

**Evaluación hidrológica de la cuenca del río Teapa,
utilizando el modelo *MIKE-SHE***

**Hydrological assessment of the Teapa River basin, using
the *MIKE SHE* model**

Marco Antonio Torres¹

Iourii Nikolskii²

María Eugenia Martínez-Miranda³

Mario R. Martínez⁴

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado en Hidrociencias, Montecillo, Estado de México, México, atm.marco@gmail.com

²Colegio de Postgraduados, Programa de Hidrociencias, Montecillo, Estado de México, México, nikolski@colpos.mx

³Manejo Integral de Cuencas S.A. de C.V., Texcoco, México, maeugenia0401@hotmail.com

⁴Colegio de Postgraduados, Programa de Hidrociencias, Montecillo, Estado de México, México, mmario@colpos.mx

Autor para correspondencia: Marco Antonio Torres Moreno, atm.marco@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se ha aplicado el modelo hidrológico *MIKE-SHE*, para simular procesos de escorrentía de agua de la cuenca hidrológica del río Teapa, en el sureste de México. La cuenca tiene un clima tropical húmedo, altas pendientes y una escasa presencia de núcleos urbanos. Existe información detallada sobre las condiciones climáticas, topografía, de vegetación y suelos de la cuenca, así como datos del régimen hidrológico del río Teapa. Se ha implementado el modelo *MIKE-SHE*, principalmente por la gran capacidad de procesamiento de la información detallada de las cuencas. El proceso de simulación del régimen hidrológico del río Teapa comprende dos etapas de cálculo: la calibración del modelo, que tiene como finalidad obtener un buen ajuste entre los datos observados y los calculados, lo cual se logra mediante modificación de algunos de los parámetros iniciales relacionados con las

propiedades físicas de los suelos y con la rugosidad hidráulica de la superficie y cauces; la validación del modelo consiste en la aplicación del mismo en un periodo sin calibración y la comparación de los gastos calculados y observados. Los resultados de la simulación señalan que en el proceso de validación del modelo *MIKE-SHE* se logró un ajuste entre los gastos del río Teapa medios y máximos mensuales, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$. Sin embargo, no se ha logrado buen ajuste de los gastos diarios con $R^2 = 0.62$

Palabras clave: modelación hidrológica, modelos distribuidos, *MIKE-SHE*, escurrimiento superficial.

Abstract

The MIKE SHE hydrological model was applied by the present work in order to simulate water runoff from the Teapa River basin in southeastern Mexico. The basin has a humid tropical climate, high slopes, and is relatively little altered by human activities. There is relatively detailed information on climatic conditions, topography, vegetation, and soils in the basin, as well as data on the hydrologic regime of Teapa River. The MIKE SHE model is preferable because of its high capacity to process detailed characteristics of the river basin. The process to simulate the Teapa River's hydrological regime involved two calculation stages. First, calibration of the model by means of some of its parameters, initially determined and related with hydrophysical properties of soils and hydraulic roughness of the surface, for a better fit between calculated and observed river discharges. Then, validation of the model by comparing calculated and observed river discharges. The results of the simulation showed that the MIKE SHE model validation process resulted in a rather good fit between the calculated and observed mean and maximum monthly discharges from the Teapa River, with a determination coefficient of $R^2 = 0.81$. However, the calculated and observed daily discharges did not result in a good fit, with $R^2 = 0.62$. A large number of model parameters, each of which presumably had an error, can possibly explain such a relatively low fit for the daily discharges.

Keywords: Hydrologic modelling, distributed models, MIKE SHE.

Recibido: 08/07/2016

Aceptado: 25/01/2018

Introducción

La cuenca hidrológica del río Teapa en el sureste de México presenta una problemática de inundaciones relacionadas con el brusco crecimiento de gastos de los arroyos y ríos, después de las lluvias torrenciales, con grandes intensidades, laderas con altas pendientes y alteraciones en la vegetación primaria.

Para prevenir inundaciones y mitigar sus efectos es necesario estimar la probabilidad y magnitud de los gastos máximos en los cauces. Tales estimaciones pueden realizarse mediante análisis estadísticos de las series de observaciones de los caudales o, en caso de deficiencia, de los datos obtenidos a través de una simulación matemática del proceso de formación del flujo en cauces. Existen diferentes modelos de simulación de estos procesos basados en diferentes principios. Lo más importante es el nivel de confiabilidad de los gastos o de agua calculados. Para verificar el nivel de confiabilidad del régimen hidrológico calculado de un cauce es necesario tener los datos de observación de éste en forma continua y durante un lapso suficientemente largo (algunos años) en las estaciones hidrométricas. Además, es importante contar con información objetiva y representativa sobre las condiciones que influyen y determinan la escorrentía de agua en la cuenca hidrológica, como topografía, clima, suelos, vegetación, uso del terreno y red hidrográfica. La cuenca del río Teapa tiene los datos necesarios para simular el proceso de escorrentía de agua mediante modelos distribuidos y de base física. Asimismo, esta cuenca presenta una escasa superficie de núcleos urbanos, lo que simplifica el proceso de simulación.

