

# Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México

Khalidou M. Bâ  
Carlos Díaz Delgado  
Verónica Rodríguez Osorio

Universidad Autónoma del Estado de México

*Se analiza el comportamiento hidrológico de los caudales de las cuencas de los ríos Amacuzac y San Jerónimo hasta las estaciones hidrométricas Amacuzac y Coatepequito, respectivamente, con base en la aplicación de dos modelos hidrológicos determinísticos de arquitectura diferente: CEQUEAU (Morin y Paquet, 1995) y SSARR (USACE, 1991). La aplicación de estos modelos se llevó a cabo en la cuenca Amacuzac y conforme a los resultados obtenidos, CEQUEAU se aplicó después a la subcuenca del río San Jerónimo. Es importante señalar que la principal diferencia entre ambos es que CEQUEAU tiene en consideración las distintas características fisiográficas que componen el sistema hidrológico mediante la discretización espacial de la cuenca, mientras que SSARR simula procesos con base en relaciones funcionales empíricas. Los datos hidrometeorológicos utilizados provienen de las bases de datos ERIC y Bandas (IMTA, 1996a-b). Para el río Amacuzac, los periodos de registro utilizados en la calibración y validación del modelo fueron de 1961 a 1975 y de 1976 a 1985, respectivamente; para el río San Jerónimo el periodo de calibración fue de 1965 a 1970 y el de validación fue de 1980 a 1985. De acuerdo con los criterios utilizados para determinar la calidad de las simulaciones, los dos modelos reconstituyen los caudales medios diarios de la cuenca Amacuzac de manera satisfactoria. Sin embargo, se destaca que CEQUEAU es un modelo más amigable, con herramientas gráficas y numéricas que facilitan la simulación de caudales.*

**Palabras clave:** hidrología, río Amacuzac, río San Jerónimo, modelos matemáticos, CEQUEAU, SSARR, caudales diarios.

## Introducción

A lo largo del tiempo se han utilizado diferentes modelos hidrológicos para estimar las magnitudes de las variables que intervienen en el ciclo del agua. En hidrología, la mayoría de los modelos tienen por finalidad estimar los recursos hídricos de una cuenca. Un modelo de simulación de caudal es útil para resolver un importante número de estudios hidrológicos tales como: la reconstitución y generación de series largas de datos (evaluación de recursos, dimensionamiento de obras hidráulicas), la detección de errores de observaciones, la previsión de eventos extremos, la estimación de caudales en puntos no aforados, la operación de embalses, la realización de estudios ambientales, etcétera. Complementariamente, con enfoques multidisciplinarios, los modelos hidrológicos son útiles en la simulación de la calidad del agua, ejemplo de ello son los mode-

los de simulación del transporte de contaminantes y el de simulación de los niveles de un acuífero en zonas agrícolas, entre otros.

Existen dos tipos de modelos de simulación lluvia-escurrimiento: los globales y los llamados distribuidos. En los primeros, las variables meteorológicas y fisiográficas se promedian en el conjunto de la cuenca, mientras que en los modelos distribuidos, que pueden considerarse como un avance significativo en la investigación hidrológica, permiten tener en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia y de los diferentes parámetros que intervienen en cada proceso (evapotranspiración, infiltración, escurrimientos subsuperficial y subterráneo, entre otros). Lo anterior tiene como fundamento la evidencia de que en una misma cuenca existe una variabilidad espacial natural de la precipitación, de los parámetros de infiltración y de la estructura de la red de drenaje. Así pues, la tendencia actual

es el desarrollo y la utilización de modelos distribuidos, a pesar de que en muchos estudios aún se siguen aplicando los llamados modelos globales.

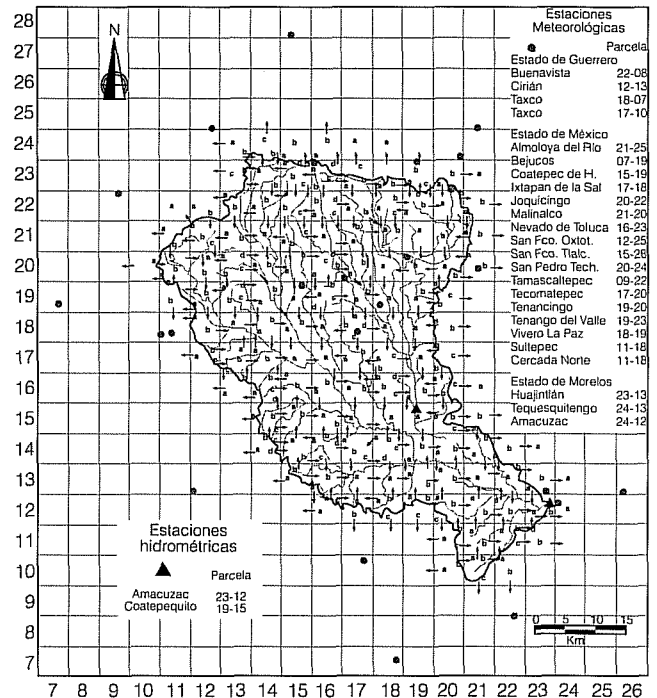
El presente trabajo se orienta al modelado matemático y al análisis comparativo de los resultados de la simulación de los caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo, que se realizaron con ayuda de dos modelos determinísticos: el modelo *CEQUEAU* (Morin y Paquet, 1995) y el *SSARR* (USACE, 1991).

## Descripción de las cuencas

El río Amacuzac es afluente derecho del río Balsas (ilustración 1), nace en las faldas del volcán Nevado de Toluca, cerca del poblado de Tequesquipan, Estado de México, en donde la corriente se conoce como río Texcaltitlán. El río Amacuzac cuenta con seis principales afluentes que son los ríos de las Flores (Ixtlahuaca), Malinaltenango, San Jerónimo, Chalma, Yautepec y Cuautla (*Boletín Hidrológico*, núm. 47, 1970). Los tres primeros ríos se encuentran aguas arriba de la estación Amacuzac, mientras que los tres últimos están aguas abajo de ésta. Esta cuenca posee una superficie total de 2,240 km<sup>2</sup> hasta la estación hidrométrica Amacuzac. Asimismo, es importante señalar que en la zona existe un conjunto de obras hidráulicas (presas, canales) que derivan agua para riego de las diferentes corrientes y manantiales localizados en dicha zona.

