

ARTICLE / INVESTIGACIÓN

Evaluación de tres métodos de modelación hidrológica para la estimación de caudales medios mensuales en una subcuenca de la región central de Honduras

Assessment of three hydrological modeling methods for the estimation of mean-monthly discharge in a sub-basin of the central region of Honduras

Jose Castejón-Villalobos^{1*}, Lenin Henríquez-Dole², Abner Rodríguez-Lacayo¹, Marvin Grádiz-Cáceres¹, Yolanda Fletes-Ramos¹

DOI. 10.21931/RB/2023.08.03.41

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa, Honduras.

² EcoAgsus, Plataforma para la Sostenibilidad de los Ecosistemas.

Corresponding author: josecastejon2407@gmail.com

Resumen: El diseño de obras hidráulicas demanda conocimiento del régimen histórico de caudales en el sitio de ubicación de la futura obra. En lugares donde esta información es escasa se opta por el uso de modelos matemáticos para la estimación sintética de los caudales. En este estudio se evalúa el desempeño de tres modelos hidrológicos de escala mensual, utilizando como criterio de eficiencia la ecuación de Nash-Sutcliffe. Los modelos de Témez, Thomas y Thornthwaite-Mather han sido configurados para la subcuenca del Río Guacerique, en la región central de Honduras, Centroamérica, empleando una serie de caudales observados de 26 años. El análisis arroja valores de Eficiencia de NSE superiores a 0.6 para todos los casos, siendo el modelo de Thomas el más eficiente tanto para la fase de calibración (NS=0.858) como para la etapa de validación (NS=0.882). El modelo de Thornthwaite-Mather proporciona el desempeño más bajo de calibración (NS=0.639). El estudio demuestra que el uso de estas herramientas de simulación hidrológica, cuyo único insumo es la lluvia y la Evapotranspiración potencial (ETP), constituyen un excelente recurso para el diseño de obras hidráulicas y la planificación de los recursos hídricos en una región, incluso cuando los registros de caudal son escasos.

Palabras clave: Modelos Hidrológicos, Caudales Medios, Simulación, Calibración, Validación, Subcuenca.

Abstract: The design of hydraulic works demands knowledge of the historical flow regime at the site where the future structure will be located. In places where this information is scarce, using mathematical models is a good option for the synthetic estimation of discharges. This study evaluates the performance of three hydrological models of monthly scale, using as efficiency criterion the Nash-Sutcliffe equation. The models of Témez, Thomas and Thornthwaite-Mather have been implemented for the Guacerique River sub-basin in the central region of Honduras, Central America, using a series of observed flows of 26 years. The analysis yields NSE Efficiency values higher than 0.6 for all cases, with the Thomas model being the most efficient for both the calibration phase (NS=0.858) and the validation stage (NS=0.882). The Thornthwaite-Mather model provides the lowest calibration performance (NS=0.639). The study shows that the use of these hydrological simulation tools, whose only input is rainfall and the potential evapotranspiration (ETP), constitute an excellent resource for the design of hydraulic works and the planning of water resources in a region, even when discharge records are scarce.

Key words: Hydrological Models, Mean-Discharge, Simulation, Calibration, Validation, Sub-basin.

Introducción

Para el diseño adecuado de cualquier obra de aprovechamiento hidráulico es necesario conocer y comprender el comportamiento de los caudales que se han presentado en el sitio de interés a lo largo de la historia reciente¹. Es por ello, que contar con una serie de datos de aforos completa y prolongada es de vital importancia para el diseñador². Sin embargo, en la mayor parte de las corrientes naturales de Honduras no se dispone de series completas de caudal, por lo que las condiciones para el diseño se vuelven más complejas. Dado lo anterior, los modelos hidrológicos representan una excelente alternativa para la generación de

series mensuales de caudal.