MIKE-SHE representa un modelo con una gran capacidad de procesamiento de las características específicas de la cuenca hidrológica, así como sus condiciones meteorológicas, topográficas e hidrológicas (DHI, 2007). Dada esta capacidad de procesamiento, el objetivo del presente trabajo fue calibrar y validar el modelo hidrológico *MIKE-SHE* en la cuenca del río Teapa en el sureste de México.

Materiales y métodos

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Teapa tiene su origen en las montañas del norte de Chiapas, en el municipio de Rayón. Para el caso del presente estudio, se utilizó como

punto de salida de la cuenca el sitio de la Estación Hidrométrica Teapa (30032). Las coordenadas extremas de la cuenca son 17° 34' 5.24" y 17° 10' 58.03" de latitud norte, y entre 92° 54' 19.9" y 93° 64' 54.83" de longitud oeste. La cuenca del río Teapa comprende 430.7 km². Su clasificación con respecto al orden de sus corrientes indica que el cauce principal corresponde al orden VI; el tributario Río Negro corresponde al orden V; los tributarios río San José, río la Sierra, río Moquimba y río Jucubia, al orden IV (INEGI, 2010); el cauce principal presenta una pendiente media de 22% y una diferencia de nivel de 2 320 m (Figura 1).

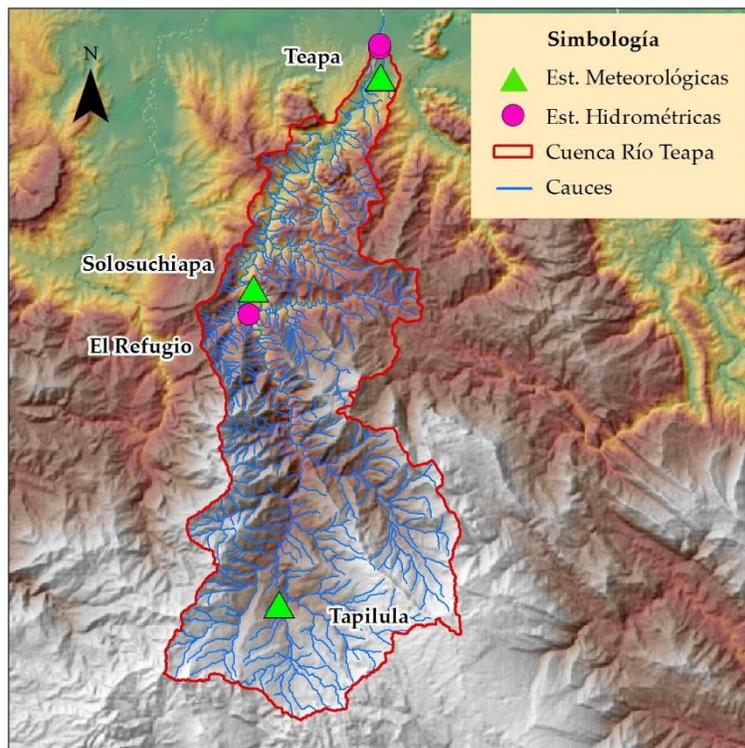


Figura 1. Esquema de la cuenca hidrológica del río Teapa.

El clima predominante en la cuenca del río Teapa es cálido-húmedo, con lluvias en verano y parte del otoño; estas últimas están fuertemente influenciadas por la presencia de ciclones tropicales; asimismo, es posible identificar una época de seca bien marcada debido a la distribución de las lluvias sobre la Sierra Madre de Chiapas. Las principales diferencias climáticas en la zona corresponden al incremento de las lluvias invernales por la influencia de los "Nortes", principalmente, y que originan precipitaciones orográficas en las laderas de la sierra y parte de las llanuras (García, 1988).

El uso de suelo y vegetación existentes en la cuenca del río Teapa está dominado por la presencia de pastizales cultivados que, con una superficie de 207 km², representa 48% de la ocupación del territorio; el segundo uso de

suelo más importante en cuanto a superficie se refiere es la agricultura de temporal permanente que representa 18%, con cerca de 81 km². El resto de la superficie de la cuenca se divide en diversos tipos de uso de suelo y vegetación, en su mayoría vegetación secundaria y arbustiva de selvas altas perennifolias y bosques mesófilos de montaña (INEGI, 2014a).

Los luvisoles son el grupo de suelos predominante en la cuenca del río Teapa y su principal característica es el alto grado de lavado del horizonte superficial debido a la cantidad de precipitación de la zona. Dada la variabilidad fisiográfica del área es posible encontrar diferentes subgrupos de luvisoles; sin embargo, los luvisoles endolépticos son más comunes debido a la presencia de fases líticas en la región. La mayor superficie de luvisoles en la cuenca sostiene pastizales cultivados y, en menor proporción, agricultura de temporal (INEGI, 2014b).

