

Simulación hidrológica de la cuenca del río Teapa

Hydrological simulation of the Teapa river basin

Francisco Magaña Hernández
francisco.magana@ujat.mx

René Sebastián Mora Ortiz
rene.mora@ujat.mx

Leobardo Alejandro Quiroga
lquiroga@ujat.mx

Juan Carlos Martínez Jiménez
juan.martinezj@ujat.mx

Emmanuel Munguía Balvanera
emmmanuel.munguia@ujat.mx

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO, DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA, CUNDUACÁN, TABASCO, MÉXICO



Para citar este artículo:

Magaña Hernández, F., Mora Ortiz, R. S., Alejandro Quiroga, L., Martínez Jiménez, J. C., & Munguía Balvanera, E. Simulación hidrológica de la cuenca del río Teapa. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 12(33). <https://doi.org/10.31644/IMASD.33.2023.a05>

RESUMEN

En esta investigación se realizó la simulación hidrológica de la cuenca del río Teapa con el modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para el periodo de 1980 a 2017. Los objetivos de este trabajo son: a) evaluar la eficiencia del modelo hidrológico CEQUEAU para simular los caudales medios diarios de la cuenca del río Teapa, y b) calibrar y validar el modelo CEQUEAU en la estación hidrométrica Teapa. Se empleó un módulo hidrogeomático para obtener los archivos de entrada requeridos por CEQUEAU. La eficiencia del modelo se evaluó con tres estadísticas: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*), el porcentaje de sesgo (*PBIAS*) y el coeficiente de determinación (R^2). Los resultados muestran que CEQUEAU reproduce el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Teapa en épocas de lluvias y sequías.

Palabras clave:

Modelado hidrológico; CEQUEAU; río Teapa.

— *Abstract*—

In this research, the hydrological simulation of the Teapa River basin was carried out with the hydrological model CEQUEAU from 1980 to 2017. The research objectives are a) to evaluate the efficiency of the CEQUEAU hydrological model to simulate the average daily flows of the Teapa River basin and b) to calibrate and validate the model CEQUEAU at the Teapa hydrometric station. A hydrogeomatic module was used to obtain the input files required by CEQUEAU. The efficiency of the model was evaluated with the Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (*NSE*), the percentage of bias (*PBIAS*), and the coefficient of determination (R^2). The results show that CEQUEAU reproduces the hydrological behavior of the Teapa River basin in rainy and dry seasons.

Keywords:

Hydrological modelling; CEQUEAU; Teapa river.

Comprender el funcionamiento hidrológico de una región, es importante para la evaluación, desarrollo y manejo de sus recursos hídricos. Los modelos hidrológicos tienen como objetivo estimar los recursos hídricos en una cuenca. La modelación hidrológica continua es una evolución natural del enfoque de diseño basado en eventos en la hidrología moderna. Mejora la transformación lluvia-escorrentía, proporciona a los profesionales información hidrológica de salida más efectiva para la evaluación de riesgos (Grimaldi *et al.* 2022).

Esta investigación tiene como objetivos: a) evaluar la eficiencia del modelo hidrológico CEQUEAU para simular los caudales medios diarios de la cuenca del río Teapa, y b) calibrar y validar el modelo en la estación hidrométrica Teapa (Clave CONAGUA: 30032).

CEQUEAU es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos de uso libre. Este se ha empleado en diferentes regiones (Canadá, Marruecos, México, España, Senegal, etc.) para la modelación hidrológica de cuencas. CEQUEAU puede ser aplicado para diferentes fines, por ejemplo: a) obtención de caudales en sitios no aforados de la cuenca, b) completar registros hidrométricos faltantes en estaciones hidrométricas, c) diseño de infraestructura hidráulica para el control de inundaciones, d) abastecimiento de agua potable, y en general para la evaluación de los recursos hídricos en una cuenca.

Bâ *et al.* (2001) usaron CEQUEAU para la simulación de los caudales medios diarios en los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México. Bâ *et al.* (2013) simularon con CEQUEAU los caudales medios diarios del río Senegal en dos estaciones hidrométricas (Bakel y Kayes) y los niveles de agua diarios en el embalse Manantali. Llanos y Bâ (2011) evaluaron mediante CEQUEAU el comportamiento hidrológico del sistema de cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal (País Vasco). Vilchis-Mata *et al.* (2015) implementaron el uso de datos de precipitación estimada por sensores remotos para la simulación de caudales medios diarios en la cuenca del río Amacuzac (México) con el modelo CEQUEAU. Kwak *et al.* (2017) emplearon CEQUEAU para simular los caudales y temperaturas futuras del agua del río Fourchue (Quebec), con datos meteorológicos proyectados a futuro. Fniguire *et al.* (2022) utilizaron CEQUEAU para la simulación diaria de los caudales en una zona montañosa árida y semiárida en la cuenca del río Ourika, Marruecos.

