

EFFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL SOBRE LAS SIMULACIONES DE CAUDAL CON EL MODELO DISTRIBUIDO *CEQUEAU*

• Víctor Hugo Guerra-Cobián* •
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

*Autor de correspondencia

• Khalidou M. Bâ • Carlos Díaz-Delgado •
Universidad Autónoma del Estado de México

• Emmanuelle Quentin •
Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Resumen

El presente trabajo analiza el efecto que tiene la discretización espacial de una cuenca sobre los resultados de las simulaciones de caudal con el modelo *CEQUEAU*. Este modelo es de tipo distribuido, y se desarrolló por el Instituto Nacional de Investigación Científica de la Universidad de Quebec, Canadá. *CEQUEAU* ha sido empleado en varios países para la modelación de escurrimientos y utilizado en estudios de comparación de modelos efectuada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El modelo discretiza la cuenca en elementos cuadrados y el balance hídrico se realiza cuadro por cuadro, tomando en cuenta precipitación, temperatura, porcentaje de lagos, porcentaje de bosque, etcétera. El principal objetivo del trabajo consistió en identificar criterios para determinar el tamaño de cuadro óptimo de discretización de una cuenca, asumiendo una representación adecuada de la precipitación. Se analizaron ocho cuencas de diferentes tamaños y con diferentes climas en la república mexicana. Las características fisiográficas han sido determinadas con el *SIG-Idrisi*. Además, *CEQUEAU* fue calibrado y validado todos los días, con varios tamaños de cuadro, evaluando el nivel de certidumbre de los resultados con los criterios numérico de Nash y gráficos. Con base en los resultados obtenidos bajo el diseño experimental propuesto, se construyó un adecuado 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 y está formado por un conjunto de ecuaciones que representan un proceso y donde la calidad de los resultados depende de la precisión de

los datos de entrada y del grado en el que la estructura del modelo representa de forma adecuada el problema en estudio. Sin duda, los resultados obtenidos del modelado hidrológico dependen de diversos factores, como: (1) una adecuada representación espacial de los procesos hidrológicos, (2) el método utilizado en la parametrización del modelo, (3) el procedimiento para estimar de forma eficaz los parámetros del modelo, y (4) la calidad de la información

(Réménieras, 1999; Singh y Woolhiser, 2002; Kumar *et al.*, 2010; Guerra-Cobián *et al.*, 2011). 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, etcétera), así como a la variabilidad espacio-temporal de los fenómenos meteorológicos (precipitación, temperatura, etcétera) (Krajewski *et al.*, 1991; Koren *et al.*, 1999; Grayson y Bloöschl, 2000; Bronstert *et al.*, 2002). 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. De igual manera, 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 con base en eventos de simulación continua o discreta; finalmente, en función de la técnica de solución, los clasifica en numéricos (diferencias finitas, elemento finito, etcétera), 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, pérdida de suelo, efecto del cambio de uso de suelo, contaminación del agua subterránea, etcétera), 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 20 x 20 m (Chaplot, 2005), hasta 25 x 25 km (Bâ *et al.*, 2009). En cuanto 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).

Sin duda alguna, los modelos hidrológicos distribuidos han sido ampliamente investigados, así como sus aplicaciones. Por ejemplo, Calore *et al.* (1995) estudiaron la sensibilidad del modelo distribuido *MIDA*, para investigar la relación entre las principales variables conceptuales y algunos parámetros globales, considerando diferentes coberturas de suelo y condiciones climatológicas. Por otro lado, Hundedcha y Bárdossy (2004) aplicaron el modelo *HBV_IWS* en 95 subcuencas del río Rin en Alemania, con el propósito de modelar los efectos del cambio de uso del suelo en el escurrimiento. Los resultados obtenidos en la simulación indicaron claramente que un fuerte aumento de las zonas impermeables tiene un efecto en el incremento del gasto pico. En lo referente al cambio en el uso del suelo, Bormann (2006) analizó el efecto de la resolución de datos espaciales sobre la simulación de los balances hídricos y los componentes de flujo utilizando el modelo hidrológico *TOPLATS*.

Se utilizó un conjunto de datos espaciales con resolución de 25 m de una cuenca de 693 km² en Alemania central. Después de la agregación a 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 1 000 y 2 000 m de los modelos digitales de elevación, uso del suelo y clasificación, se realizaron los balances hídricos para toda la cuenca y tres subcuencas sin ninguna recalibración. El estudio mostró que se presentan diferencias en los gastos simulados de 0.3% para resoluciones de 50 a 500 m, y de 2.12% para resoluciones entre 1 000 y 2 000 m. Estas diferencias se pueden explicar por el hecho de que cambian de forma significativa los datos de uso del suelo, en particular, así como las características físicas del suelo en estas resoluciones espaciales.

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 Nueva York (Estados Unidos) con áreas entre 647, 742 y 2 360 ha. Los tamaños de cuadros utilizados fueron modificados desde 10 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 (Estados Unidos) 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, de igual manera, que los parámetros del suelo y del almacenamiento, bajo condiciones de mayor saturación, no son sensibles al tamaño de cuadro utilizado. Por su parte, Chaplot (2005) realizó un estudio con el objetivo de determinar el impacto del incremento en el tamaño de los cuadros del modelo digital de elevación de 20 a 500 m, y la escala de los mapas de suelos (1/25 000, 1/250 000 y 1/500 000) en el modelo *SWAT* para simular el escurrimiento, sedimentos y cargas de nitratos en una cuenca agrícola. Los resultados encontrados en la cuenca baja del arroyo Walnut de 21.8 km², en el estado estadounidense de Iowa, indican que las mejores simulaciones se obtuvieron para tamaños de cuadro de 50 m, y que al disminuir más allá de este umbral los tamaños de cuadro no modifican de manera sustancial los errores en el cálculo de los flujos.

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 (México) 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 Bargaoui 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 explorar el efecto 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-Aranda (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 el cuadro 1 se muestran los ríos en los que se localizan las estaciones hidrométricas, las claves de las estaciones, el nombre, los periodos de disponibilidad de datos hidrometeorológicos, así como las coordenadas geográficas y el área drenada correspondiente. De las bases de datos antes mencionadas, y para cada cuenca seleccionada, se extrajeron las series diarias de caudales medios de precipitación, así como de temperaturas máximas y mínimas.

La figura 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, en específico 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.

Como se puede observar, estas cuencas se insertan entre latitudes extremas de México, ya que se localizan entre los 25° (río Sta. Catarina) y 15° de latitud (río Huixtla) norte. 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 y Woolhiser, 2002) es de tipo determinístico y de simulación continua, que discretiza la cuenca en una malla de cuadros, considerando las variaciones espacio-

Cuadro 1. Ríos, estaciones hidrométricas seleccionadas y comparación de áreas de las cuencas en estudio.

Río	Estación hidrométrica		Cuenca	Estado	Periodo 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	IXC ^a	Balsas	Puebla	De 1970 a 1990	18° 02' 23"	98° 43' 12"	4 979.2	4 665.0	-6.3	4 914.6	-1.3
Tacotalpa	Tapajulapa	30093	Grijalva	Tabasco	De 1970 a 1990	17° 28' 23"	92° 46' 51"	3 177.6	3 219.0	1.3	2 799.0	-11.9
Tamazula	Tamazula	10087	Culiacán	Durango	De 1963 a 1983	24° 56' 48"	106° 58' 50"	2 261.0	2 241.0	-0.9	2 296.9	1.6
Anacuzac	Anacuzac	18232	Balsas	Morelos	De 1962 a 1986	18° 36' 00"	99° 22' 15"	2 240.7	2 371.7	5.8	2 244.1	0.2
Santa Catarina	Cadereyta II	24327	San Juan	Nuevo León	De 1966 a 1980	25° 35' 25"	99° 58' 30"	1 804.7	1 871.0	3.7	1 772.3	-1.8
De Los Perros	Ixtepec	22017	Suchiate	Oaxaca	De 1961 a 1980	16° 33' 15"	95° 05' 30"	929.7	886.0	-4.7	995.2	7.0
Silao	Silao	12512	Lerma	Guanajuato	De 1962 a 1974	20° 57' 30"	101° 26' 30"	353.8	372.0	5.1	376.9	6.5
Huixtla	Huixtla	23008	Suchiate	Chiapas	De 1980 a 1994	15° 07' 42"	92° 28' 33"	352.0	377.0	7.1	346.2	-1.6

^a Estación operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE); ^b se utilizaron cartas topográficas del INEGI a escala 1:250 000.

temporales de las características físicas, precipitación y temperatura (Bâ et al., 2001).