Descripción de los modelos hidrológicos

Existen diversas formas de clasificar los modelos hidrológicos. Una muy básica agrupa a los modelos como el de capa, distribuidos, estocásticos y determinísticos (Beven, 2001). El modelo *MIKE-SHE* se caracteriza como un modelo distribuido y estocástico.

Los modelos agrupados o de capa son aquellos que consideran la cuenca como una unidad, donde cada una de las variables representa los valores promedio de la zona de captación. Los modelos distribuidos realizan los cálculos, valiéndose de la división de la superficie de la cuenca en una rejilla compuesta por un gran número de celdas individuales; cada celda puede contener valores diferentes de las características evaluadas y, a su vez, las ecuaciones del modelo están asociadas con cada celda.

De forma general, los modelos deterministas permiten sólo un resultado del proceso de simulación a partir de un conjunto de valores de entrada; los modelos estocásticos admiten cierta aleatoriedad de los resultados, como respuesta a la incertidumbre de las variables de entrada; su principal objetivo es poder predecir con cierta exactitud los eventos futuros, a partir de patrones secuenciales en el flujo de la corriente (Klemes, 1982; Klemes, 1988). Una consideración importante sobre los modelos estocásticos es que asumen la estacionalidad de la lluvia y el escurrimiento, esto significa que las series de lluvia y escurrimientos futuras tendrán la misma distribución estadística que las del pasado.

Las principales características de los modelos distribuidos son las siguientes:

- El carácter variable y heterogéneo de la cuenca se conserva, dado el número de unidades de respuesta hidrológica con características homogéneas.
- La respuesta hidrológica de la cuenca corresponde a la integración de dicha respuesta de las celdas individuales.
- Las celdas individuales contienen parámetros y variables particulares que describen las características hidrológicas, de topografía, del suelo, clima, vegetación y topografía.
- Es posible obtener simulaciones hidrológicas con altas correlaciones, pues se evita incluir relaciones lineales dentro del proceso.

Las principales desventajas de los modelos distribuidos son las siguientes:

- Son más complejos, en comparación con los modelos agrupados o de capa, pero no necesariamente son mejores que los modelos más simples.
- La división de una cuenca en unidades teóricamente homogéneas es complicada, debido a las características físicas de cada unidad; asimismo, las interacciones entre las unidades varían de acuerdo con el tamaño y la información no puede ser escalada.

Descripción del modelo *MIKE-SHE*

El Sistema Hidrológico Europeo (SHE) es un sistema general de modelación completamente distribuida y de base física, capaz de simular la totalidad del ciclo hidrológico como alguna de sus fases terrestres de forma independiente (Abbott, Bathurst, Cunge, O'Connell, & Rasmussen, 1986a).

El sistema hidrológico europeo fue desarrollado inicialmente por tres organizaciones europeas: el Instituto Hidráulico de Dinamarca (DHI), el Instituto Británico de Hidrología y una empresa francesa de consultoría SOGREAH, en 1977.

El sistema hidrológico europeo se encuentra compuesto por una serie de modelos, dentro de los cuales figuran el modelo *MIKE-SHE* y el *MIKE 11*, que en conjunto permiten caracterizar el comportamiento de las cuencas hidrográficas (DHI, 2004).

El sentido físico del modelo *MIKE-SHE* se refiere a que los procesos hidrológicos se basan en las leyes de la conservación de la masa y la energía, o por ecuaciones derivadas de la investigación experimental independiente. La distribución espacial del modelo se logra a partir de la representación

horizontal de la zona por una rejilla ortogonal, y verticalmente por una columna de capas de información en cada celda que compone la rejilla (Abbott, Bathurst, Cunge, O'Connel, & Rasmussen, 1986b).

La naturaleza de la base física del modelo permite la inclusión de las características de topografía, vegetación, edafología y clima. La naturaleza distribuida permite la variación espacial y temporal de cada uno de los parámetros del conjunto de información, como perfiles y uso de suelo, prácticas de drenaje, evapotranspiración y flujo superficial (Abbott *et al.*, 1982).

Con la finalidad de adaptarse a las distintas necesidades de modelación de los usuarios, el sistema SHE tiene la posibilidad de adecuarse al tipo de problema hidrológico y sus alcances, por lo cual el nivel de complejidad de la modelación es variable; esto se logra a partir de una estructura modular del modelo (DHI, 2004). Dichos módulos son los siguientes:

- Módulo de deshielo.
- Módulo de intercepción.
- Módulo de evapotranspiración.
- Módulo de flujo superficial.
- Módulo de flujo en cauces.
- Módulo de flujo subsuperficial en las zonas saturada e insaturada.