El río San Jerónimo se origina en la confluencia de los ríos San Gaspar y Tenancingo, que descienden por la vertiente sur del eje volcánico, 7.5 km al este de San Gaspar Tonatico, Estado de México. Con base en las aportaciones hídricas, esta corriente representa el prin-

Ilustración 2. Esquematación de la cuenca del río Amacuzac.



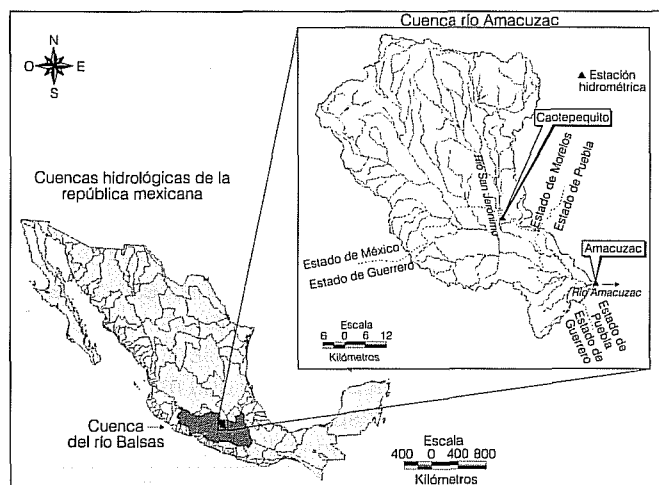
cipal afluente del río Amacuzac, con una contribución aproximada de 30% del valor de caudal registrado en la estación Amacuzac. La superficie de la cuenca del río San Jerónimo hasta la estación hidrométrica Coatepequito es de 673 kilómetros cuadrados.

## El modelo *CEQUEAU*

El modelo hidrológico *CEQUEAU* se desarrolló en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU) de la Universidad de Québec, Canadá, para reproducir el fenómeno del escurrimiento de una cuenca (Morin y Paquet, 1995). Actualmente se utiliza en diferentes países para simulaciones continuas o para previsión hidrológica con fines de gestión de embalses (Llanos et al., 1999; Ayadi y Bargaoui, 1998). *CEQUEAU* es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos; en este sentido, la cuenca está dividida en superficies elementales de forma cuadrada (ilustración 2), lo cual le permite al modelo calcular los caudales en cualquier parcela y tener en cuenta las variaciones espacio-temporales de las características fisiográficas. El modelo consta de dos partes (ilustración 3), cuyo objetivo es la descripción del flujo de agua hacia la desembocadura (Llanos et al., 1999).

La primera parte, conocida como función de producción, se refiere al modelado del flujo vertical del

Ilustración 1. Cuenca de los ríos Amacuzac y Balsas en el contexto de la república mexicana.



agua (lluvia, evapotranspiración, infiltración, etcétera) y la segunda, llamada función de transferencia, analiza, precisamente, la transferencia del flujo en la red de drenaje y tiene en cuenta la influencia de lagos, ciénagas e instalaciones artificiales tales como presas y derivaciones, entre otras.

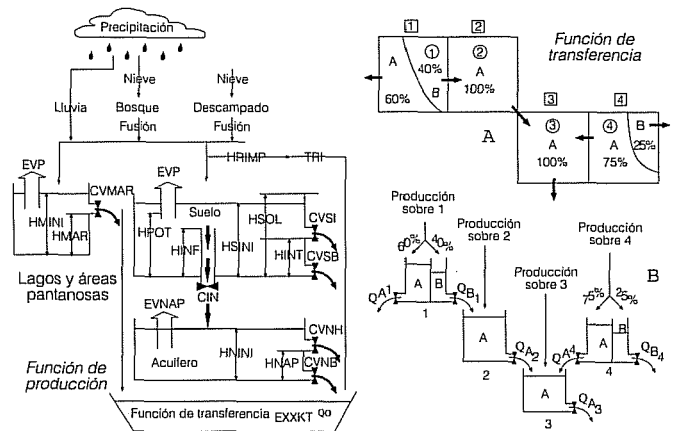
La primera etapa, es decir, la función de producción, consiste en determinar la lámina de agua en el "recipiente" denominado suelo, la cual puede tener dos orígenes diferentes: el agua de lluvia y el agua derivada de la fusión de nieve (cuando se presenta). La lámina de agua procedente de la nieve, junto con las precipitaciones en forma líquida, se incorpora a la reserva de agua en el suelo. El modelo realiza esta operación para cada elemento e intervalo de tiempo, el cual puede ser de un día o incluso de una hora, según el paso del modelado que se desee.

Por su parte, la evapotranspiración se establece a partir de la fórmula de Thornthwaite modificada (Morin y Paquet, 1995) para que pueda utilizarse diariamente, o bien acorde con el intervalo de tiempo seleccionado. De acuerdo con la ilustración 3, los escurrimientos superficial y retardado dependen del nivel de agua en el recipiente *suelo*, de los coeficientes conceptuales de vaciado y de las propias cotas de vaciado de dicho recipiente. En este sentido, el escurrimiento superficial tiene lugar cuando la altura de agua disponible en este recipiente (HS o HSINI) rebasa la altura del mismo (HSOL). El escurrimiento retardado se produce si la altura de agua en el recipiente (HS o HSINI) es superior al umbral del orificio de vaciado (HINT), o en otras palabras, cuando el volumen de agua infiltrada es mayor que el déficit de humedad del suelo.

Los escurrimientos superficial y subsuperficial generados en cada elemento se adicionan a los escurrimientos que ocurren en las superficies impermeables, para dar lugar a una parte de la lámina de agua finalmente disponible para su incorporación a los cauces.