La arquitectura del modelo se basa en tres recipientes: a) lagos y ciénagas, 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.

El volumen de agua disponible en cada área parcial se obtiene multiplicando el volumen de agua producido por el cuadro, por el porcentaje de área considerada de cada área parcial. Esta cantidad se suma a los que entran en el cuadro a partir del área parcial. La transferencia de la lámina de agua se efectúa de cuadro en cuadro. El coeficiente de transferencia de cada cuadro, que discretiza la cuenca, está conectado a las características del flujo hidráulico predominante, es decir, la capacidad

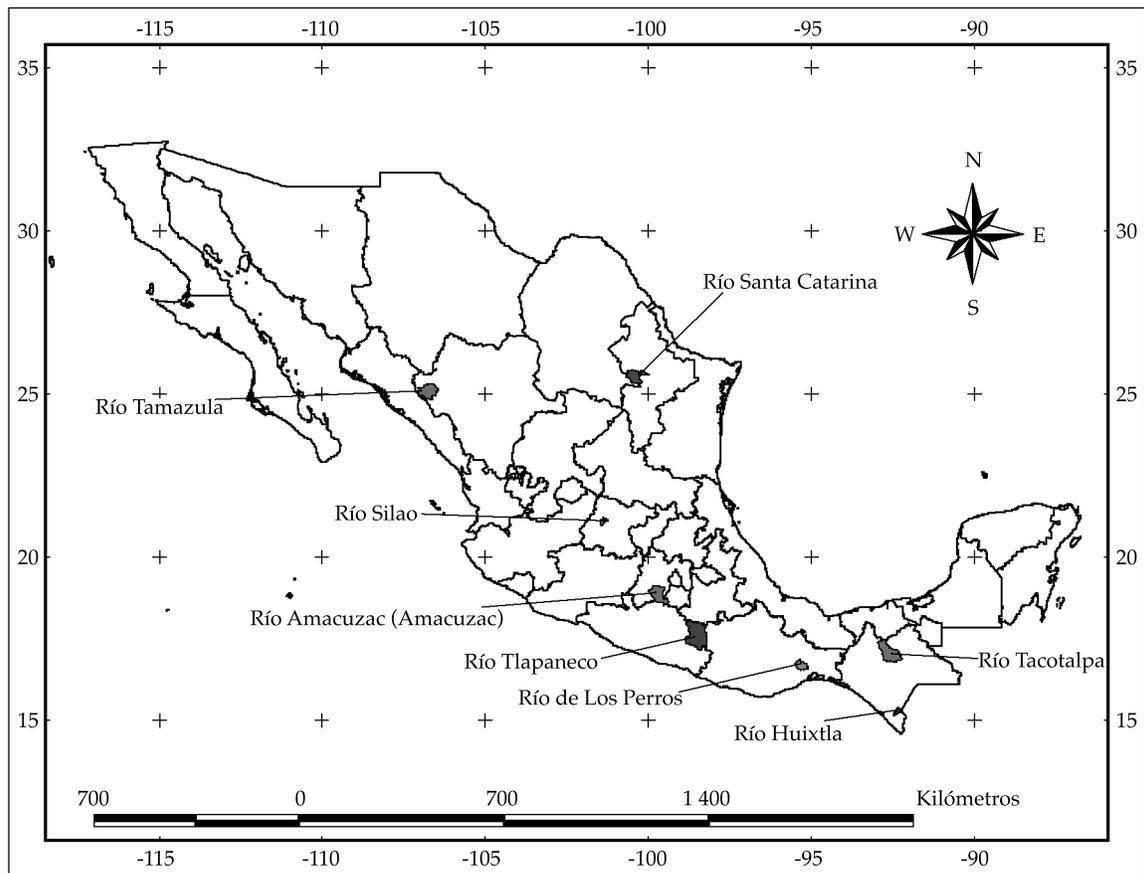


Figura 1. Ubicación en el contexto nacional de las cuencas en estudio.

de absorber la onda de almacenamiento por la red. Un buen índice de la capacidad de amortiguación de cada cuadro es el área de superficie libre del agua sobre cada cuadro. Un gran lago absorbe el flujo; sin embargo, su influencia depende también de la zona de captación aguas arriba, por ejemplo, un lago de 10 km² tiene poca influencia en la onda de crecida en una cuenca de 5 000 km². Por el contrario, si la cuenca es de 100 km², entonces este lago es muy importante. El modelo calcula el coeficiente de transferencia de cada área parcial usando la ecuación (1):

$$T_i = 1 - e^{-\left(\frac{K \times SA_i \times 100}{SL_i \times SC}\right)} \quad (1)$$

Donde:

- T_i : coeficiente de transferencia de cada cuadro i para el intervalo de tiempo diario.
- K : parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia; el valor de este parámetro se obtiene de la calibración del modelo.
- SA_i : superficie de la cuenca aguas arriba del cuadro i , en km².
- SL_i : superficie de agua sobre el área parcial i , en km².
- SC : superficie del cuadro que discretiza la cuenca, en km².

El movimiento tanto del flujo subterráneo como el vertical en la zona no saturada se realiza cuadro por cuadro a través del recipiente subsuelo, y se modela con base en los coeficientes especificados por el modelo

para tal fin, como por ejemplo: coeficientes de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero y coeficiente de vaciado del recipiente subsuelo (orificio de fondo), altura del umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero y altura del umbral de vaciado superior del recipiente acuífero.

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). En particular consisten en huecos (o valores de altitud de -9 999 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* (Eastman, 2004) con base en un proceso de reclasificación de los valores de píxeles con altitud registrada como -9 999 por un valor nulo; posteriormente se empleó un filtro para la asignación de altitud obtenida por interpolación.

Una vez corregidos los MDE, 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). Este proceso consiste en reducir de modo artificial y temporal la altitud de los píxeles que representan las corrientes o ríos principales de la cuenca. Así se facilita de forma notable la definición de los parteaguas, en especial 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* (figura 2).

La validación numérica de las simulaciones se realizó 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 (2). El dominio matemático de existencia del valor del coeficiente de Nash es de $-\infty$ hasta 1, donde la unidad representa la simulación perfecta:

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

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 (cuadro 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 (1 000 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