Los modelos hidrológicos son simplificaciones de los procesos complejos que ocurren en la naturaleza. Dichos modelos intentan reproducir el ciclo hidrológico mediante ecuaciones matemáticas con distintas variables, las cuales pueden ajustarse con el objetivo de monitorear su impacto en el funcionamiento general del sistema³. Muchos de estos modelos se han desarrollado en estudios con el objetivo de que puedan ser evaluados y posteriormente utilizados en otras cuencas que presentan características similares³⁻⁵. Varios estudios de este tipo se han desarrollado en distintas

Citation: Castejón-Villalobos J, Henríquez-Dole L, Rodríguez-Lacayo A, Grádiz-Cáceres M, Fletes-Ramos Y. Assessment of three hydrological modeling methods for the estimation of mean-monthly discharge in a sub-basin of the central region of Honduras. *Revis Bionatura* 2023;8 (3) 41. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.03.41>

Received: 20 June 2023 / **Accepted:** 25 August 2023 / **Published:** 15 September 2023

Publisher's Note: Bionatura stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



partes del mundo. Algunos evalúan un método de manera independiente⁶⁻¹⁰, mientras otros analizan el desempeño de varios métodos a la vez^{3,11,12}. En la región de Centroamérica se han desarrollado con éxitos algunos estudios de modelación hidrológica, que van más enfocados a la estimación de caudales pico, o de eventos de crecida¹³⁻¹⁶. Sin embargo, el estudio de modelos para la generación de caudales medios mensuales se presenta también como un campo con gran potencial para la investigación.

Es por ello que se desarrolla el presente trabajo con el objetivo de evaluar el desempeño de tres métodos hidrológicos para la estimación de caudales medios mensuales en una subcuenca localizada en la zona centro de Honduras. Los métodos de Témez, Thomas y Thornthwaite-Mather han sido seleccionados, por su simplicidad y escasa información de entrada, para ser evaluados en la subcuenca del río Guacerique. Los resultados servirán de base para la aplicación de estos métodos en otras cuencas con características similares que cuenten con escasa información de caudales.

Materiales y métodos

Área de Estudio

La subcuenca del Río Guacerique se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Choluteca y tiene una gran relevancia para la ciudad capital del país, pues aguas abajo de la estación de aforo se ubica la represa de Los Laureles, que abastece a aproximadamente un 30% de la población de Tegucigalpa¹⁷.

La subcuenca del Río Guacerique, cuya corriente principal nace de la montaña de Yerbabuena, posee un área de drenaje total de 150.5 km² contabilizados hasta el sitio de ubicación de la estación de aforo en las coordenadas

UTM WGS1984 467643.6N, 1556410.2E (Fig. 1). Esta subcuenca posee un perímetro total de 84.54km y un factor de forma de 0.57, que corresponde a cuencas de forma alargada¹⁸. El coeficiente de compacidad de Gravelius de la subcuenca es de 1.93 y su densidad drenaje es de 0.78, considerada como baja¹⁴. La pendiente media de la subcuenca es de 30%.

La subcuenca cuenta con datos pluviométricos y de temperatura a escala diaria y mensual para 7 estaciones dentro y alrededor de la subcuenca, de las cuales únicamente 4 han cumplido con los requisitos de calidad y tiempo de registro¹⁹. Las 4 estaciones con las que se ha trabajado son Ocote Bonito, San Matías, La Brea y Quebramontes, todas manejadas por el SANAA (Fig. 2). Mediante la metodología del polígono de Thiessen²⁰, se ha estimado los valores medios mensuales para una serie continua de lluvia de 1990 a 2015. El promedio anual de lluvia en la subcuenca es de 1217mm, siendo febrero el mes más seco con apenas 9mm en promedio y septiembre el más lluvioso con un promedio histórico de 225mm.