Cada proceso hidrológico se encuentra ligado con un componente del modelo, por lo que es posible simular el ciclo hidrológico de forma completa o sólo en una fracción de interés.

Integración de la información dentro del modelo *MIKE-SHE/MIKE 11*

Como un modelo de base física, *MIKE-SHE* se basa en las leyes físicas de la naturaleza y, a su vez, en cada uno de los datos representativos de la cuenca. La información utilizada en el desarrollo de este trabajo se encuentra representada dentro de un esquema general que tiene como objetivo el procesamiento de la información para su integración dentro del modelo (Figura 2).

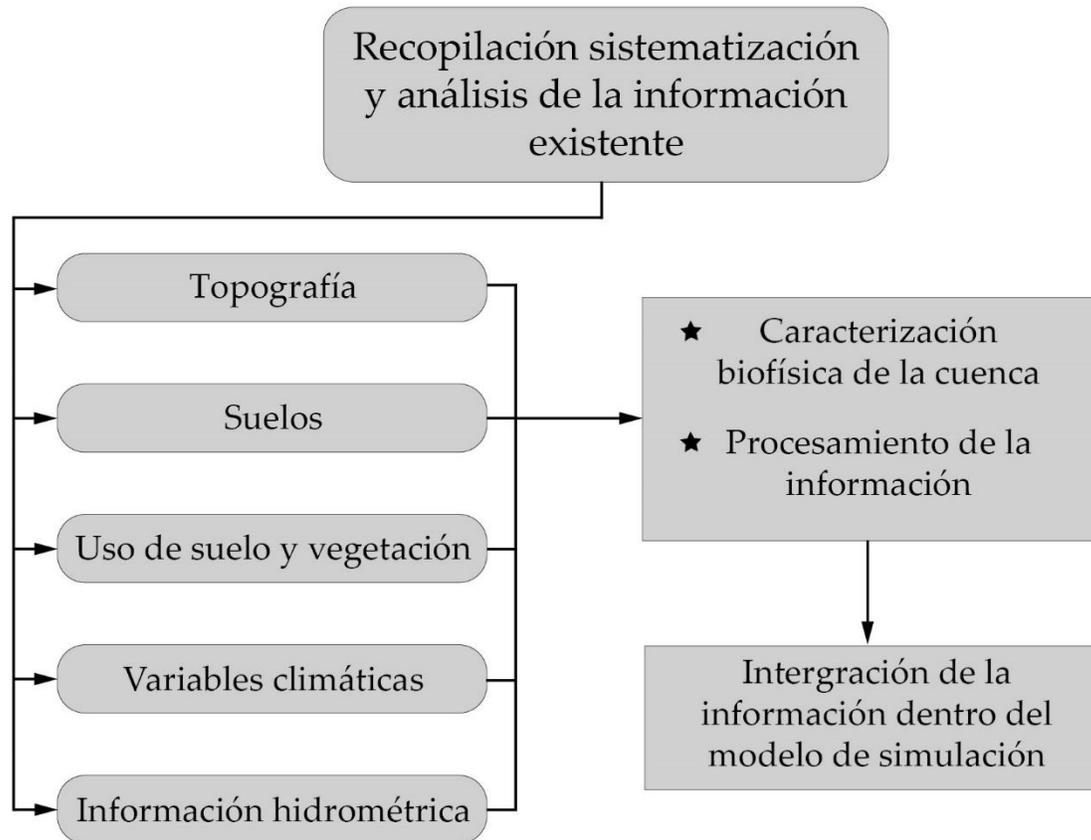


Figura 2. Esquema metodológico general.

La información topográfica utilizada para la realización del presente trabajo se basó en dos fuentes principales que corresponden al modelo digital de terreno: LIDAR y el Continuo de Elevaciones Mexicano CEM 3; en ambos casos, generados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

La determinación del área de escorrentía de la cuenca se llevó a cabo utilizando el continuo de elevaciones mexicano CEM 3 de INEGI, mediante el cual se obtuvo la localización del parteaguas de la cuenca y considerando como punto de salida la ubicación de la estación hidrométrica convencional con número de identificación 30032 "Río Teapa" (INEGI, 2013).

La determinación de los cauces naturales de la cuenca del río Teapa se realizó mediante el procesamiento del modelo digital del terreno LIDAR, con una resolución de 5 m por pixel y considerando una área de aporte mínima de 20 hectáreas, para los cauces de primer orden. Se obtuvo un total de 51 cauces, con una longitud acumulada de 725.3 km.

El procesamiento de las secciones transversales se realizó a partir del procesamiento de la malla de puntos del modelo digital del terreno LIDAR, ajustando las elevaciones a partir del *datum* obtenido del modelo de elevación

CEM 3. Se utilizó una distancia entre secciones de 200 m, incluyendo una sección de apertura para cada cauce y una de cierre en las confluencias de los diferentes cauces naturales. En total se procesaron 1 161 secciones transversales dentro de la red hidrográfica.