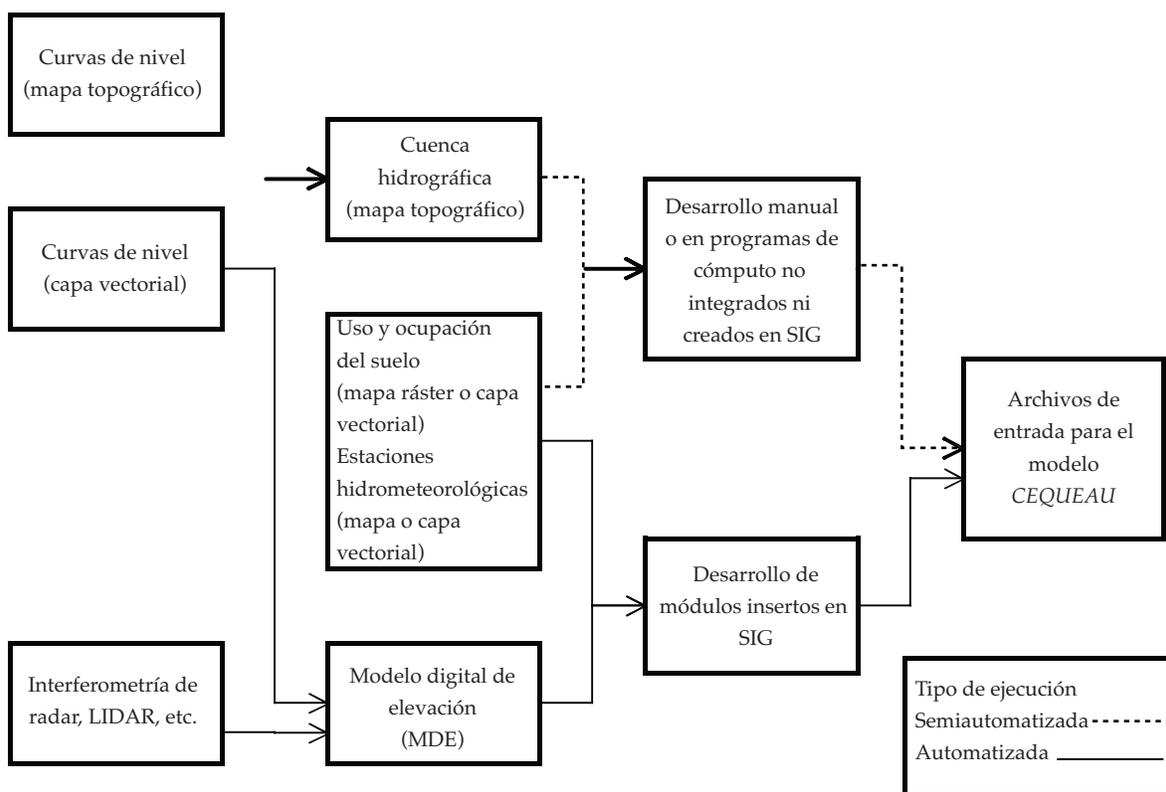


Figura 2. Proceso para la obtención de archivos del modelo CEQUEAU.

Cuadro 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	2 500	10 000	16	@ 500 m	5 000	7 000	10 000
Tacotalpa	Tapijulapa	30093	2 000	10 000	17	@ 500 m	5 000	7 000	10 000
Tamazula	Tamazula	10087	2 000	10 000	17	@ 500 m	5 000	7 000	10 000
Amacuzac	Amacuzac	18232	2 000	10 000	17	@ 500 m	5 000	7 000	10 000
Santa Catarina	Cadereyta II	24327	1 500	10 000	18	@ 500 m	5 000	7 000	10 000
De Los Perros	Ixtepec	22017	1 100	4 000	30	@ 100 m	2 000	3 000	4 000
Silao	Silao	12512	700	4 000	34	@ 100 m	2 000	3 000	4 000
Huixtla	Huixtla	23008	700	4 000	34	@ 100 m	2 000	3 000	4 000

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 periodos: 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 de forma manual (prueba y error), y la segunda consistió en la optimización automática de los parámetros, utilizando el método de Powell (1964) como herramienta de optimización disponible en el modelo. En *CEQUEAU* se pueden distinguir cinco tipos de parámetros: los parámetros de los recipientes, los parámetros que gobiernan la fusión de nieve, los parámetros que gobiernan la evapotranspiración, los parámetros de transferencia, y diversos parámetros y constantes. Los coeficientes de los recipientes (coeficiente de vaciado del recipiente suelo, coeficiente de vaciado del recipiente acuífero, coeficiente de vaciado del recipiente lagos y ciénagas, y coeficiente de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero) y las alturas de la lámina de agua en los recipientes (altura del umbral de extracción (por ETP) del agua a tasa potencial, altura del umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero, altura del umbral de vaciado superior del recipiente acuífero) son algunos de los parámetros del modelo que se definen mediante la calibración. Para cada cuenca se plantearon tres escenarios de calibración, empleando un tamaño de cuadro distinto en cada uno (cuadro 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 lado 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 msnm (río De Los Perros), hasta 2 198 msnm (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). El cuadro 1 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.

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 figura 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 se obtuvieron valores del coeficiente de Nash de 0.9823 y 0.9807,

respectivamente. Además, en las cuencas de los otros ríos aquí analizados también se obtuvieron valores ampliamente satisfactorios (cuadro 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 Santa 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.

Los resultados obtenidos muestran las diferencias entre valores máximos del coeficiente de Nash de las simulaciones realizadas. En el cuadro 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 Santa Catarina, respectivamente.

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

Cuadro 3. Características fisiográficas retenidas y resultados del efecto de la discretización en la simulación hidrológica.

Río	Estación	Características fisiográficas retenidas				Coeficiente de Nash			Lado de cuadro utilizado (m)	
		A (km ²)	P (km)	B (%)	Sc (grados)	Máximo	Mínimo	Diferencia	Máximo (Nash máximo)	Mínimo (Nash mínimo)
Huixtla	Huixtla	352.00	130.00	40.8	37.5	0.9823	0.9640	0.0183	3 700	2 800
Amacuzac	Amacuzac	2 240.60	368.70	41.8	23.89	0.9807	0.9591	0.0216	9 000	4 000
Tlapaneco	Ixcamilpa	4 979.17	521.80	67.4	28.39	0.9635	0.9402	0.0233	10 000	9 000
De Los Perros	Ixtepec	929.74	214.80	88.0	26.04	0.9142	0.8846	0.0296	3 100	3 700
Tamazula	Tamazula	2 260.99	324.20	88.9	42.14	0.9427	0.9109	0.0318	6 500	10 000
Tacotalpa	Tapijulapa	3 177.61	429.60	70.8	30.96	0.9545	0.9183	0.0362	6 500	7 500
Silao	Silao	353.78	129.10	34.3	21.61	0.8105	0.6701	0.1404	2 000	4 000
Sta. Catarina	Cadereyta II	1 804.69	344.20	31.9	39.75	0.8876	0.7220	0.1656	5 500	1 500

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.