Metodología

En el presente estudio se han empleado tres herramientas diferentes para la estimación de caudales medios mensuales en la subcuenca del Río Guacerique. Las 3 herramientas empleadas son las de Témez, Thomas ABCD y Thornthwaite-Mather. Todos estos son modelos hidrológicos concentrados, a escala mensual, que requieren como elementos básicos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial, brindando como resultado valores de caudal superficial³. Estos métodos son muy convenientes ya que requieren de pocos insumos, básicamente lluvia y temperatura, y se pueden configurar fácilmente para áreas donde se carece de información completa de caudal. Estos modelos hidrológicos resuelven la ecuación básica de balance hídrico donde las entradas y salidas de agua definen el cambio en el

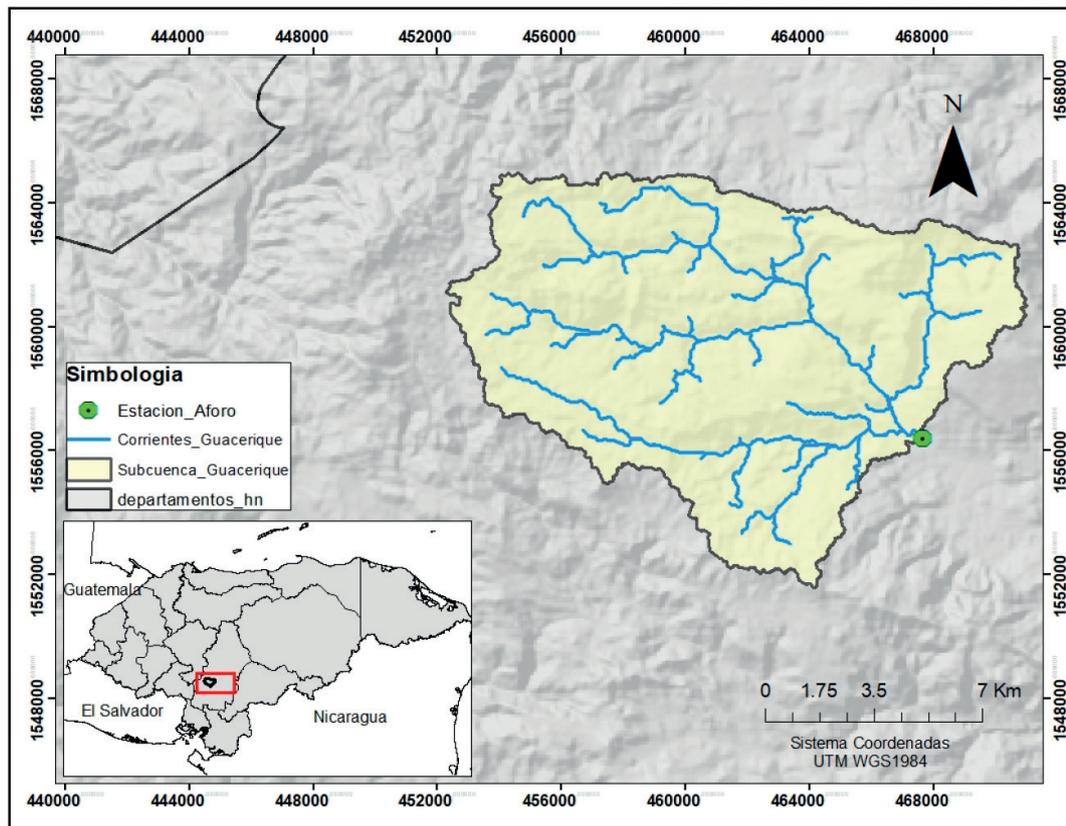


Figura 1. Mapa Ubicación Subcuenca Río Guacerique. Coordenadas: UTM WGS1984 4 6 7 6 4 3 . 6 N , 1556410.2E