Con la finalidad de uniformar la información disponible de las unidades de suelos existentes en la cuenca del río Teapa se realizó la integración de las características hidrológicas de los suelos dentro del modelo mediante dos fuentes principales de información, que corresponden a las cartas edafológicas con escala 1:50 000 de INEGI, y la serie I y II de las bases de datos de perfiles de suelos (INEGI, 1988; INEGI, 2004a; INEGI, 2004b; INEGI, 2014a). Se utilizaron los polígonos de grupo y subgrupo de suelos como estructura general. Para el ingreso de la información al modelo, los polígonos resultantes fueron relacionados con las características físicas y químicas reportadas en la descripción de perfiles.

Las características hidrológicas de contenido de humedad a saturación, contenido de humedad a capacidad de campo, contenido de humedad a punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica se calcularon mediante el método de estimación de propiedades hidráulicas del suelo para soluciones hidrológicas (Saxton, & Rawls, 2006), utilizando los valores de materia orgánica, fracciones texturales y grado de compactación.

La identificación de los tipos de vegetación existentes en la cuenca del río Teapa se llevó a cabo mediante la clasificación visual de la imagen de satélite Landsat de los periodos estudiados, y haciendo una comparación con los tipos de vegetación reportados por INEGI, en la carta de uso de suelo y vegetación, en sus series IV y V.

La integración de las diferentes variables climáticas dentro del modelo *MIKE-SHE* se lleva a cabo por medio de la introducción de diversas series de tiempo, que fueron procesadas de forma individual, a partir de la información disponible de las estaciones meteorológicas convencionales y la estación meteorológica automatizada existentes en la cuenca. Se realizó el análisis de los datos de precipitación eventual obtenidos de la estación meteorológica automatizada, con un intervalo de medición de 10 minutos. En total, se identificaron 752 eventos durante un periodo comprendido entre enero de 2011 a marzo de 2014. La curva masa obtenida de este análisis permite evaluar y ajustar los registros de precipitación diaria reportados por las estaciones meteorológicas convencionales, resultando una serie de tiempo adecuada para ser utilizada en el proceso de simulación mediante el modelo *MIKE-SHE*.

Las series de tiempo de evapotranspiración diaria se consiguieron a partir de la fórmula de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985), mediante la cual es posible evaluar la evapotranspiración potencial a partir de los datos de temperaturas extremas y radiación solar.

La integración de la información hidrométrica dentro del modelo permite realizar la calibración y validación del mismo, sirviendo de comparativo entre los resultados obtenidos y los valores medidos en campo para el mismo periodo. En la cuenca del río Teapa se cuenta con dos sitios que permiten la medición de sus series hidrométricas; el primer sitio corresponde a la estación hidrométrica convencional que constituye el punto de salida de la cuenca; el segundo es la estación hidrométrica automatizada que sirve de sitio comparativo de la evaluación hidrológica.

El gasto diario, el gasto medio mensual y los gastos máximos mensuales registrados por la estación hidrométrica convencional representan los valores principales de comparación para la calibración y validación del modelo; asimismo, los valores de escala y velocidad instantánea reportados por la estación hidrométrica automatizada permiten estimar el gasto en la sección donde se encuentran ubicados; estos valores de gasto son considerados de tipo comparativo, pues no representan una medición directa del flujo en el cauce y requieren de un proceso de calibración.

La lectura de la elevación del agua sobre la sección hidráulica es un valor obtenido a partir del sensor de elevación OTT RLS ubicado en la estación hidrométrica automatizada; esta información presenta un intervalo entre mediciones de 10 minutos; el periodo de evaluación considerado fue de 08/06/2011 23:20 a 02/06/2013 16:40. La serie de tiempo de velocidad superficial del flujo en la sección hidrométrica se obtuvo a partir del sensor de velocidad Kalesto, con un periodo de evaluación de 08/06/2011 23:20 a 02/06/2013 16:40.

Resultados y discusión

Con la finalidad de que los resultados de un modelo puedan ser utilizados en diferentes actividades, que pueden ir desde la toma de decisiones en el manejo de los recursos hídricos hasta tareas de investigación, es necesario que los modelos sean científicamente sólidos, robustos y defendibles (EPA, 2002).

Los procesos utilizados para calificar los resultados del modelo deben ser establecidos y documentados antes de iniciar la evaluación del mismo, ya que es necesario definir de manera clara los criterios de evaluación ASCE (ASCE, 1993); de forma general, los criterios estadísticos han sido ampliamente utilizados desarrollándose algunos estadísticos específicos, así como índices de rendimiento para la evaluación de los modelos (Donigian, Imhoff, & Bicknell, 1983). La evaluación del modelo *MIKE-SHE* para este trabajo se realizó

mediante las consideraciones de Moriasi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel y Vieth (Moriasi *et al.*, 2007).