METODOLOGÍA

El río Teapa es uno de los formadores del río de La Sierra, se encuentra en los estados de Chiapas y Tabasco, México en la R. H. No. 30 Grijalva-Usumacinta (Figura 1). La cuenca del río Teapa drena una superficie de 424 km² hasta la estación hidrométrica Teapa (Clave CONAGUA: 30032). La

precipitación media anual en la zona en estudio tiene un rango de 2,500 a 4,000 mm. El clima predominante en la cuenca es cálido-húmedo.

El modelo hidrológico CEQUEAU se empleó para realizar la simulación hidrológica a nivel diario en la cuenca del río Teapa para el periodo de 1980 a 2017. CEQUEAU (Morin *et al.* 1998), se desarrolló en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU) de la Universidad de Québec, Canadá. CEQUEAU es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos en donde la cuenca se divide en una malla de cuadros. Lo anterior permite al modelo calcular los caudales en cada cuadro y tener en cuenta las variaciones espacio temporales de las características fisiográficas de la cuenca (Magaña-Hernández *et al.* 2021). El modelo se encuentra estructurado en dos módulos principales (función de producción y de transferencia, Figura 2), que en conjunto describen el escurrimiento del agua desde que alcanza la superficie de la cuenca hasta la llegada al punto de salida (estación hidrométrica). La función de producción modela el flujo vertical del agua (lluvia, evapotranspiración, infiltración, etc.), calcula el volumen de agua en los tres recipientes que considera CEQUEAU (suelo, acuífero, lagos y ciénagas,). Por otro lado, la función de transferencia analiza el movimiento 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 (Morin y Paquet, 1995).

En la Figura 3 se presenta la estructura para la realizar una modelación hidrológica con el modelo CEQUEAU. La Tabla 1 muestra los datos de entrada para la implementación del modelo CEQUEAU en la cuenca del río Teapa. El modelo CEQUEAU requiere de una base de datos con información hidrometeorológica (caudales, precipitación, temperatura máxima y mínima), y de cuatro archivos en formato texto para realizar las simulaciones hidrológicas: datos fisiográficos (*.PHY), datos de la cuenca (*.BV), datos hidrometeorológicos (*.DHM) y parámetros del modelo (*.PAH).

Para este estudio, se recopilaron datos hidrometeorológicos diarios (caudales, precipitación, temperatura máxima y mínima) correspondientes al periodo de 1980 a 2017. Los registros de precipitación, temperatura máxima y mínima se obtuvieron de diez estaciones climatológicas de la base de datos Clima Computarizado (CLICOM). Además, se utilizó información hidrométrica de caudales medios diarios de la estación hidrométrica Teapa (Clave CONAGUA: 30032).

Los archivos de entrada a CEQUEAU se obtuvieron de forma automatizada con un módulo hidrogeomático desarrollado en el SIG Idrisi. En la aplicación del módulo hidrogeomático se utilizó: a) Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona en estudio, b) mapa de cobertura de suelo, c) mapa de la cuenca, y d) ubicación de diez estaciones climatológicas y de la estación hidrométrica Teapa.