Por otro lado, hay que considerar la parte de agua que potencialmente puede infiltrarse si existe un acuífero subyacente, y que se va a infiltrar a través de la zona no saturada, alimentando directamente a un segundo recipiente (acuífero). Las salidas o aportaciones que se deriven de dicho recipiente dependerán de la cota del nivel piezométrico en el acuífero, de los coeficientes de vaciado y de dos alturas de vaciado definidas para diferentes situaciones hidráulicas (ilustración 3). Estas aportaciones llegan a las láminas de agua precedentes, determinando la cantidad total de agua disponible en la cuenca para el escurrimiento en los cauces. La función de producción, por tanto, está orientada a obtener un volumen de agua disponible para ser inmediatamente transferido. Dicha transfe-

**Ilustración 3. Funciones de producción y de transferencia del modelo CEQUEAU.**



ncia se efectúa de elemento en elemento. El volumen de agua disponible en cada elemento parcial se obtiene multiplicando la lámina de agua producida por el cuadro entero por la superficie del elemento parcial considerado. Este volumen se suma a los volúmenes entrantes a este elemento, procedentes de los elementos parciales vecinos (ilustración 3).

### El modelo SSARR

Uno de los modelos deterministas ampliamente utilizados para la simulación continua del escurrimiento superficial en una cuenca es el modelo *SSARR*, el cual se creó para la síntesis de caudales y la regulación de embalses. Desarrollado por la Armada de los Estados Unidos (USACE, 1991), ha estado en proceso de desarrollo y aplicación desde 1956. Fue concebido a fin de estimar escurrimientos superficiales e inundaciones, así como para desarrollar estudios de diseño y operación de embalses (Kang, 1978; Singh, 1995). El *SSARR* se compone de tres modelos: un modelo hidrológico de cuenca, otro de propagación de caudales a través de canales y uno más de regulación de embalses (Kang, 1978; Viessman *et al.*, 1989). La calibración se efectúa por la técnica de prueba y error. Para su aplicación, es necesario iniciar con una subdivisión de la cuenca en unidades hidrológicas homogéneas en tamaño y carácter, con características consistentes, como confluencias de cursos de agua, embalses, puntos de bifurcación y tipos de suelo. Los caudales se estiman para todos los puntos significativos a través del sistema hidrológico.

Así pues, el proceso representado por el modelo *SSARR* puede dividirse en tres categorías: procesos en la superficie del suelo, por debajo la superficie del

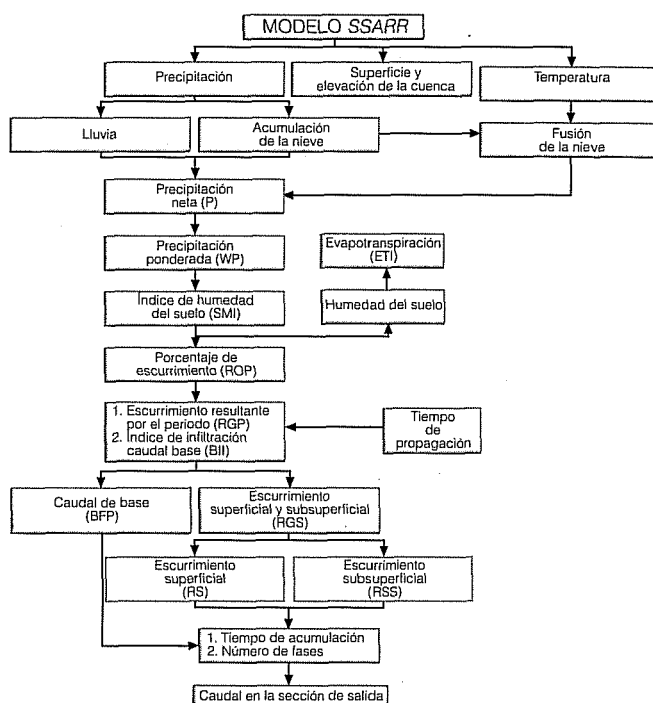
suelo y los relativos a los canales de flujo. Para los procesos de la primera categoría, la infiltración no se calcula directamente, sino por medio de índices que toman en cuenta las características físicas del medio. La separación entre el caudal superficial y el subterráneo se efectúa con ayuda de relaciones empíricas (tablas y gráficas) que establecen la vinculación entre el índice de humedad del suelo y el escurrimiento; la dinámica de fusión de nieve (si ésta existe) se realiza con ayuda de índices de temperatura del aire, o bien, por el método de intercambios térmicos. Para esta categoría de procesos, el laminado superficial se lleva a cabo con ayuda de las muestras históricas disponibles. Dentro de la segunda categoría, es decir, los procesos que se presentan por debajo de la superficie del suelo, el cálculo del almacenamiento de agua en forma de humedad del suelo se efectúa mediante el balance hídrico del suelo. El almacenamiento y flujo subterráneo dependen de los índices de infiltración y, por otro lado, el laminado de agua subterránea se calcula, como el laminado superficial, con base en la información histórica disponible. La tercera categoría corresponde a los procesos relacionados con los canales de flujo, que se clasifican en principales y secundarios, y se dividen en tramos de acuerdo con las características de flujo lo más homogéneas posible. En cada tramo se consideran los embalses y los lagos.

Finalmente, para el cálculo del laminado del agua en embalses y canales de flujo se emplea la ecuación de continuidad y el método de Muskingum. Estas operaciones se repiten las veces necesarias hasta obtener el hidrograma de salida de toda la cuenca en estudio. Los datos requeridos por el modelo son, entonces, las precipitaciones diarias (lluvia y nieve), temperatura, insolación, evolución de la altura de la capa de nieve y el caudal diario. La ilustración 4 muestra la estructura general del modelo *SSARR*, así como sus principales componentes (Llamas, 1993).