La evaluación hidrológica de la cuenca del río Teapa a partir del modelo *MIKE-SHE* fue en dos etapas: calibración y validación del modelo.

Calibración del modelo

El periodo seleccionado para la calibración del modelo fue de 1998 a 2000 (Figura 3). Se realizaron comparaciones para gastos diarios, medios mensuales y máximos mensuales reportados por la estación hidrométrica 30032 Río Teapa y los gastos simulados. Los parámetros de ajuste de la calibración corresponden a los componentes del modelo: conductividad hidráulica a saturación del suelo, humedad a saturación (o porosidad), capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y rugosidad hidráulica de la superficie de la cuenca responsables, respectivamente, por el componente de flujo en la zona insaturada y el componente de flujo superficial.

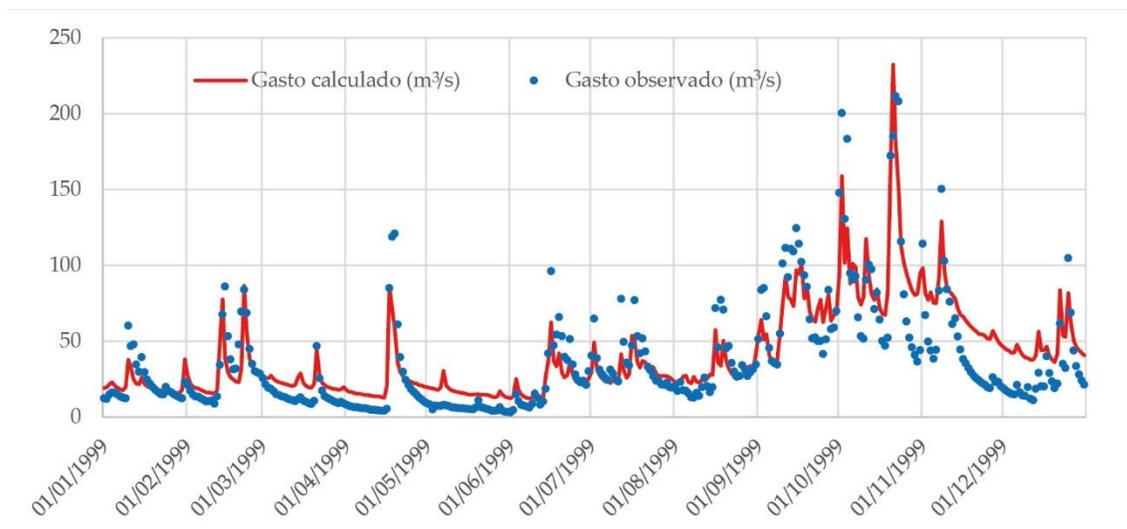


Figura 3. Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados durante el año 1999.

Como puede observarse, por lo general existe cierto ajuste entre dinámica de cambio en tiempo de los gastos diarios calculados y observados. Se observa también que durante los periodos de las corrientes moderadas o débiles, los valores calculados de los gastos diarios superan a los gastos observados.

También se aprecia que durante los periodos de los flujos máximos, el nivel de ajuste entre los gastos calculados y observados es mejor por lo general.

La evaluación del ajuste, los gastos diarios calculados, en comparación con los gastos diarios observados en el periodo de calibración, se llevó a cabo mediante análisis de los siguientes indicadores estadísticos: error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés); raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés); desviación estándar del error (STDres, por sus siglas en inglés); coeficiente de determinación R^2 , y coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la estimación estadística de calidad de calibración del modelo *MIKE-SHE* en proceso de cálculo de los gastos diarios del río Teapa, Tabasco.

Periodo	MAE	RMSE	STDres	R^2	R^2 Nash-Sutcliffe
01/01/1998 a 31/12/2000	15.987	30.043	29.8588	0.72568	0.51662
01/01/1998 a 31/12/1998	11.049	22.539	22.5294	0.69343	0.46111
01/01/1999 a 31/12/1999	13.703	26.823	26.8137	0.81253	0.63732
01/01/2000 a 31/12/2000	24.648	39.962	38.3707	0.67158	0.40144

Nota: error medio absoluto (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (STDres), coeficiente de determinación R^2 y coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe.

A través de los resultados obtenidos se evaluaron los gastos medio mensuales y los máximos mensuales, obteniendo los siguientes resultados:

El coeficiente de determinación R^2 de relación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante el periodo de calibración de 1998 a 2000 es igual a 0.84, lo que significa buen ajuste entre los valores calculados y observados.

El coeficiente de determinación de la relación entre los gastos máximos mensuales es de 0.77, esto es, que existe buen ajuste entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la etapa de calibración del modelo *MIKE-SHE*.

Validación del modelo

El periodo seleccionado para la calibración del modelo fue de 2003 a 2005; se realizaron comparaciones para gastos diarios, medios mensuales y máximos mensuales reportados por la Estación Hidrométrica 30032 Río Teapa y los gastos simulados.