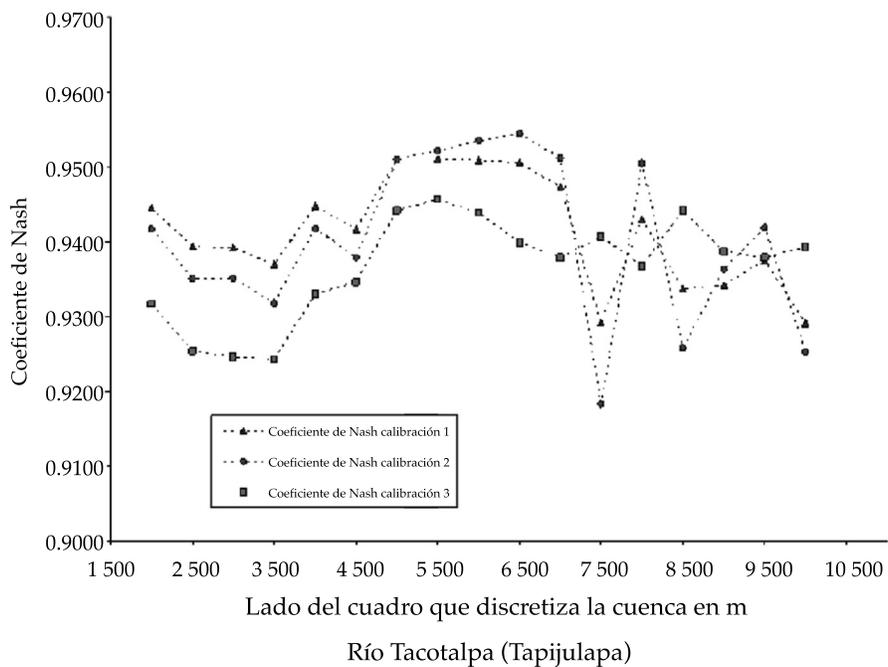
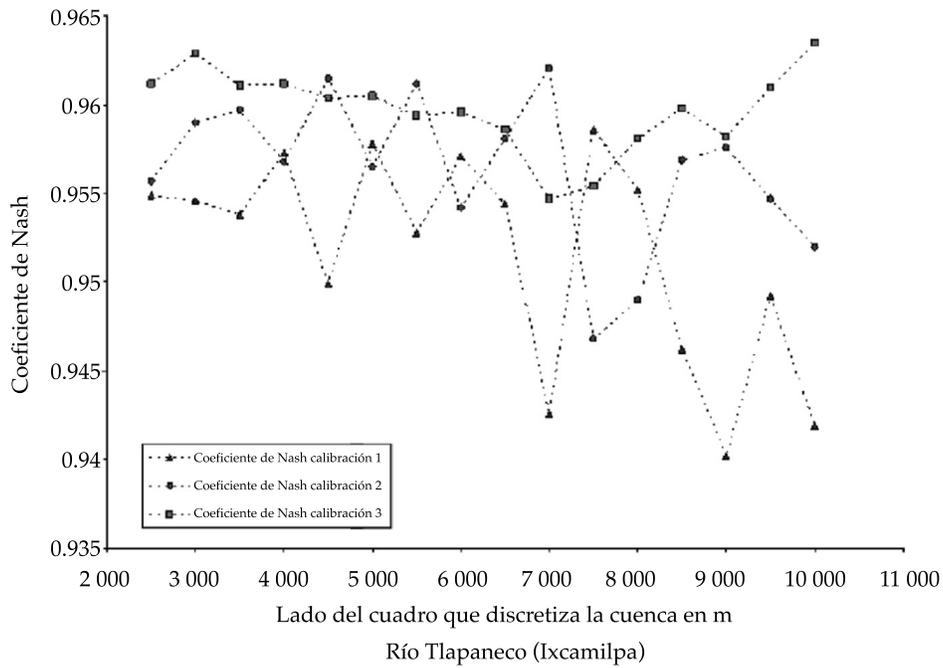


Figura 3. Resultado de la simulación hidrológica (Nash) en los ríos Tlapaneco, Amacuzac, Tacotalpa, Tamazula, Santa Catarina, De Los Perros, Silao y Huixtla.

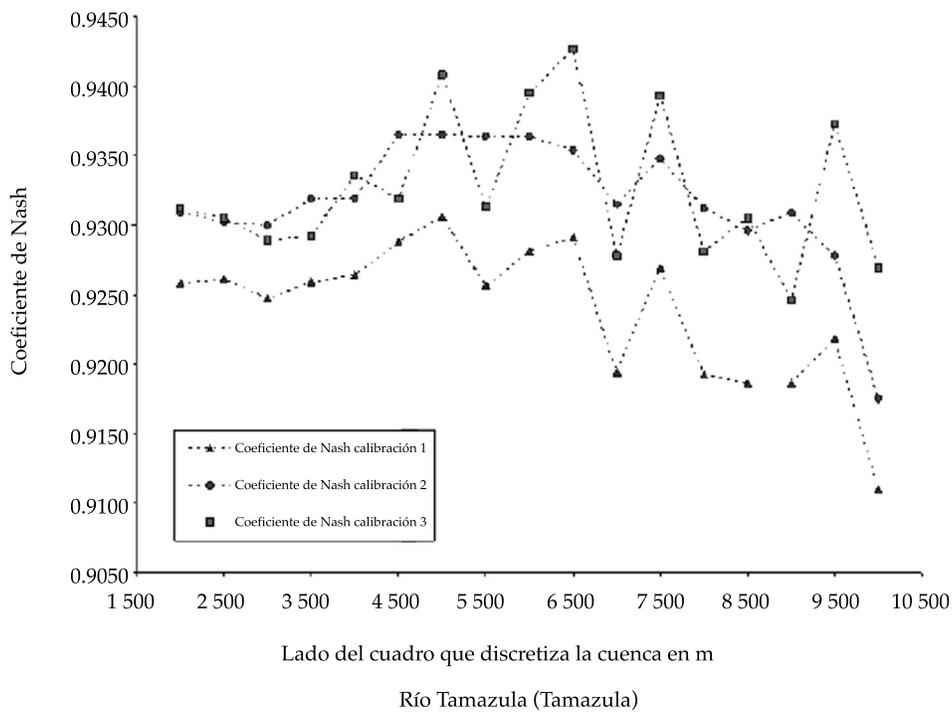
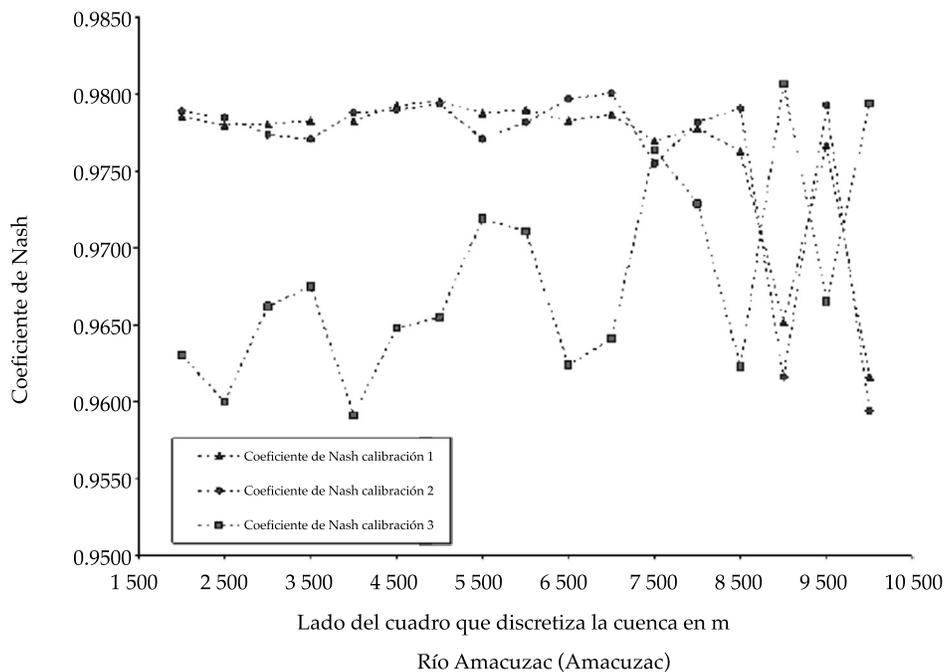


Figura 3 (continuación). Resultado de la simulación hidrológica (Nash) en los ríos Tlapaneco, Amacuzac, Tacotalpa, Tamazula, Santa Catarina, De Los Perros, Silao y Huixtla.