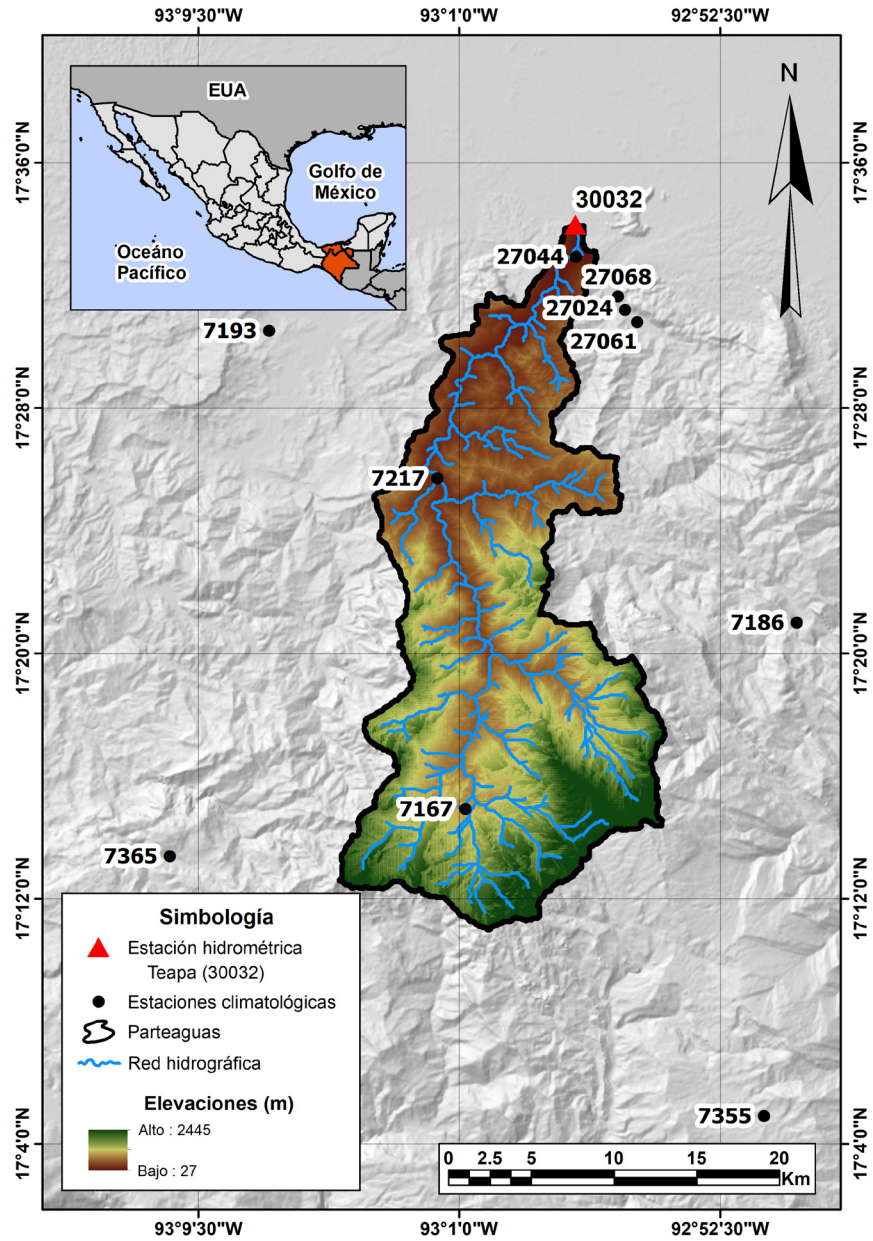


Figura 1. Zona en estudio. Fuente: Elaboración propia

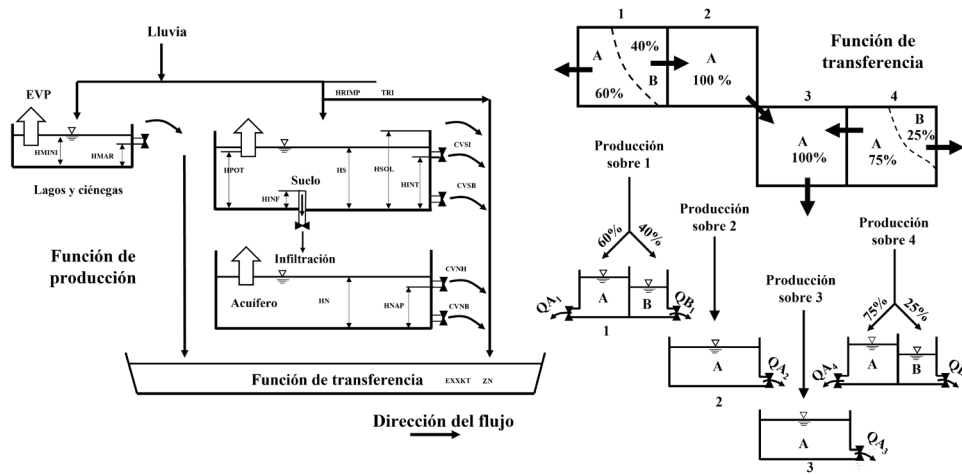


Figura 2. Función de producción y transferencia. Fuente: Adaptada de Morin y Paquet, 1995

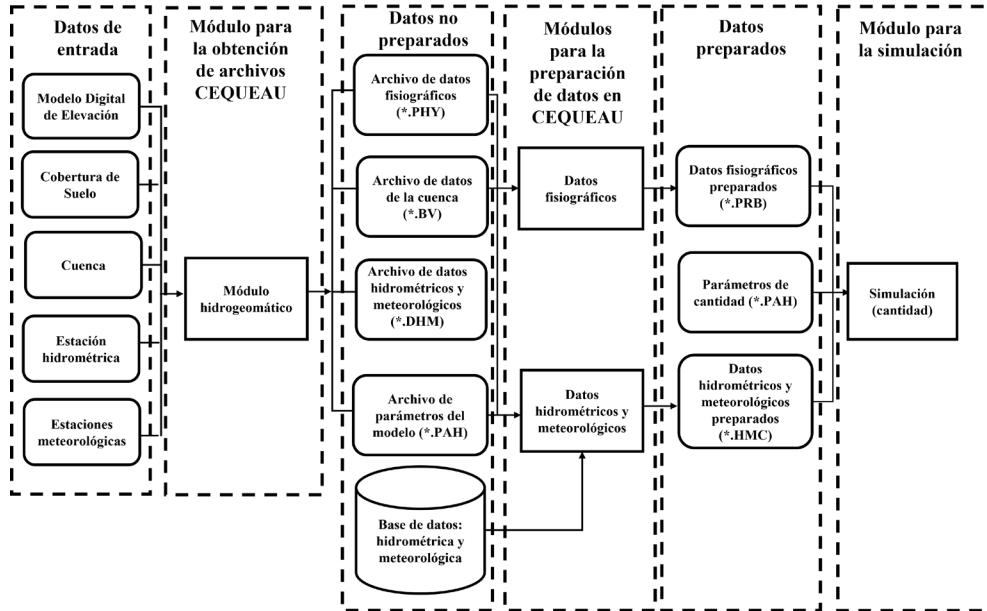


Figura 3. Estructura para la modelación hidrológica con CEQUEAU. Fuente: Adaptada de Morin y Paquet, 1995