La evaluación del ajuste de los gastos diarios calculados comparados con los gastos diarios observados en el periodo de validación se hizo de la misma forma como para el periodo de calibración con los criterios MAE, RMSE, STDres, R^2 y R^2 de Nash-Sutcliffe (Tabla 2 y Figura 4).

Tabla 2. Resultados de la estimación estadística de calidad de validación del modelo *MIKE-SHE* en proceso de cálculo de los gastos diarios del río Teapa, Tabasco.

Periodo	MAE	RMSE	STDres	R^2	R^2 Nash-Sutcliffe
01/01/2003 a 31/12/2005	14.589	27.805	27.6196	0.66440	0.42777
01/01/2003 a 31/12/2003	20.032	32.613	31.8116	0.69775	0.43874
01/01/2004 a 31/12/2004	12.016	22.580	22.5796	0.67943	0.45729
01/01/2005 a 31/12/2005	11.772	27.396	27.2922	0.60199	0.35446

Nota: error medio absoluto (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (STDres), coeficiente de determinación R^2 y coeficiente de determinación de Nash-Sutcliffe.

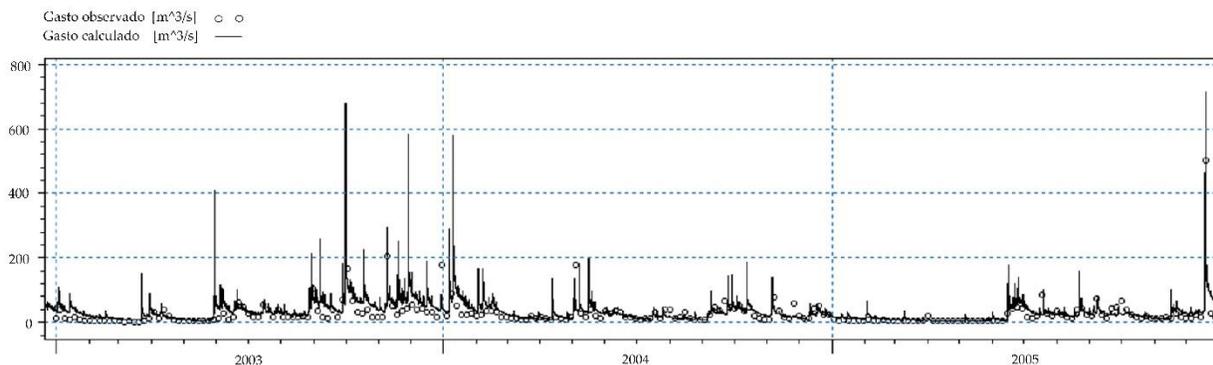


Figura 4. Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante el periodo de validación de 2003-2005.

Como se puede observar, existe conformidad entre los gastos calculados con los gastos observados, pero los valores estadísticos de la validación son menores a los obtenidos durante el proceso de calibración. De la misma forma que en el caso del proceso de calibración se realizó una evaluación de los

gastos medios mensuales y los gastos máximos del periodo de validación. Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 5.

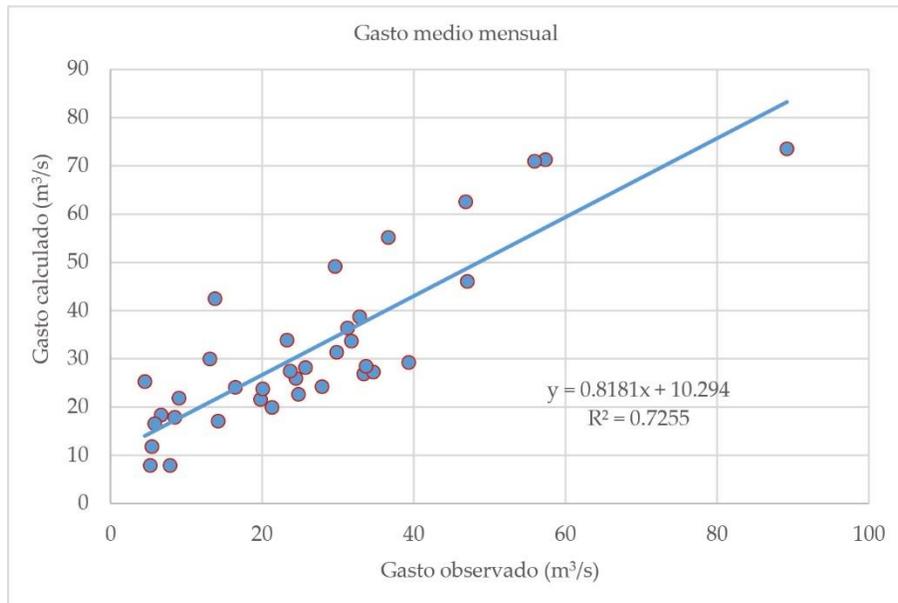


Figura 5. Correlación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante el periodo de validación de 2003 a 2005.