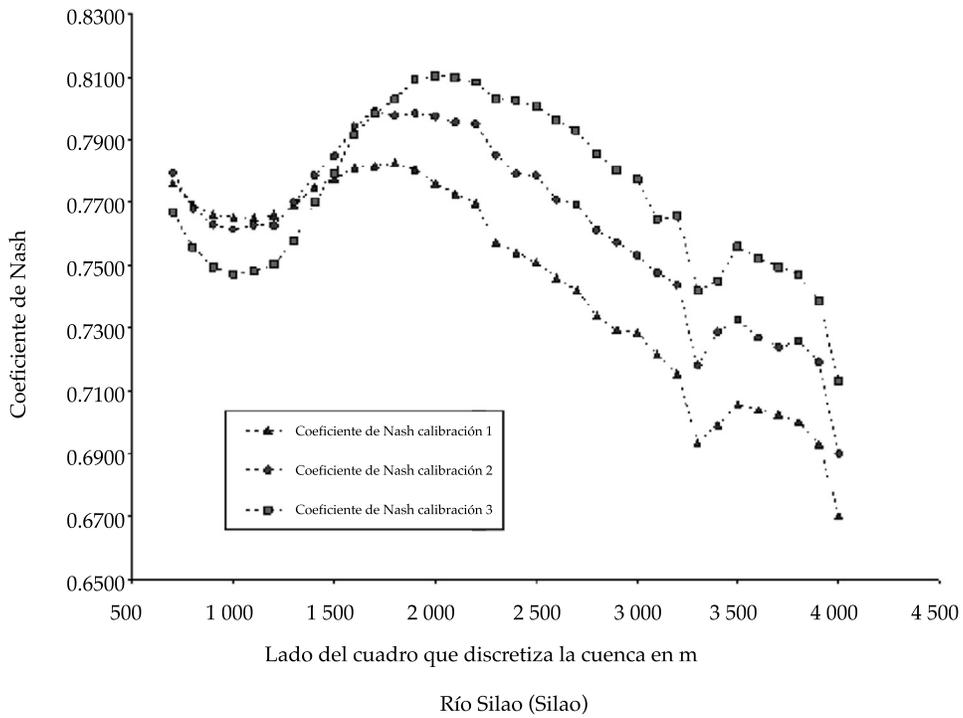
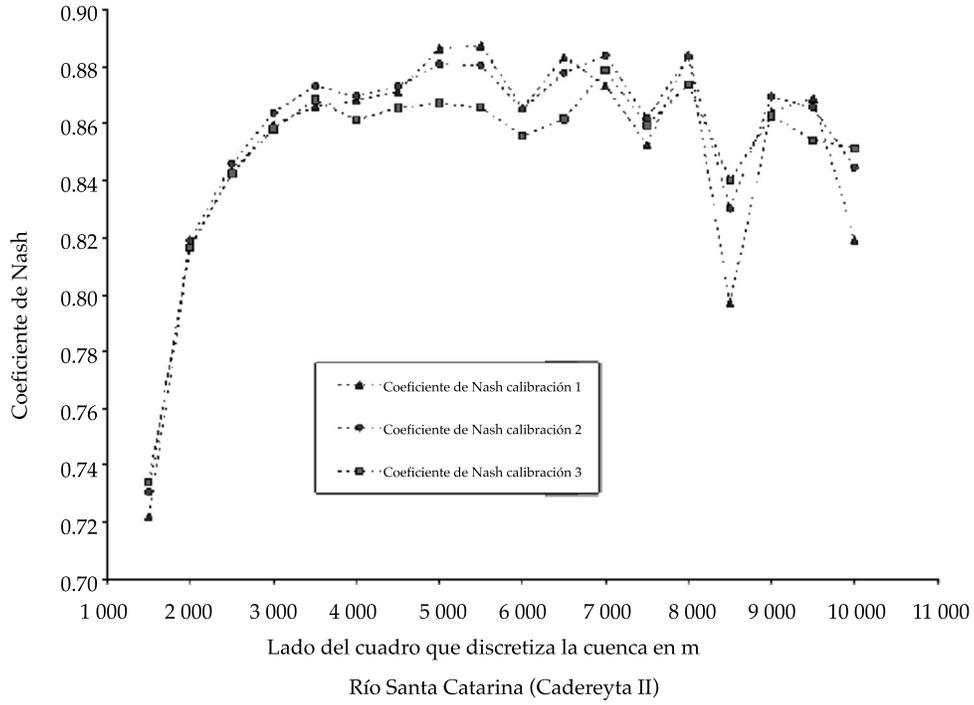


Figura 3 (continuación). Resultado de la simulación hidrológica (Nash) en los ríos Tlapaneco, Amacuzac, Tacotalpa, Tamazula, Santa Catarina, De Los Perros, Silao y Huixtla.

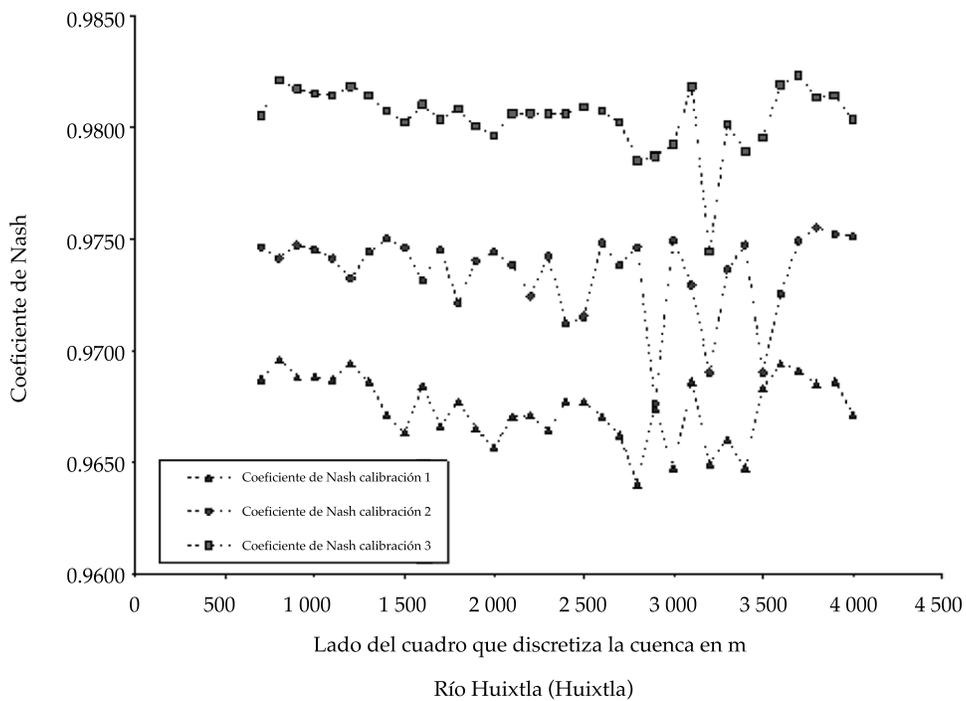
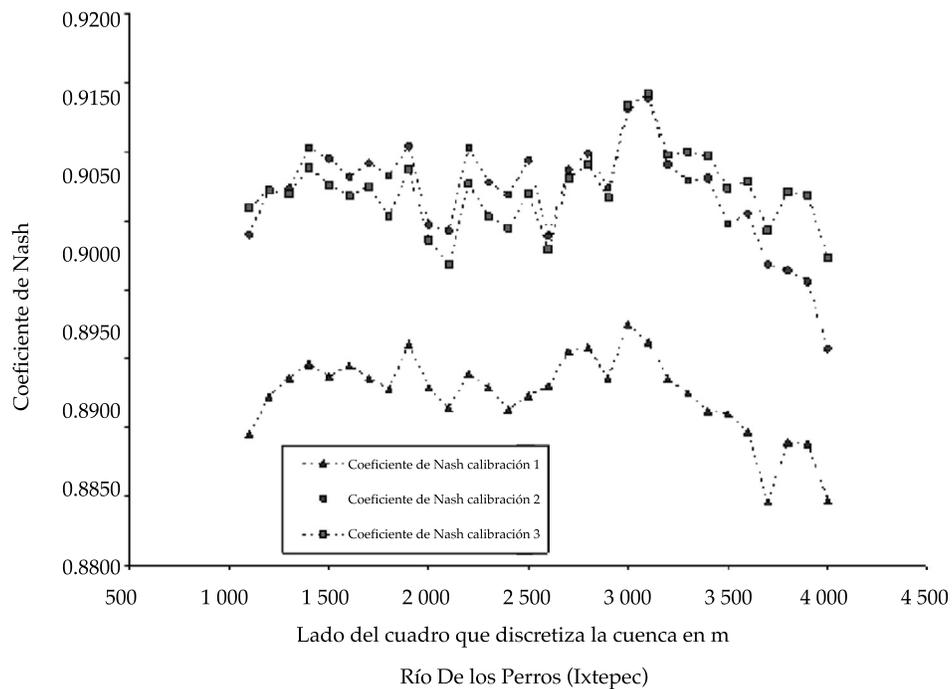


Figura 3 (continuación). Resultado de la simulación hidrológica (Nash) en los ríos Tlapaneco, Amacuzac, Tacotalpa, Tamazula, Santa Catarina, De Los Perros, Silao y Huixtla.

de alta pluviosidad, como es el caso de las cuencas de los ríos Huixtla, Amacuzac, Tlapaneco y 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, sí 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 Santa 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 y 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 el cuadro 3. El resumen del análisis del modelo construido se presenta en el cuadro 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 (3):

$$a = -0.042(A) + 0.515(P) - 31.818(B) + 0.566(Sc) - 47.68 \quad (3)$$

Donde a es el área del cuadro de discretización (km^2); A , el área de la cuenca (km^2); P , el perímetro de la cuenca (km);

B , la cobertura de bosque en la cuenca (en decimales), y Sc es la pendiente media de la cuenca (grados).