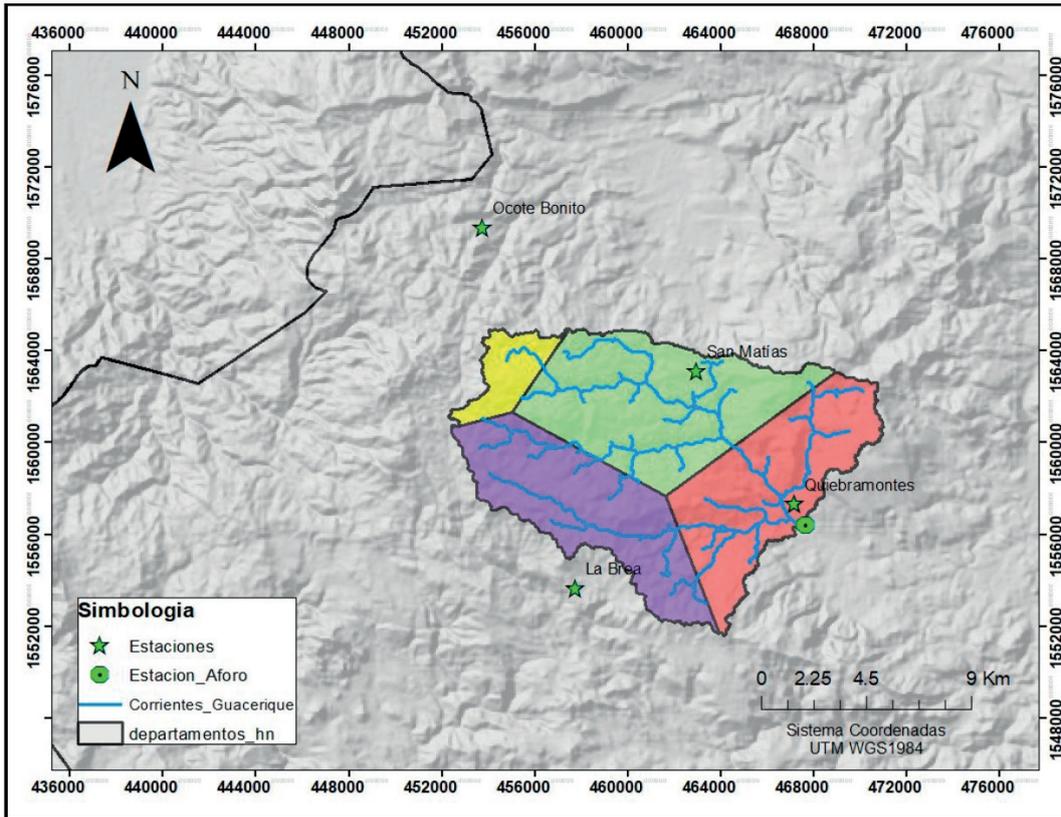


Figura 2. Mapa Ubicación Estaciones.

almacenamiento de dentro de los diferentes “reservorios” o “tanques” superficiales y subterráneos.

Como criterio de evaluación del desempeño para todos los métodos se ha empleado la ecuación de eficiencia de Nash-Sutcliffe²¹, la cual permite encontrar la combinación óptima de los parámetros del modelo a calibrar, maximizando el valor de la función objetivo. Los modelos han sido calibrados para el periodo de 1990 a 2005 y se ha validado su desempeño para un periodo posterior en la serie histórica, específicamente de 2006 a 2015.

Método 1 - Témez

El modelo de Témez es un modelo hidrológico desarrollado en 1977, del tipo concentrado, y que emplea como datos de entrada la lluvia y la evapotranspiración potencial a nivel mensual. Este método supone el cálculo del balance hídrico empleando dos reservorios, uno superior que representa la zona no saturada del suelo y otro inferior que representa el almacenamiento subterráneo y su posterior contribución al curso de agua superficial⁵.