### Aplicación y resultados del modelado matemático de caudales

Para aplicar el modelo *CEQUEAU* fue preciso especificar el movimiento del agua, por lo que algunos de los elementos cuadrados se subdividieron en elementos parciales, tomando en consideración las diferentes líneas divisorias de agua externas e internas existentes en la cuenca, así como el trazo de los cauces que componen la red hidrográfica. Esta subdivisión, que se realiza manualmente, permite además resaltar la importancia de la influencia de la topografía en la generación de dicho proceso. De este modo, cada elemento parcial queda caracterizado por dos variables: el

Ilustración 4. Estructura general del modelo *SSARR*.



porcentaje de superficie que ocupa en el elemento cuadrado al que se encuentra adscrito y el código numérico del elemento parcial al que transfiere el escurrimiento en él generado. En definitiva, se trata de establecer una jerarquización de la red de drenaje, elemento por elemento, dispuestos sucesivamente aguas abajo, cuya esquematización para la cuenca del río Amacuzac se muestra en la ilustración 2. Además, es preciso determinar para cada cuadro, a partir de cartografía temática, los porcentajes de superficie ocupados por bosques, lagos y ciénagas.

Para la aplicación del modelo *SSARR* se consideró una cuenca global hasta la estación hidrométrica Amacuzac, para lo cual sólo se requirió del modelo hidrológico de cuenca (*Watershed model*). En este modelo, las bandas de elevación pueden considerarse como subcuencas del sistema hidrológico. *SSARR* permite subdividir la cuenca de una hasta veinte bandas, sin restricción alguna sobre el área considerada en cada una de las bandas (USACE, 1991). La clasificación por bandas permite simular la variación de precipitación y humedad del suelo, como una función de la elevación del terreno. El escurrimiento se calcula para cada una de las bandas por separado, para combinar posteriormente los resultados y obtener el escurrimiento de toda la cuenca, siguiendo el procedimiento mostrado en la ilustración 4. El tiempo de análisis está supedita-

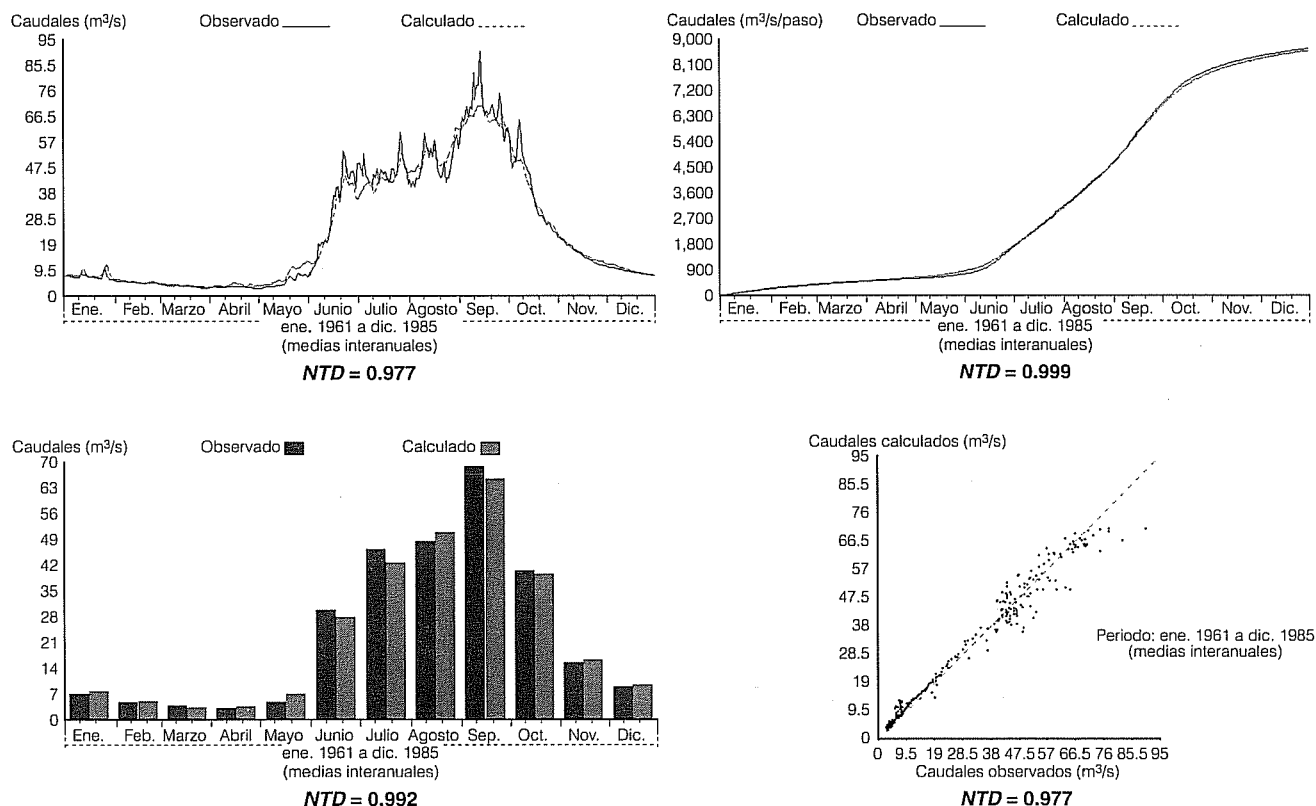
do a la disponibilidad de la información, pudiendo variar desde seis minutos hasta veinticuatro horas. En el caso de la cuenca Amacuzac, el paso correspondiente al tiempo de simulación es de un día.

La información meteorológica diaria de base, transformada por los modelos en caudal, procede de las siguientes estaciones pluviométricas representadas en la ilustración 2: Cirian, Taxco 2, Coatepec de H., Ixtapan, Joquicingo, Nevado de Toluca, Tecomatepec, Tenancingo, Vivero la Paz y Sultepec. Existen otras 14 estaciones en la región, pero finalmente no se consideraron en el estudio, al carecer de influencia significativa en el cálculo de la lluvia media de la cuenca. La información utilizada en el presente estudio corresponde a los datos concomitantes de precipitación (ERIC, IMTA, 1996a) y de los caudales de la estación de Amacuzac, sobre el río del mismo nombre (Bandas, IMTA, 1996b). Por lo tanto, el periodo de estudio para la cuenca Amacuzac se circunscribe de enero de 1961 a diciembre de 1985, donde el periodo de 1961 a 1975 corresponde al de calibración y el de 1976 a 1985, al de validación de los modelos. Cabe mencionar que la subcuenca correspondiente al río San Jerónimo sólo fue simulada con ayuda del modelo CEQUEAU. Lo anterior, con

base en los resultados obtenidos con la simulación de los escurrimientos de la cuenca Amacuzac, aplicando los dos modelos aquí presentados. Asimismo, es importante señalar que la información de caudal en la estación hidrométrica Coatepequito del río San Jerónimo existe en la base de datos únicamente para los años 1965 a 1970 y de 1980 a 1985. Estos periodos fueron utilizados, respectivamente, para la calibración y la validación del modelo CEQUEAU en esta cuenca.

