenca Alta del Río Ega (País Vasco y Navarra)", en *Ingeniería del Agua, España*. Vol. 6, No. 3, 241-250 pp.
- Llanos, H., Bâ, K. M., Castiella, A., (2004). *Aplicación de Modelos Matemáticos para la Simulación de Avenidas en Cuencas de la Red Hidrográfica de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Vol. 19, *Revista de Estudios del Museo de Ciencias Naturales de Avala, España*.
- Luzio, D. M., Arnold, J. G., (2004). "Formulation of a Ibrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input", en *Journal of Hydrology*, 298, 136-154 pp.
- Molnar, D. K., Julien, P. Y., (2000). Grid-size effects on surface runoff modeling, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, pp. 8-16.
- Morin, G., Sochanski, W., Paquet, P., (1997). *Modélisation hydrologique et prévision en temps réel des apports des bassins versants Chute du Diable et Mistassibi à l'aide du modèle CEQUEAU*, INRS-Eau, rapport de recherche no. 504.
- Morin, G., Sochanski, W., Paquet, P., (1998). *Le modèle de simulation de quantité CEQUEAU-ONU*, Manuel de référence. Organisation des Nations Unies et INRS-Eau, Rapport de recherche no 519, 252 pp.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., (1970). "River flow forecasting through conceptual model", en *Journal of Hydrology*, 10, 282-290 pp.
- Powell, M.J.D. (1964), "An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives", en *ComputerJournal*. Vol. 7, 155-162 pp.

- Réméniéras, G., (1999). L'hydrologie de l'ingénieur, Collection de la Division Recherche et Développement d'Electricité de France, Eyrolles, France, 456 pp.
- Singh, V. P., (1995). Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, U.S.A.
- Singh, V. P., Woolhiser, D. A., (2002). "Mathematical Modeling of Watershed Hydrology", en Journal of Hydrologic Engineering, July/August, pp. 270-292.
- Su, B., Kazama, S., Lu, M., Sawamoto, M., (2003). "Development of a distributed hydrological model and its application to soil erosion simulation in a forested catchment during storm period", en Hydrological Process. 17, 2811-2823 pp.
- USGS, (2005). Seamless Data Distribution System, Earth Resources Observation and Science, US Geological Survey, <http://seamless.usgs.gov/>. Consulta realizada en junio de 2005.
- WMO, (1986). Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report No. 23.
- WMO, (1992). Simulated real-time intercomparison of hydrological models. World Meteorological Organization. Operational Hydrology Report No. 38.

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 (<i>hydrocotyle ranunculoides</i>) 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, em- pleando 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-escorrentamiento: 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