Tabla 1
Datos de entrada para la implementación del modelo CEQUEAU en la cuenca del río Teapa

Datos de entrada	Formato	Periodo	Escala espacial	Escala temporal	Fuente
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Ráster		50 m		Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
Cobertura de suelo	Ráster		50 m		Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
Cuenca del río Teapa	Ráster		50 m		Delimitada con un Sistema de Información Geográfica (SIG)
Archivo de datos fisiográficos, archivo de datos de la cuenca, archivo de datos hidrometeorológicos y archivo de parámetros del modelo	Ascii				Se obtienen con la aplicación de un módulo hidrogeomático
Ubicación de estaciones climatológicas y estación hidrométrica	Vectorial				Elaboración propia
Precipitación	Ascii	1980-2017		Diaria	Base de Datos Clima Computarizado (CLICOM)
Temperatura máxima y mínima	Ascii	1980-2017		Diaria	Base de Datos Clima Computarizado (CLICOM)
Caudal	Ascii	1980-2017		Diaria	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)

La calibración del modelo CEQUEAU se efectuó para el periodo de 1990 a 2017, y la validación de 1980 a 1989 a nivel diario. En este estudio, la calibración se realizó a prueba y error, variando manualmente los parámetros del modelo y tratando de ajustar los hidrogramas simulados con los observados en la estación hidrométrica Teapa. La calibración es un proceso mediante el cual se ajustan los parámetros del modelo, el objetivo es minimizar la diferencia entre los caudales observados y simulados. La validación consiste en probar los parámetros obtenidos en la calibración para otro periodo de tiempo, con el objetivo de conocer la eficiencia de predicción del modelo.

Para evaluar la eficiencia del modelo se usaron tres estadísticas, de acuerdo con Moriasi *et al.* (2015): el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (muy bueno $NSE > 0.80$, bueno $0.70 < NSE \leq 0.80$, satisfactorio $0.50 < NSE \leq 0.70$, no satisfactorio $NSE \leq 0.50$, ecuación [1]), el porcentaje de sesgo (muy bueno $PBIAS < \pm 5$, bueno $\pm 5 \leq PBIAS \leq \pm 10$, satisfactorio $\pm 10 \leq PBIAS \leq$

± 15 , no satisfactorio $PBIAS \geq \pm 15$, ecuación [2]) y el coeficiente de determinación (muy bueno $R^2 > 0.85$, bueno $0.75 < R^2 \leq 0.85$, satisfactorio $0.60 < R^2 \leq 0.75$, no satisfactorio $R^2 \leq 0.60$, ecuación [3]).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \quad [1]$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs_i}} \right] \times 100 \quad [2]$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})^2}} \right]^2 \quad [3]$$

donde Q_{Obs_i} y Q_{Cal_i} = caudales observados y calculados en el día i (m^3/s), \bar{Q}_{Obs} y \bar{Q}_{Cal} = caudales promedio observados y calculados en los n días (m^3/s).

RESULTADOS

El módulo Idrisi-CEQUEAU permitió obtener la información fisiográfica (ocupación de suelo, altitudes y sentidos de flujos) requerida por el modelo, utilizando la información disponible en formato digital. La Tabla 2 muestra los parámetros obtenidos en la calibración del modelo CEQUEAU en la cuenca del río Teapa durante el periodo de 1990 a 2017. Se ajustaron 21 parámetros en la calibración y se usaron para la validación del modelo (1980 a 1989). En la Tabla 3 se presentan los resultados de la calibración y validación del modelo en la cuenca del río Teapa.

La Figura 4 presenta los hidrogramas de los caudales diarios interanuales observados y simulados en la estación hidrométrica Teapa. En el periodo completo de simulación (1980 a 2017, Figura 4a) el modelo es muy bueno ($NSE = 0.82$ y $R^2 = 0.83$), el $PBIAS = 1.02$ es positivo lo que indica que el modelo subestima los caudales, principalmente en los meses de marzo a mayo. En la calibración (1990 a 2017, Figura 4c) y validación (1980 a 1989, Figura 4e) el modelo es bueno con valores de $NSE = 0.76$. CEQUEAU subestima los caudales en la calibración ($PBIAS = 1.5$) y los sobrestima en la validación ($PBIAS = -1.01$). En los diagramas de dispersión (Figura 4b, 4d y 4f) se observa el buen desempeño del modelo, los caudales se encuentran agrupados a línea de 45° .

En la Figura 5 se presentan los hidrogramas de los caudales diarios observados y simulados para los años 1980, 1983 y 1999 en la estación

hidrométrica Teapa. De acuerdo con Moriasi *et al.* (2015), el modelo es bueno ya que $0.70 < NSE \leq 0.80$, para 1980 ($NSE = 0.79$, Figura 5a) y 1983 ($NSE = 0.79$, Figura 5b); y muy bueno para 1999 ($NSE = 0.86$, Figura 5c). En los diagramas de dispersión (Figura 5b, 5d y 5f) se observa el buen desempeño del modelo, los caudales se encuentran agrupados a línea de 45° entre el rango de 10 a 90 m³/s.