Por otro lado, en el modelo matemático, la calibración es una parte esencial, ya que mal calibrado producirá siempre resultados falsos. Así, una parte de las observaciones disponibles se utilizaron para la calibración de los diferentes parámetros que requieren los modelos, y la otra se usó para la validación de cada uno de ellos. La metodología de calibración de parámetros empleada para el modelo SSARR se basó en la técnica de prueba y error, mientras que para el modelo CEQUEAU, se combinaron las técnicas de prueba y error y el método de optimación (BOTM), que es un algoritmo basado en el método de Powell (1964) incorporado en el mismo modelo. Este método de optimación consiste en maximizar (o minimizar, en su caso), el criterio de optimación elegido, tal como sucede en

**Ilustración 5. Gráficas comparativas entre los caudales observado y simulado de CEQUEAU (estación Amacuzac).**



el caso del criterio *NTD*, donde se busca la maximización del mismo. Para ambos modelos se utilizaron el criterio numérico *NTD* (ecuación 1) (Morin y Paquet, 1995; WMO, 1986, 1992, 1994) y las normas gráficas como hidrogramas observados-calculados, caudales acumulados, diagrama de dispersión e histograma de los caudales mensuales.

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{NNE} \sum_{i=1}^{365} (QOni - QCni)^2}{\sum_{n=1}^{NNE} \sum_{i=1}^{365} (QOni - \bar{QO})^2} \quad (1)$$

donde:

$QOni$  : caudales observados del año  $n$  y del día  $i$

$QCni$  : caudales simulados

$\bar{QO}$  : promedio de los caudales observados

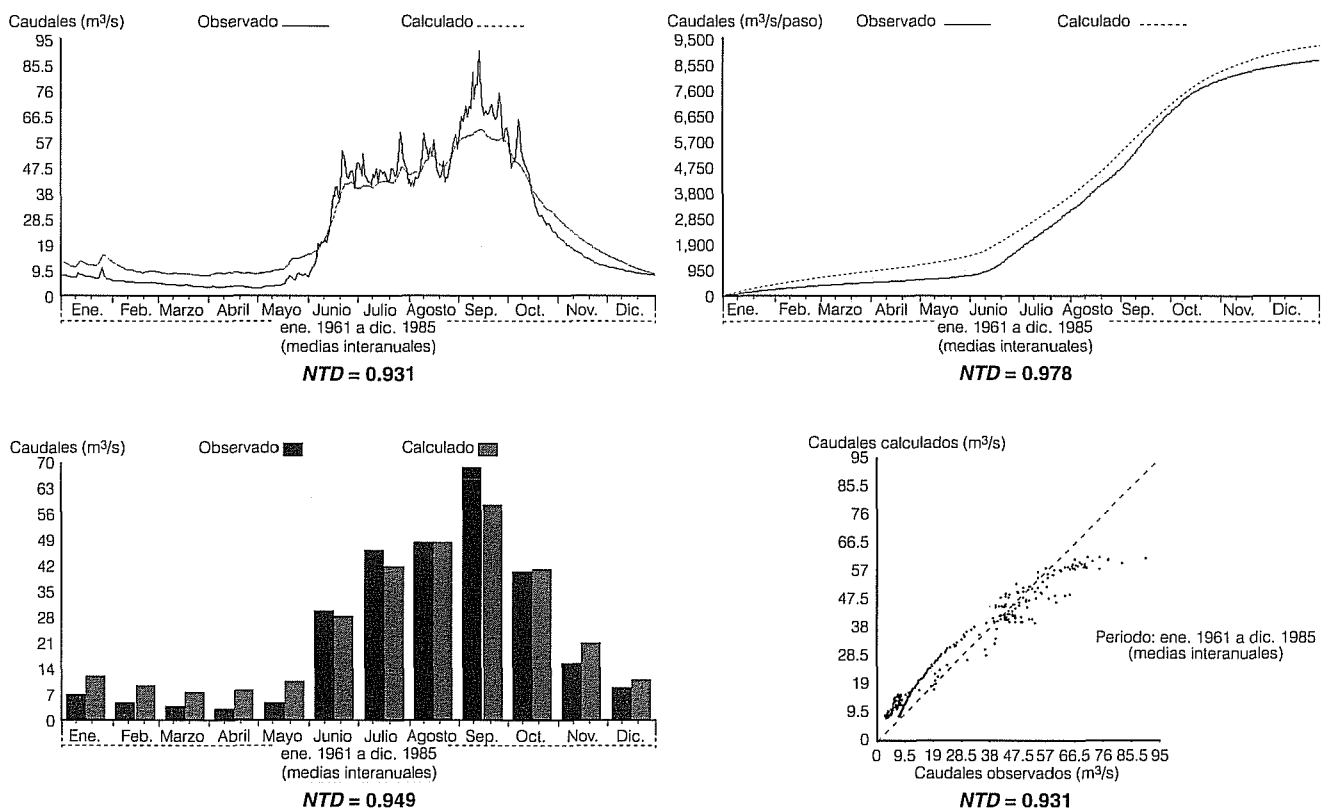
$NNE$  : número de años

En primer lugar se calibraron los parámetros conceptuales de los dos modelos para la cuenca Amacuzac; posteriormente, el modelo *CEQUEAU* se aplicó en la subcuenca del río San Jerónimo.