El coeficiente de determinación R^2 de relación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante periodo de validación de 2003 a 2005 es igual a 0.73, lo que es mayor que en relación con los gastos diarios (0.63), un poco menor que en el periodo de calibración (0.84); pero también significa un ajuste positivo entre los valores calculados y observados de los gastos medios mensuales.

Los gastos máximos mensuales y anuales tienen gran importancia, pues están relacionando las situaciones críticas en las corrientes naturales: desbordamientos, inundaciones e impactos negativos. Considerando esto, se compararon los gastos máximos calculados y observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante el periodo de validación de 2003 a 2005.

Se puede observar un buen ajuste en la dinámica de las series temporales de los gastos máximos mensuales calculados y observados. Para mayor claridad, se presenta la gráfica de correlación entre los gastos máximos calculados y observados en la Estación Hidrométrica Teapa durante el periodo de validación (ver Figura 5).

El coeficiente de determinación para los gastos máximos mensuales es de 0.81, lo cual es mayor que en el periodo de calibración (0.77); esto significa

que existe buen ajuste entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la etapa de calibración del modelo *MIKE-SHE*.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se encontró un buen ajuste entre los valores calculados y observados de los gastos medios y máximos mensuales y anuales del río Teapa con el coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$ en proceso de validación del modelo *MIKE-SHE*. Esto significa que dicho modelo puede ser empleado en condiciones similares a la cuenca del río Teapa para estimar el riesgo de desbordamiento e inundaciones relacionados con los gastos y niveles máximos del río, así como apoyar en la planeación, diseño y evaluación de escenarios de manejo de la cuenca, donde pueden ser incluidas desde prácticas agrícolas hasta infraestructura que modifique las condiciones hidrológicas de la cuenca.

El ajuste de los diferentes indicadores estadísticos entre los gastos diarios calculados y observados en el proceso de validación del modelo *MIKE-SHE* posiblemente se puede explicar por el gran número de parámetros del modelo.

La información meteorológica, hidrométrica y biofísica existente en el área de influencia de la cuenca del río Teapa es suficiente para integrar, calibrar y validar el modelo hidrológico distribuido de base física *MIKE-SHE/MIKE 11*.

Agradecimientos

Externamos nuestro agradecimiento al Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS-Conagua) por haber facilitado el acceso a la información hidrométrica y meteorológica automatizada utilizada en la realización de esta investigación.

Referencias

Abbott, M. B., Andersen, J. K., Havno, K., Jensen, K. H., Kroszynski, U. I., & Warren, I. R. (1982). Research and development for the unsaturated zone component of the European Hydrologic System-Systeme Hydrologique Europeen (SHE). En: Abbott M. B., & Cunge J. A. (eds.). *Engineering Applications of Computational Hydraulics*. London, UK: Pitman.

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P.E., & Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 45-59.
- Abbott, M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., O'Connell P.E., & Rasmussen J. (1986b). An introduction to the European hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 61-77.
- ASCE, American Society of Civil Engineers. (1993). Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 119(3), 429-442.
- Beven, K. J. (2001). *Rainfall-runoff modelling: The Primer* (2nd ed.). London, UK: Wile-Blackwell.
- DHI. (2004). *MIKE SHE user manual*. Horsholm, Denmark: Publ. Danish Hydraulic Institute.
- DHI. (2007). *MIKE SHE User Manual vol. 1: User Guide*. DHI Water & Environment Publ. Recuperado de http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE_SHE_UserGuide.pdf
- Donigian, A. S., Imhoff, J. C., & Bicknell, B. R. (1983). Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint-source pollution via simulation – HSPF. In: *Agricultural Management and Water Quality*. Ames, USA: Iowa State University Press.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. (2002). *Guidance for quality assurance project plans for modeling*. EPA QA/G-5M (Report EPA/240/R-02/007). Washington, DC, USA: United States Environmental Protection Agency, Office of Environmental Information.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México, DF, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96-99. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1988). *Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología, (escala 1:250 000 y 1:50 000) de la República Mexicana*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004a). *Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala 1:1 000 000*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/PerfilesSuelo.aspx>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004b). *Conjunto de datos de perfiles de suelos escala Serie I y II Escala 1:250 000*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50 000. Edición: 2.0*. Aguascalientes, México: Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014a). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Escala 1:250 000, Serie II*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014b). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250 000, Serie II*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- Klemes, V. (1982). Empirical and causal models of hydrology. In: *Scientific Basis of Water Resource Management* (pp. 95-104). Washington, DC, USA: National Academy of Sciences.
- Klemes, V. (1988). A hydrological perspective. *Journal of hydrology*, 100(1), 3-28.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Vieth, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification accuracy in watershed simulations. *Transactions of ASABE*, 50(3), 885-900.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. (2006). Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of American Journal*, 70, 1569-1578.