La Figura 6 muestra los hidrogramas de los caudales diarios observados y simulados para los años 2000, 2005 y 2011 en la estación hidrométrica Teapa. De acuerdo con Moriasi *et al.* (2015), el modelo es satisfactorio ya que $0.50 < NSE \leq 0.70$, para 2000 ($NSE = 0.70$, Figura 6a) y 2005 ($NSE = 0.67$, Figura 6c); y bueno para 2011 ($NSE = 0.74$, Figura 6e) ya que $0.70 < NSE \leq 0.80$. En los diagramas de dispersión (Figura 6b, 6d y 6f) se observa el buen desempeño del modelo, los caudales se encuentran agrupados a línea de 45° entre el rango de 10 a 100 m³/s.

Tabla 2

Parámetros en la calibración del modelo CEQUEAU en la cuenca del río Teapa

No	Parámetro	Descripción	Valor
1	CIN	Coeficiente de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero	0.17
2	CVMAR	Coeficiente de vaciado del recipiente lagos y ciénegas	0.000
3	CVNB	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio de fondo)	0.018
4	CVNH	Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio superior)	0.033
5	CVSB	Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio de fondo)	0.059
6	CVSI	Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio intermedio)	0.055
7	HINF	Umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero (mm)	38.5
8	HINT	Umbral de vaciado intermedio del recipiente suelo (mm)	7
9	HNAP	Umbral de vaciado superior del recipiente acuífero (mm)	140
10	HRIMP	Lámina de lluvia necesaria para que inicie el escurrimiento sobre superficies impermeables (mm)	4.5
11	HSOL	Altura del recipiente suelo (mm)	105
12	EVNAP	Porcentaje de evapotranspiración en el recipiente acuífero (de 0.0 a 1.0)	0.17
13	HPOT	Umbral de extracción del agua a tasa potencial por evapotranspiración (mm).	6.5
14	XAA	Exponente de la fórmula de Thornthwaite	3.81
15	XIT	Valor del índice térmico de Thornthwaite	135.9
16	EXXKT	Parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia.	0.002
17	ZN	Tiempo de concentración de la cuenca (días)	0.675
18	COET	Coeficiente de corrección de temperaturas con respecto a la altitud.	0.1
19	COEP	Coeficiente de corrección de precipitaciones con respecto a la altitud (mm/m/año)	1.28
20	XINFMA	Infiltración máxima por día (mm/día)	25.50
21	TRI	Porcentaje de superficie impermeable (de 0.0 a 1.0)	0.02

Tabla 3
Calibración y validación del modelo CEQUEAU en la cuenca del río Teapa

Descripción	Q_{Obs} (m ³ /s)	Q_{Cal} (m ³ /s)	L_{Obs} (mm)	L_{Cal} (mm)	NSE	PBIAS	R^2
Simulación (1980 a 2017)	35.1	34.8	2629	2602	0.82	1.02	0.83
Calibración (1990 a 2017)	33.0	32.6	2474	2437	0.76	1.5	0.77
Validación (1980 a 1989)	40.4	40.80	3024	3055	0.76	-1.01	0.78
1980	49.1	43.7	3686	3282	0.79	10.96	0.80
1983	30.8	32.6	2304	2439	0.79	-5.83	0.80
1999	38.3	36.9	2869	2762	0.86	3.72	0.86
2000	35.5	38.5	2231	2893	0.70	-13.24	0.72
2005	20.1	21.7	1501	1625	0.67	-8.24	0.67
2011	41.0	45.0	2807	3366	0.74	-10.54	0.75

Q_{Obs} = caudales observados; Q_{Cal} = caudales calculados; L_{Obs} = lámina observada;
 L_{Cal} = lámina calculada