Al emplear el *CEQUEAU* para la cuenca del río Amacuzac, los valores del criterio *NTD* de los hidrogramas anuales observados y calculados variaron entre 0.512 y 0.838, considerando el conjunto de simulaciones para calibración y validación del modelo. Los caudales promedio interanuales observados y simulados fueron de 23.77 m<sup>3</sup>/s y de 23.81 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Así pues, los volúmenes interanuales observados y calculados en la estación de aforo Amacuzac son aproximadamente iguales y con un valor de 750 millones de m<sup>3</sup>. En la ilustración 5 se presenta la comparación de los hidrogramas interanuales observados y calculados ( $NTD = 0.977$ ); los caudales acumulados ( $NTD = 0.999$ ); el histograma de caudales mensuales ( $NTD = 0.992$ ), y la dispersión entre caudales observados y calculados ( $NTD = 0.977$ ). Se advierte que para todas las evaluaciones gráficas, el valor *NTD* es superior a 0.977, lo cual es ampliamente satisfactorio.

Los resultados de la simulación de los escurrimientos de la cuenca Amacuzac, con el empleo del modelo *SSARR*, fueron los siguientes: el caudal interanual simulado fue de 25.19 m<sup>3</sup>/s, valor que genera un volumen interanual de 794 millones de metros cúbicos; los valores del criterio *NTD* del conjunto de simulaciones

Ilustración 6. Gráficas comparativas entre los caudales observado y simulado de *SSARR* (estación Amacuzac).



**Cuadro 1. Resultados de la simulación de caudales del río San Jerónimo en la estación Coatepequito.**

| Años                | Precipitación media (mm) | Lo (mm) | Lc (mm) | Qo (m <sup>3</sup> /s) | Qc (m <sup>3</sup> /s) | NTD   | R <sup>2</sup> | ER (%) |
|---------------------|--------------------------|---------|---------|------------------------|------------------------|-------|----------------|--------|
| <sup>(1)</sup> 1965 | 1,057                    | 279.3   | 288.9   | 6.163                  | 6.166                  | 0.731 | 0.740          | 0.0    |
| <sup>(1)</sup> 1966 | 980                      | 216.7   | 229.3   | 4.625                  | 4.894                  | 0.713 | 0.737          | 5.8    |
| <sup>(1)</sup> 1967 | 1,264                    | 363.8   | 328.3   | 7.765                  | 7.007                  | 0.801 | 0.817          | -9.8   |
| <sup>(1)</sup> 1968 | 1,137                    | 354.0   | 291.1   | 7.535                  | 6.195                  | 0.628 | 0.659          | -17.8  |
| <sup>(1)</sup> 1969 | 1,123                    | 362.4   | 417.7   | 7.734                  | 8.914                  | 0.785 | 0.833          | 15.3   |
| <sup>(1)</sup> 1970 | 1,069                    | 383.9   | 369.8   | 8.216                  | 7.892                  | 0.849 | 0.854          | -3.9   |
| <sup>(2)</sup> 1980 | 1,180                    | 305.6   | 348.0   | 6.503                  | 7.406                  | 0.745 | 0.787          | 13.9   |
| <sup>(2)</sup> 1981 | 1,342                    | 539.2   | 499.0   | 11.507                 | 10.649                 | 0.836 | 0.852          | -7.5   |
| <sup>(2)</sup> 1982 | 742                      | 154.0   | 151.2   | 3.287                  | 3.234                  | 0.725 | 0.726          | -1.6   |
| <sup>(2)</sup> 1983 | 828                      | 185.8   | 197.0   | 3.964                  | 4.205                  | 0.805 | 0.808          | 6.1    |
| <sup>(2)</sup> 1984 | 1,023                    | 303.8   | 310.0   | 6.466                  | 6.599                  | 0.852 | 0.857          | 2.1    |
| <sup>(2)</sup> 1985 | 1,113                    | 376.6   | 384.8   | 8.036                  | 8.211                  | 0.805 | 0.805          | 2.2    |

(1) Periodo de calibración del modelo.

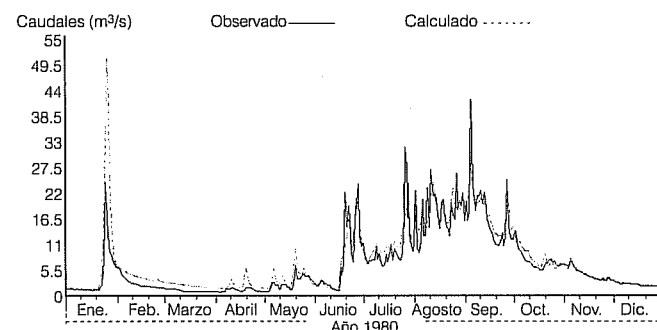
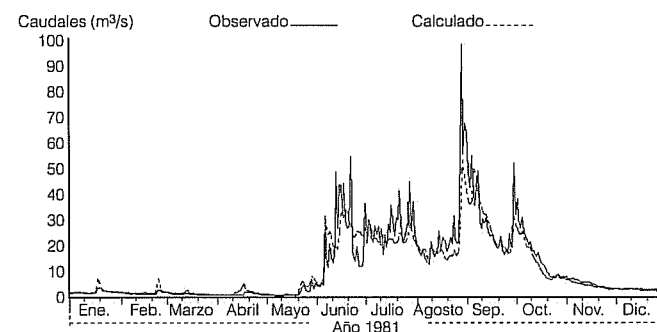
(2) Periodo de validación del modelo.

para los periodos de calibración y validación de los hidrogramas anuales observados y calculados variaron entre 0.34 y 0.82. Complementariamente, los resultados de las simulaciones de los valores interanuales se muestran en la ilustración 6. Los valores de *NTD* de los hidrogramas observados y calculados, de los caudales acumulados, del histograma de caudales mensuales y de la dispersión de los mismos, son 0.931, 0.978, 0.949 y 0.931, respectivamente.