Asimismo, se obtuvo un modelo matemático de tipo regresivo para la estimación del perímetro de la cuenca en función del área de la misma (A en km^2). Ello, con la finalidad de construir gráficos de fácil empleo para la determinación del lado óptimo del cuadro de discretización espacial a utilizar en la modelación hidrológica distribuida para diferentes superficies de captación, así como para observar el efecto de la variación de los parámetros con respecto al tamaño de cuadro óptimo. El modelo retenido es cuadrático (cuadro 4), con un nivel de ajuste ampliamente satisfactorio ($r^2 = 0.976$) y está representado por la ecuación (4).

$$P = 0.152A - 1.287(10)^{-5}A^2 + 81.469 \quad (4)$$

Los gráficos del modelo de predicción del tamaño de cuadro óptimo de discretización para diferentes combinaciones de cobertura de bosque y pendientes media de una cuenca se presentan en la figura 4.

Conclusiones

Es importante resaltar que las simulaciones hidrológicas dependen en gran medida del esfuerzo de calibración empleado, así como de la cantidad y calidad de la información hidrometeorológica. Además, los resultados obtenidos son válidos para el modelo CEQUEAU, y para el tipo, cantidad y calidad de los datos disponibles en el estudio; se deberá analizar su aplicación a otros modelos de tipo distribuido.

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

Cuadro 4. a) Resumen del modelo matemático predictivo del cuadro óptimo de discretización espacial en la simulación hidrológica distribuida; b) modelo matemático de estimación del perímetro de una cuenca.

a)

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)
Análisis de varianza del modelo retenido (ANDEVA)					
Modelo retenido	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significado
Regresión	3 468.233	4	867.058	21.873	0.015
Residual	118.919	3	39.640		
Total	3 587.152	7			

Coefficientes del modelo retenido

Variable independiente: tamaño del cuadro óptimo de discretización espacial (a) en km²

Modelo retenido	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes tipificados	t	Significado
	β	Error típico	Beta		
Constante	-47.680	13.647		-3.494	0.040
A	-0.042	0.006	-2.860	-6.699	0.007
P	0.515	0.068	3.195	7.624	0.005
B	-31.818	11.030	-0.332	-2.885	0.063
Sc	0.566	0.319	0.192	1.771	0.175

b)

Modelo	r	r^2	r^2 corregido	Error típico de la estimación	VARIABLES explicativas
Retenido	0.991	0.983	0.976	21.702	A: área de la cuenca (km ²)
Análisis de varianza del modelo retenido (ANDEVA)					
Modelo retenido	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significado
Regresión	135 774.633	2	67 887.316	144.143	0.000
Residual	2 354.867	5	470.973		
Total	138 129.500	7			

Coefficientes del modelo retenido

Variable independiente: perímetro de una cuenca (km)

Modelo retenido	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes tipificados	t	Significado
	β	Error típico	Beta		
Constante	81.469	18.644	1.686	4.370	0.007
A	0.152	0.018	-0.754	8.604	0.000
A ²	-1.287E-5	0.000		-3.851	0.012

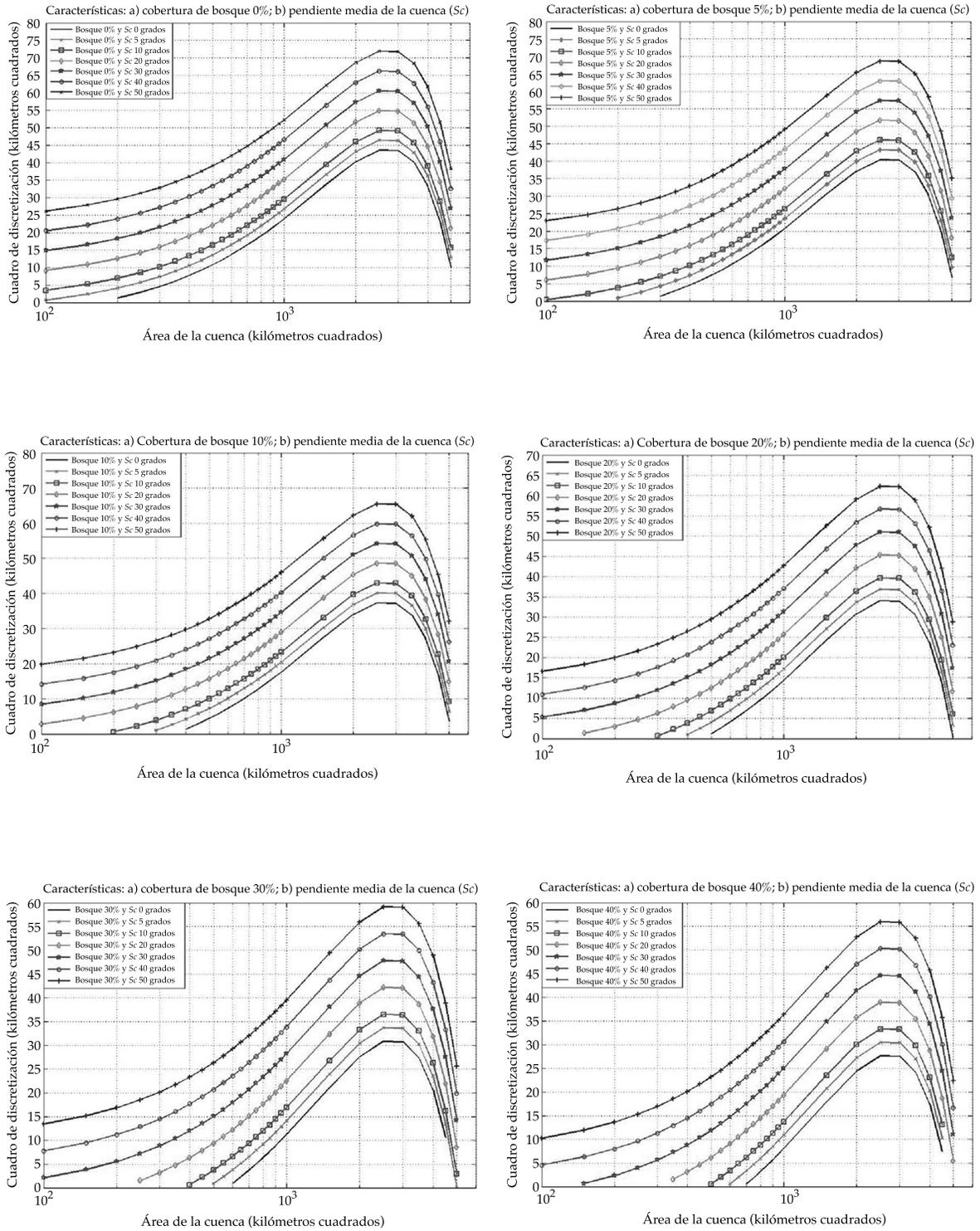


Figura 4. Cuadro óptimo de discretización espacial en función del área drenada, perímetro, cobertura de bosque y pendiente media de la cuenca.