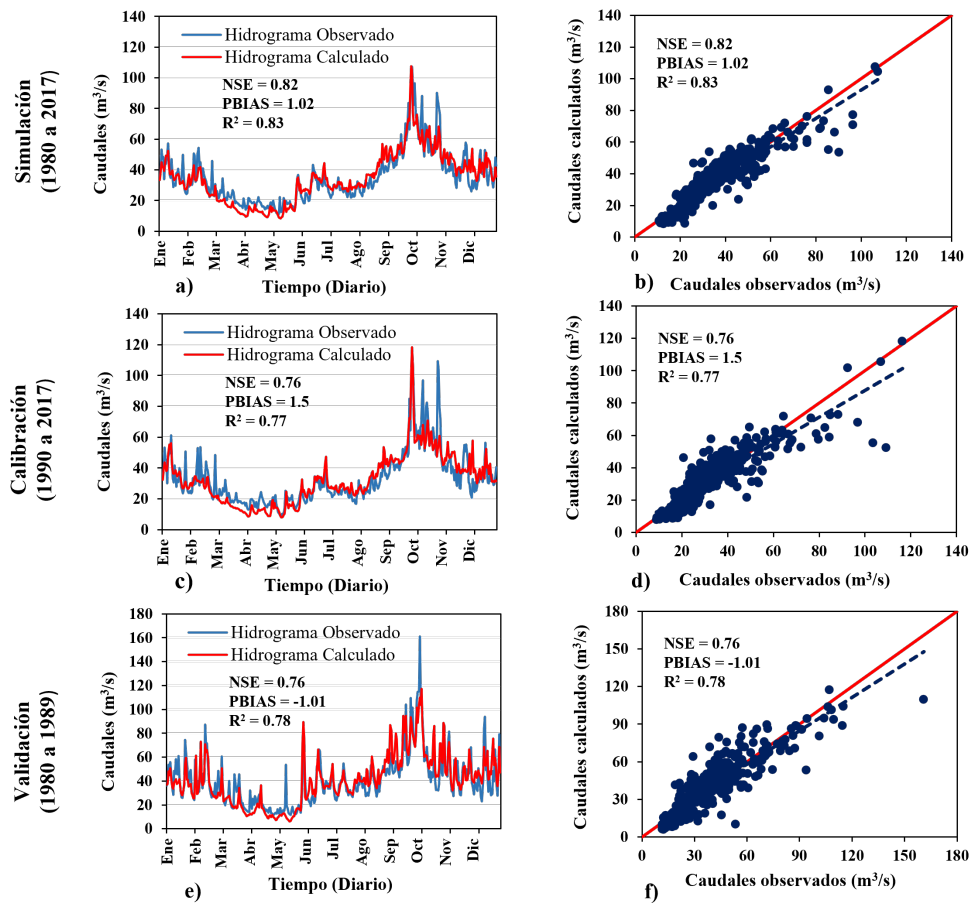


Figura 4. Caudales diarios interanuales observados y simulados en la estación hidrométrica Teapa: periodo de simulación (1980 a 2017), calibración (1990 a 2017) y validación (1980 a 1989)

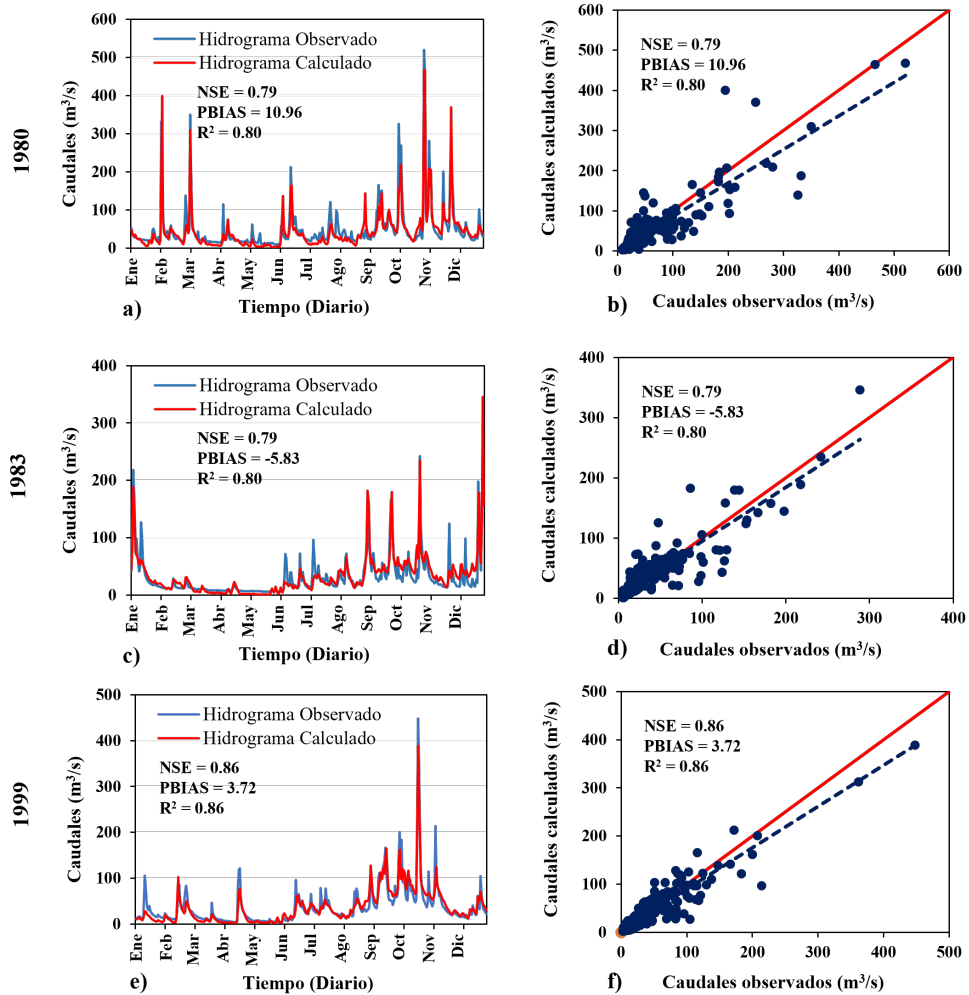


Figura 5. Caudales diarios observados y simulados en la estación hidrométrica Teapa para los años: 1980, 1983 y 1999