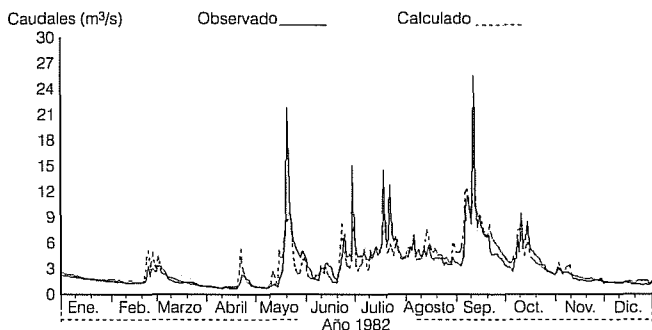
Los resultados de las simulaciones de esta cuenca, empleando los dos modelos, muestran que el modelo *CEQUEAU* dio mejores estimaciones. Por lo tanto, se procedió a la simulación de la cuenca del río San Jerónimo, sólo con ayuda de *CEQUEAU*. Con fines ilustrativos, a continuación se presentan los resultados detallados de las simulaciones con el modelo *CEQUEAU* para el río San Jerónimo:

- En promedio, en el río San Jerónimo (estación Coatepequito) escurre un volumen de 223 millones de m<sup>3</sup>. En el cuadro 1 se encuentran los diferentes resultados de la calibración y de la validación del modelo correspondiente a este río. Las láminas observadas (*Lo*) y simuladas (*Lc*) y consecuentemente, los caudales observados (*Qc*) y simulados (*Qc*), son valores muy cercanos, razón por la cual el error relativo (*ER*) entre ambos es satisfactorio, excepto para los años 1968 y 1969. Los errores relativos de los periodos de calibración y de validación fueron de -1.7 y 2.5%, respectivamente. El criterio *NTD* y el coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) son excelentes y, en general, próximos a la unidad, lo que significa que los caudales diarios observados y simulados son prácticamente equivalentes

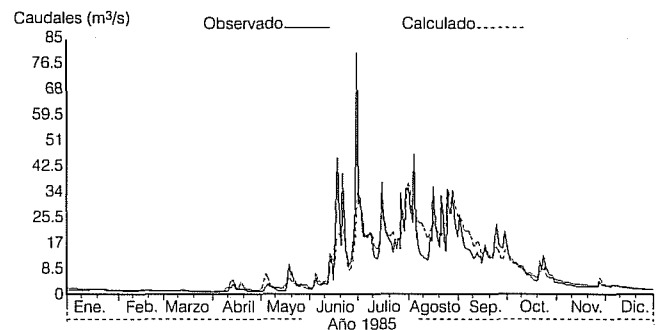
y bien representados por el modelo *CEQUEAU*. En la ilustración 7 se presentan los hidrogramas observados y simulados del periodo de validación. Se observa una

**Ilustración 7a. Hidrogramas observado y simulado de 1980 (validación en la estación Coatepequito).****Ilustración 7b. Hidrogramas observado y simulado de 1981 (validación en la estación Coatepequito).**

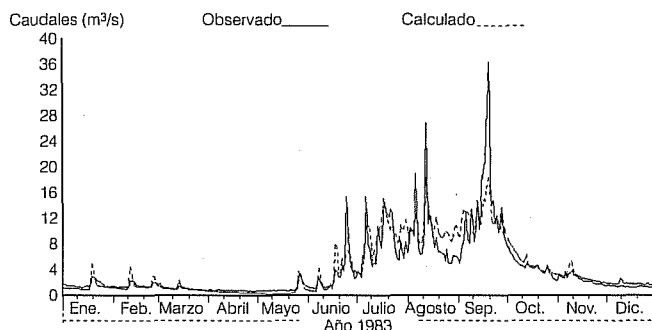
**Ilustración 7c. Hidrogramas observado y simulado de 1982 (validación en la estación Coatepequito).**



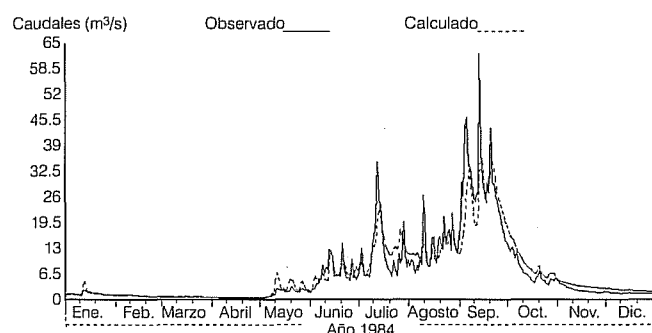
**Ilustración 7f. Hidrogramas observado y simulado de 1985 (validación en la estación Coatepequito).**



**Ilustración 7d. Hidrogramas observado y simulado de 1983 (validación en la estación Coatepequito).**



**Ilustración 7e. Hidrogramas observado y simulado de 1984 (validación en la estación Coatepequito).**



## Discusión y conclusiones

Este estudio se desarrolló con la finalidad de aplicar dos modelos de tipo determinista que conduzcan a la simulación apropiada del fenómeno hidrológico lluvia-escurrimiento. Los modelos empleados presentan una arquitectura diferente, cuyas principales diferencias radican en la discretización de la cuenca y en la conceptualización de algunos procesos hidrológicos.

Respecto a la discretización de la cuenca, *CEQUEAU* la representa a través de celdas cuadradas bien definidas en el espacio, lo que facilita la asignación de valores correspondientes a las diferentes variables que utiliza el modelo, mientras que en *SSARR*, el usuario la establece de acuerdo con la variación de la altitud del terreno. Para el establecimiento del flujo, *CEQUEAU* utiliza un sistema de recipientes interconectados con orificios de salida a diferentes niveles, mientras que *SSARR* emplea tablas y gráficos empíricos del comportamiento de los diferentes parámetros del modelo.

Evidentemente, es difícil pronunciarse sobre cuál de los modelos es mejor, ya que ambos han generado resultados aceptables. Sin embargo, es de resaltar la facilidad de utilización de *CEQUEAU* a través de sus interfaces gráficas de procesos y presentación de resultados. Conceptualmente, también es más lógica la arquitectura de *CEQUEAU*, comparada con la de *SSARR*, y menos empírica la relación entre parámetros en el proceso de lluvia-escurrimiento. Por otro lado, el modelo *SSARR* tiene como desventaja que opera con sistema *DOS*, por lo que la memoria está limitada para simular periodos largos de tiempo y no tiene herramientas gráficas para comparar resultados.