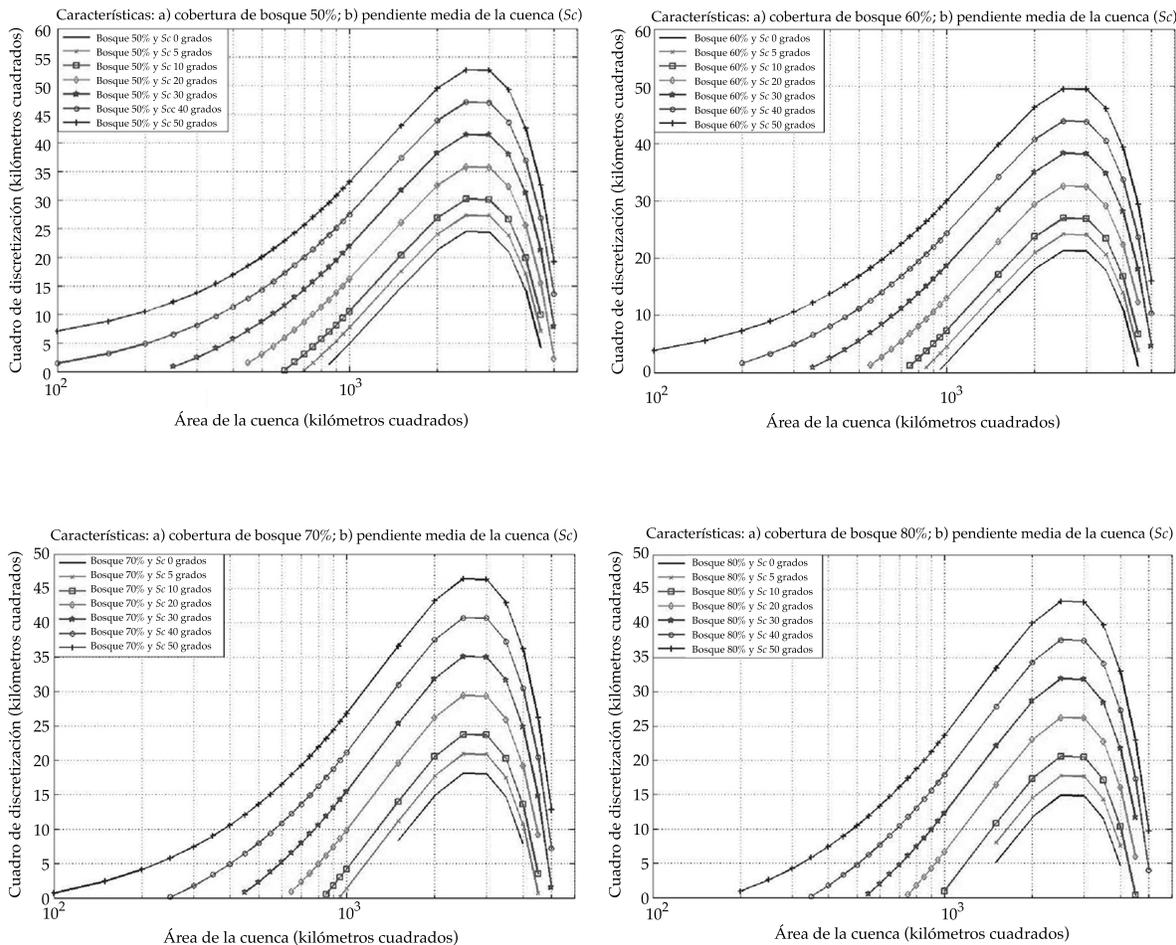


Figura 4 (continuación). Cuadro óptimo de discretización espacial en función del área drenada, perímetro, cobertura de bosque y pendiente media de la cuenca.

de evaluación de la calidad de la modelación disminuye, por lo general, al efectuar las simulaciones con lados de cuadros más pequeños.

El modelo matemático predictivo del cuadro óptimo de discretización espacial en la modelación distribuida lluvia-escurrimiento 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 5 000 km².

Con base en el modelo matemático de tipo

regresivo encontrado se construyeron nomogramas que facilitan la obtención del valor óptimo del cuadro de discretización espacial y la influencia de la variabilidad de las características fisiográficas. Cabe resaltar que este valor en realidad corresponde a la esperanza matemática del cuadro óptimo, por lo que deberá considerarse como valor central de la zona óptima.

Finalmente, se recomienda extender el estudio a un mayor número de cuencas, para incrementar el rango de aplicación a superficies de captación mayores a 5 000 km².

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt y al Comecyt por la beca otorgada a Víctor Hugo Guerra Cobián para la realización de sus estudios de doctorado. Asimismo, se agradecen al FOMIX-Gobierno del Estado de Tabasco por el financiamiento del proyecto: "Análisis de Variables Relacionadas al Cambio Climático e Indicadores de Monitoreo de su Impacto en Zonas de Conservación" con clave TAB-2003-C011474-2, y a la Universidad Autónoma del Estado de México a través del proyecto UAEM 2752/2009.