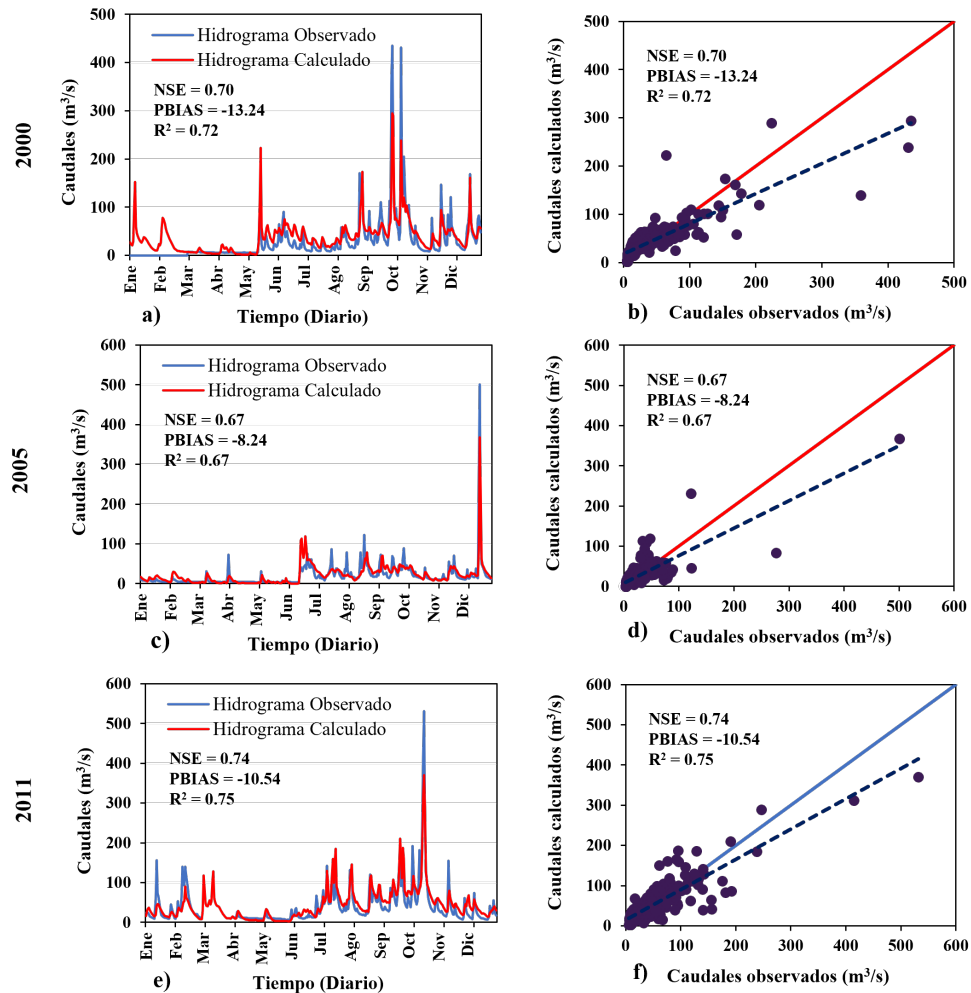


Figura 6. Caudales diarios observados y simulados en la estación hidrométrica Teapa: 2000, 2005 y 2011

DISCUSIÓN

CEQUEAU es un modelo hidrológico de uso accesible y libre. Este se ha empleado en diferentes regiones climáticas. Los resultados presentados en esta investigación muestran que el modelo CEQUEAU es capaz de reproducir el proceso lluvia-escurrimiento de la cuenca del río Teapa; y se comparan con otros estudios realizados en México y otros países.

Díaz-Mercado *et al.* (2015), Torres *et al.* (2018) y Magaña-Hernández *et al.* (2021) realizaron estudios en la misma región climática con el modelo CEQUEAU. Díaz-Mercado *et al.* (2015) simularon los caudales medios diarios del río La Sierra hasta la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (Clave CONAGUA: 30032) para el periodo de 1968 a 1998, obteniendo valores de *NSE* de 0.83 a 0.88 para los caudales diarios interanuales. Magaña-Hernández *et al.* (2022) aplicaron CEQUEAU para la estimación de caudales en sitios no

aforados de la cuenca del río Tacotalpa, calibraron y validaron el modelo en la estación hidrométrica Tapijulapa (Clave CONAGUA: 30093) y Oxolotán (Clave CONAGUA: 30111), con valores de *NSE* de 0.94 y 0.97 en la calibración y de *NSE* de 0.89 en la validación. Torres *et al.* (2018) realizaron la simulación de hidrológica de la cuenca del río Teapa con el modelo MIKE-SHE. La calibración del modelo fue de 1998 a 2000 y la validación de 2003 a 2005. El *NSE* en la calibración se encuentra entre 0.40 y 0.64, y en la validación 0.35 y 0.46 para los caudales diarios en la estación hidrométrica Teapa. En este estudio se emplearon dos estaciones climatológicas y la estación hidrométrica Teapa para la calibración y validación del modelo.