Las principales conclusiones de este estudio son:

- El modelado actual no consideró la influencia de tomas y derivaciones de caudal para fines de riego, ya que dicha información no está disponible,

buena estimación de los caudales medios diarios, excepto para los picos del hidrograma. En general, estos picos son subestimados debido al uso de los caudales medios diarios en el criterio de calibración, ya que no intervienen los valores de gastos máximos. Ello podría constituir el objetivo de otro estudio en particular.

sin embargo, los resultados de simulación fueron satisfactorios.

- El modelo *CEQUEAU*, en general, efectúa simulaciones ampliamente aceptables para las dos cuencas estudiadas, aun cuando los picos de los hidrogramas son subestimados muy probablemente debido a la operación de la infraestructura hidráulica instalada en la cuenca, tales como presas derivadoras y bordos, de los cuales no hay registros.
- Sin duda alguna, el uso de este tipo de modelos hidrológicos facilita la gestión de los recursos hídricos de una cuenca, pues permite conocer y también predecir la distribución de caudales en el espacio y en el tiempo, con una aproximación a la realidad ampliamente satisfactoria para fines de gestión.
- Finalmente, comparando ambos modelos, *CEQUEAU* y *SSARR*, para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca Amacuzac, es posible concluir que *CEQUEAU*, recientemente traducido al español, es un modelo más amigable, con herramientas gráficas y numéricas que facilitan la simulación de caudales.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), México, proyecto núm. 3602-PT, del cual es responsable el doctor Khalidou Mamadou Bâ. Igualmente, los autores agradecen la participación del geógrafo Paulino Delgado Martínez, en los procesos cartográficos requeridos.

Recibido: 13/12/1999

Aprobado: 17/10/2000

## Referencias

- Ayadi, M. y Z. Bargaoui, "Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle *CEQUEAU*", *Journal de Sciences Hydrologiques*, vol. 43, 1988, pp. 741-758.
- IMTA, *ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica)*, vols. 1 al 6, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1996a.
- IMTA, *Bandas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales)*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1996b.
- Kang, N., "Sensibilité des paramètres du modèle *SSARR*: Reconstitution des débits et régularisation des réservoirs", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 16, núm. 1, pp. 1-25, 1978.
- Llamas, J., *Hidrología general. Principios y aplicaciones*, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao, España, 1993, pp. 569-580.
- Llanos, H., K.M. Bâ y A. Castiella, "Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (Alava-Navarra, País Vasco)", *Revista Ingeniería del Agua*, vol. 6, núm. 3, España, 1999, pp. 241-250.
- Morin, G. y P. Paquet, "Le modèle de simulation de quantité et de qualité *cequeau*, guide de l'utilisateur, version 2.0 pour Windows", *INRS-Eau*, Rapport de Recherche 435, Québec, Québec, 1995, 309 pp.
- 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.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Boletín hidrológico* 47, Región hidrológica 18 (parcial), cuenca del río Amacuzac, t. I, México, 1970, pp. I-II a I-13.
- Singh, V., "Computer Models Of Watershed Hydrology", *Water Resources*, Pub., 1995, pp. 119-149.
- USACE, U.S., Army Corps of Engineers North Pacific Division, *SSARR Model Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*, Portland, Oregon, 1991.
- Viessman, W., G. Lewis y J. Knapp, *Introduction to Hydrology*, Harper Collins Publishers, th. ed., Nueva York, 1989, pp. 548-549.
- WMO (World Meteorological Organization), "Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff", *Operational Hydrology Report* núm. 23, WMO núm. 646, Ginebra, 1986.
- WMO (World Meteorological Organization), "Simulated Real-Time Intercomparison of Hydrological Models", *Operational Hydrology Report* núm. 38, WMO núm. 779 Ginebra, 1992.
- WMO (World Meteorological Organization), "Methods for Verification of Hydrological Forecasts", *Technical Reports in Hydrology and Water Resources*, 44, WMO/TD, núm. 617, Ginebra, 1994.

#### Abstract

Bâ, K.M., C. Díaz Delgado & V. Rodríguez Osorio, "Simulation of the daily discharges of the Amacuzac and San Jerónimo watersheds in the State of Mexico, Mexico", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 4, pages 117-126, October-December, 2001.

This paper analyzes the hydrological behavior of the daily discharges of the Amacuzac and San Jerónimo watersheds, up to the hydrometric gauge stations of Amacuzac and Coatepequito respectively, on the basis of the application of two deterministic hydrological models of different architecture: the CEQUEAU (Morin and Paquet, 1995) and the SSARR (USACE, 1991). These models were applied in the Amacuzac watershed and, from the obtained results, the CEQUEAU model was later applied in the San Jerónimo sub-watershed. It should be stressed that the main difference between these models is that CEQUEAU takes into account the different physiographic characteristics of the hydrological system by means of the territorial discretization of the watershed, whereas SSARR simulates processes based on empirical functional relationships. The hydrometeorological data sets used in the research were those contained in the databases ERIC and Bandas (IMTA, 1996a-b). For the Amacuzac river, the periods of calibration and validation were from 1961 to 1975 and 1980 to 1985, respectively. The observed daily discharges available for the San Jerónimo river were from 1965 to 1970 and 1980 to 1985. These two periods were used for calibration and validation respectively. According to the criterion followed to determine the quality simulation, both models reproduce very well the daily discharges of the Amacuzac watershed. Nevertheless, from the research results it appears that CEQUEAU is a friendlier model because it has graphical and numerical tools that make easier the simulation of the daily discharges.

**Key words:** hydrology, Amacuzac river, San Jerónimo river, mathematical models, CEQUEAU, SSARR, daily discharges.

#### Dirección institucional de los autores:

Khalidou M. Bâ  
Carlos Díaz Delgado  
Verónica Rodríguez Osorio

Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de  
Ingeniería  
Universidad Autónoma del Estado de México  
Cerro de Coatepec s/n, Toluca, México  
Correos electrónicos: khalidou@coatepec.uaemex.mx y  
cdiaz@coatepec.uaemex.mx