Recibido: 15/08/2012

Aceptado: 03/04/2013

Referencias

- AYADI, M. et BARGAOUI, Z. Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU. *Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol. 43, No. 5, 1998, pp. 741-758.
- BÂ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C. y ESTELLER, M.V. *Estudio Hidrológico Superficial y Subterráneo de la Cuenca del Río Balsas dentro del Estado de México (Etapa I)*. Reporte Núm. CIRA/012. México, D.F.: Universidad Autónoma del Estado de México, diciembre de 1999, 125 pp.
- BÂ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C. and RODRÍGUEZ, V. Simulation of the daily discharges of the Amacuzac and San Jeronimo watersheds in the State of Mexico, Mexico. *Hydraulic Engineering in México*. Vol. XVI, No. 4, October-December, 2001, pp. 117-126.
- BÂ, K.M., QUENTIN, E., CARSTEANU, A., OJEDA, I., DÍAZ-DELGADO, C., GUERRA-COBIÁN, V.H. Modelling a large watershed using the CEQUEAU model and GIS: case of the Senegal River at Bakel. *Geophysical Research Abstracts*. Col. II -EGU2009-0, 2009.
- BÂ, K.M., GUERRA-COBIÁN, V.H., PÉREZ-CÁMARA, A.G., DÍAZ-DELGADO, C., QUENTIN, E. y FRANCO-PLATA, R. *Implementación y Calibración de un Modelo Hidrológico Distribuido en la Cuenca del Río Conchos*, Clave: UAEM 1971/2004. México, D.F.: Universidad Autónoma del Estado de México, 2005, 75 pp.
- BANDAS. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales* (CD). México, D.F.: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Comisión Nacional del Agua, 2000.
- BORMANN, H. Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multi-scale TOPLATS model. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 10, 2006, pp. 165-179.
- BRONSTERT, A., NIEHOFF, D., and BÜRGER, G. Effects of climate and land-use on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrol. Process*. Vol. 16, No. 2, 2002, pp. 509-529.
- CALORE, C., PARODI, U.G., LA BARBERA, P., BINLEY, A., BUCKLEY, K. MIDA, a distributed hydrological model: Its behavior under some different parameter and data discretization conditions. *Phys. Chem. Earth*. Vol. 20, No. 3-4, 1995, pp. 403-414.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Tercera reimpresión. México: Editorial Universitaria Potosina, 1998, 435 pp.
- CHAPLOT, V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology*. Vol. 312, 2005, pp. 207-222.
- CFE. *Boletín hidrométrico No. 41 Año 1999*. México, D.F.: Departamento de Hidrometría de la Comisión Federal de Electricidad, Informe de la Subdirección Técnica, 2000, 67 pp.
- CRISTIAENS, K. and FEYEN, J. Use of sensitivity and uncertainty measures in distributed hydrological modeling with an application to the MIKE SHE model. *Water Resources Research*. Vol. 38, No. 9, 2002, pp. 1-15.
- EASTMAN, J. R. *Idrisi Kilimanjaro. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2004, 327 pp.
- ERIC II. *Extractor Rápido de Información Climatológica* (CD). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2000.
- FONI, A. and SEAL, D. Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control. *Acta Astronautica*. No. 54, 2003, pp. 565-570.
- FORTIN, J.-P., TURCOTTE, R., MASSICOTTE, S., MOUSSA, J.F., VILLENUEVE, J.-P. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of Model. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2001, pp. 91-99.
- FREEZE, R., HARLAN, R. Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*. Vol. 9, 1969, pp. 237-258.
- GÓMEZ, M.A. *Desarrollo de una metodología geomática para la evaluación por subcuenca de indicadores de deficiencias en tratamiento de aguas residuales*. Tesis de maestría. México, D.F.: Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México, 2005, 155 pp.
- GRAYSON, R. and BLOÖSCHL, G. *Spatial patterns in catchman hydrology: observations and modelling*. Cambridge: Cambridge University Press, The Edinburgh Building, 2000.
- GUERRA-COBIÁN, V.H., BÂ, K.M., QUENTIN-JORET, E., DÍAZ-DELGADO, C., and CÂRSTEANU, A. Use of NEXRAD information for hydrological modeling in watersheds with sparse rain gauge networks. *Water Technology Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 35-48
- GUERRA-COBIÁN, V.H., BÂ, K.M., QUENTIN-JORET, E., DÍAZ-DELGADO, C., FRANCO-PLATA, R. y MANZANO-SOLÍS, L.R. *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 de 2006, Ciudad Guayana, Venezuela.
- HAIR, J.F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L., and BLACK, W.C. *Multivariate data analysis*. Fifth edition, Prentice Hall, 1998, 730 pp.
- HALL, O., FALORNI, G., and BRAS, R.L. Characterization and Quantification of Data Voids in the Shuttle Radar Topography Mission Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol. 2, No. 2, 2005, pp. 177-181.
- HUNDECHA, Y. and BÁRDOSSY, A. Modeling of effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of Watershed model. *Journal of Hydrology*. Vol. 292, 2004, pp. 281-295.
- JOHNSON, R.A. and WICHERN, D.W. *Applied multivariate statistical analysis*. Fifth edition. Prentice Hall, 2002, 767 pp.
- KOREN, V., FINNERTY, R., SHAAKE, J., SMITH, M., SEO, D., and DUAN, Q.Y. Scale dependencies of hydraulic models to spatial variability of precipitation. *Journal of Hydrology*. Vol. 217, 1999, 285-302 pp.
- KRAJEWSKI, W., LAKSHMI, V., GEORGAKAKOS, K., and JAIN, S. A Montecarlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. *Water Resour. Res.* Vol. 27, No. 1, 1991, pp. 119-128.
- KUMAR, R., SAMANIEGO, L., ATTINGER, S. The effects of spatial discretization and model parametrization on the prediction of extreme runoff characteristics. *Journal of Hydrology*. Vol. 392, 2010, pp. 54-89.
- KUO, W.-L., STEENHUIS, T., McCULLOCH, C., MOLER, C., WEINSTEIN, D., DeGLORIA, S., and SWANEY, D. Effects of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model. *Water Resources Research*. Vol. 35, No. 11, 1999, pp. 3419-3428.
- LLANOS, H., BÂ, K.M., y CASTIELLA, A. Modelación Hidrológica de la Cuenca Alta del Río Ega (País Vasco y Navarra). *Ingeniería del Agua*. Vol. 6, núm. 3, 1999, pp. 241-250.
- LLANOS, H., BÂ, K.M., y CASTIELLA, A. Aplicación de Modelos Matemáticos para la Simulación de Avenidas en Cuencas de la Red Hidrográfica de la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Revista de Estudios del Museo de Ciencias Naturales de Avala*. Vol. 19, 2004.
- MOLNAR, D.K. and JULIEN, P.Y. Grid-size effects on surface runoff modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*. ASCE. 2000, pp. 8-16.
- MORIN, G. et PAQUET, P. *Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-É.T.É.* Rapport de recherche no. 000926, 2007, 458 pp.
- MORIN, G., SOCHANSKI, W., et PAQUET, P. *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, 1997, 135 pp.
- MORIN, G., SOCHANSKI, W., et PAQUET, P. *Le modèle de simulation de quantité CEQUEAU-ONU. Manuel de référence*. Organisation des Nations Unies et INRS-Eau. Rapport de recherche No. 519, 1998, 252 pp.
- NASH, J.E. and SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*. Vol. 10, 1970, pp. 282-290.
- POWELL, M.J.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal*. Vol. 7, 1964, pp. 155-162.
- RÉMÉNIÉRAS, G. *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris: Collection de la Division Recherche et Développement d'Electricité de France, Eyrolles, 1999, 456 pp.
- SINGH, V.P. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado: Water Resources Publications, 1995, 346 pp.
- SINGH, V.P. and WOOLHISER, D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. July / August, 2002, pp. 270-292.
- USGS. *Seamless Data Distribution System, Earth Resources Observation and Science* [en línea]. US Geological Survey. Consulta realizada en junio de 2005, Disponible para World Wide Web: <http://seamless.usgs.gov/>.
- WMO. *Intercomparison of models of snowmelt runoff*. Operational Hydrology Report No. 23. World Meteorological Organization, 1986, 214 pp.
- WMO. *Simulated real-time intercomparison of hydrological models*. Operational Hydrology Report No. 38. World Meteorological Organization, 1992, 175 pp.

Abstract

GUERRA-COBIÁN, V.H., BÂ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C. & QUENTIN, E. *Spatial discretization effect on flow simulations using the CEQUEAU distributed model. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 33-53.*

This paper discusses the effect of the spatial discretization of a basin on flow simulations using the CEQUEAU model. This is a distributed model that was developed by the National Scientific Research Institute of the University of Quebec, Canada. CEQUEAU has been used in several countries to model runoff and by studies to compare models generated by the World Meteorological Organization (WMO). This model discretizes the basin into square elements, calculating water balance square-by-square, taking into account precipitation, temperature, percentage of lakes, percentage of forest, etc. The main objective of this work was to identify criteria to determine the optimal grid size for the discretization of a basin, assuming adequate representation of precipitation. Eight basins in the Mexican Republic with different sizes and different climates were analyzed. The physiographic characteristics were determined with SIG-Idrisi. In addition, CEQUEAU was calibrated and validated daily with various square sizes, evaluating the certainty level with numerical Nash criteria and graphs. Based on the results from the experimental design proposed, a suitable mathematical regression model was built to obtain the optimal spatial discretization grid size using easily-obtained physiographic parameters as explanatory variables.

Keywords: Basin, CEQUEAU, flow, GIS-Idrisi, hydrological distributed modeling, physiographical parameters, spatial discretization.

Dirección institucional de los autores

Dr. Víctor Hugo Guerra-Cobián

Coordinador del Centro Internacional del Agua
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria
66451 A.P. 17, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León,
México
Teléfonos: +52 (81) 1442 4426 y 8329 4000, extensión 7227
Fax: +52 (81) 8376 0477
victor.guerracb@uanl.edu.mx

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

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria
50130 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (722) 2965 550
Fax: (722) 2965 551
khalidou@uaemex.mx
cdiazd@uaemex.mx

Dr. Emmanuelle Quentin

Centro Integrado de Geomática Ambiental / Centro de
Recursos Idrisi
Universidad Nacional de Loja
Ciudadela Universitaria "Guillermo Falconi Espinosa"
La Argelia, Casilla 1101 2636 o Casilla letra "S", Loja,
ECUADOR
Teléfono: +52 (593) 81496 522
Fax: +52 (593) 7254 5155
emmanuelle.quentin@gmail.com