En nuestra investigación se empleó el modelo CEQUEAU para la simulación de los caudales diarios de la cuenca del río Teapa. En la simulación hidrológica se usaron diez estaciones climatológicas, las cuales se encuentran dentro y fuera de la cuenca en estudio. Por lo anterior, se puede determinar mejor la distribución espacial de la lluvia. El *NSE* fue de 0.76 en la calibración (1900 a 2017) y de 0.76 en la validación (1980 a 1989).

CONCLUSIONES

En la investigación se usó el modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU para evaluar la eficiencia en la simulación de los caudales medios diarios de la cuenca del río Teapa para el periodo de 1980 a 2017. El modelo CEQUEAU se calibró de 1990 a 2017 y se validó de 1980 a 1989 en la estación hidrométrica Teapa. Las tres estadísticas empleadas para medir la eficiencia del modelo indican que este es bueno.

Finalmente, los resultados obtenidos en la simulación hidrológica de la cuenca del río Teapa mediante el modelo CEQUEAU, representan el comportamiento hidrológico de la cuenca en épocas de lluvia y estiaje.

Con respecto a las futuras investigaciones, es importante realizar simulaciones hidrológicas a una escala temporal menor, en cuencas donde se cuente con registros de lluvia en intervalos cortos, ya que esto es fundamental para el pronóstico hidrológico y la alerta de desastres. Una alternativa es el uso de precipitación estimada por satélite meteorológico que ofrece datos en tiempo real a diferentes escalas temporales y a nivel mundial. Sin embargo, existen incertidumbres en las estimaciones de lluvia por satélite, ya que determinan la lluvia indirectamente. Por lo anterior, es necesario validar esas estimaciones con mediciones de lluvia en el terreno para su uso en aplicaciones hidrológicas.

REFERENCIAS

- Bâ, K. M., C. Díaz-Delgado, y V. Rodríguez-Osorio.** (2001). *Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el estado de México*, México. Ingeniería Hidráulica en México. 16, 117-126.
- Bâ, K. M., Díaz-Delgado, C., Quentin, E., Guerra-Cobián, V. H. Ojeda-Chihuahua, J. I., Alin-Andrei, C., y Franco-Plata, R.** (2013). *Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del río Senegal, África Occidental*. Tecnología y Ciencias del Agua, 4, 129-136.
- Díaz-Mercado, V., Bâ, K. M., Quentin, E., Ortiz Madrid, F. H. y Gama, L.** (2015). *Hydrological model to simulate daily flow in a basin with the help of a GIS*. Open Journal of Modern Hydrology, 5, 58-67.
- Fniguire, F., Laftouhi, NE., Al-Mahfadi, A.S., El Himer, H. y Khalil, N.** (2022). Hydrological modelling using the distributed hydrological model CEQUEAU in a semi-arid mountainous area: a case study of Ourika watershed, Marrakech Atlas, Morocco. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 7, 89-102. <https://doi.org/10.1007/s41207-021-00287-y>
- Grimaldi, S., Volpi, E., Langousis, A., Michael Papalexou, S., Luciano De Luca, D., Piscopia, R., Nerantzaki, S. D., Papacharalampous, G., y Petroselli, A.** (2022). Continuous hydrologic modelling for small and ungauged basins: A comparison of eight rainfall models for sub-daily runoff simulations. *Journal of Hydrology*, 610, 127866. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127866>
- Kwak, J., St-Hilaire, A., Chebana, F. y Kim, G.** (2017). Summer Season Water Temperature Modeling under the Climate Change: Case Study for Fourchue River, Quebec, Canada. *Water*, 9(5), 346. <https://doi.org/10.3390/w9050346>
- Llano, H. y Bâ, K. M.** (2011). Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal, País Vasco. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 27, 13-23.
- Magaña-Hernández, F., Muñoz Gómez, A. C., Mora Ortiz, R. S., Quiroga, L. A. y Guerra Cobián, V. H.** (2021). Estimación de caudales en cuencas no aforadas por el modelo hidrológico CEQUEAU. *Agrociencia*, 55(2), 99-115. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2389>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N. y Daggupati, P.** (2015). Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *American Society Agricultural and Biological Engineers*. 58, 1763-1785.
- Morin, G. y Paquet. P.** (1995). *Le modèle de simulation que Quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur. Version 2.0 pour Windows*. INRS-Eau, Rapport de recherche No. 435:54. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1099/1/R000435.pdf>. (Consulta: septiembre: 2022).

- Morin, G.,** Sochanski, W. y Paquet, P. (1998). “Le modèle de simulation de quantité CEQUEAU-ONU”: *Manuel de référence. Organisation des Nations-Unies et INRS-Eau, Rapport de recherche no 519, 252 pp.*
- Torres, M. A.,** Nikolskii, I., Martínez Miranda, M. E., y Martínez, M. R. (2018). Evaluación hidrológica de la cuenca del río Teapa, utilizando el modelo MIKE-SHE. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(4), 130-146. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-06>
- Vilchis-Mata, I.,** Bâ, K. M., Franco-Plata, R. y Díaz-Delgado, C. (2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 45-60. <http://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1178>