La metodología y las ecuaciones planteadas en el método de Témez se describen en muy buen detalle en varias publicaciones científicas de referencia^{5,7,22}. En este método, la precipitación que cae sobre el suelo se divide en el agua evapotranspirada y en agua excedente. Una parte del excedente escurre superficialmente durante el mismo mes mientras que el resto se infiltra y recarga el acuífero. Después de un tiempo, el agua almacenada en el reservorio subterráneo es liberada para alimentar el caudal superficial total en meses subsiguientes.

En este modelo hidrológico se deben calibrar 4 parámetros, los cuales son únicos y particulares para cada cuenca. Los parámetros del modelo son cuatro: $H_{m\acute{a}x}$, la capacidad máxima de humedad del suelo; $I_{m\acute{a}x}$, la capacidad máxima de infiltración; C el parámetro de excedente; α es el coeficiente de la rama de descarga¹¹.

Método 2 Caudales Medios Mensuales - Thomas (ABCD)

El método de Thomas²³, también conocido como ABCD fue presentado originalmente en 1981. Al igual que en el caso de Témez, este modelo es de carácter agregado y emplea la precipitación y la evapotranspiración potencial a escala mensual como datos de entrada y entrega valores de caudal mensual como resultado del análisis⁹.

Este modelo es considerado conceptual y de base física y resuelve los cálculos de los procesos del ciclo hidrológico empleando dos tanques de almacenamiento, uno superficial representado por la humedad del suelo y uno subterráneo representado por el acuífero. El tanque superficial gana humedad de la precipitación y la pierde por efectos de la evapotranspiración, la escorrentía superficial y la recarga directa que se producen al excederse el valor de humedad máxima del suelo. El acuífero se alimenta de la recarga y pierde volumen al ceder parte del flujo superficial en meses posteriores¹⁰.

La metodología y ecuaciones que emplea el modelo se encuentran detalladas ampliamente en artículo de difusión científica^{9,10,23,24}. Para el embalse superficial se resuelve la ecuación de continuidad donde el cambio de almacenamiento es igual volumen inicial sumado a la lluvia y restando la evapotranspiración real y la recarga del acuífero. En el embalse subterráneo, el cambio de volumen fluctúa de acuerdo a las entradas por recarga y pérdidas por aporte al caudal superficial⁸.

En el modelo se calibran 4 parámetros, A, que controla las salidas del tanque superficial; B, que determina el nivel de saturación del suelo; C, define el porcentaje de aporte del acuífero al río; y, D, controla el flujo subterráneo.

Método 3 Caudales Medios Mensuales - Thornthwaite-Mather

El método de Thornthwaite-Mather²⁵ es un modelo

de balance hídrico desarrollado en 1957 y que resuelve la ecuación general del balance entre entradas y salidas empleando el almacenamiento del suelo como volumen de control. Las entradas del modelo se representan a través de la precipitación Mensual (P) y las salidas son representadas por la demanda atmosférica de agua (ETP). Mediante este método es posible estimar la evapotranspiración real (ETR), el déficit (DEF), el excedente (EXC) y el almacenamiento de agua en el suelo²⁶.

El empleo de este método es bastante ventajoso, pues únicamente requiere como datos de entrada la precipitación y la temperatura promedio mensual. El método determina la ETP con la ecuación de Thornthwaite considerando la latitud y número de horas de luz sobre el área de influencia. En base a una capacidad máxima de almacenamiento del suelo y la precipitación (P) del mes, se calcula la ETP real, y sobre todo el excedente (EXC), el cual se divide en escurrimiento directo y recarga del acuífero. El agua que alimenta el almacenamiento subterráneo es liberada en meses posteriores de manera paulatina. La metodología y ecuaciones se presentan con detalle y ejemplos en el reporte de Thornthwaite-Mather²⁵.

Para el presente estudio se han considerado 3 parámetros para calibración: La capacidad máxima de almacenamiento del suelo $C_{máx}$, el porcentaje del agua excedente que se convierte en escorrentía directa FED y el porcentaje que se convierte en recarga directa del acuífero FRD.

Evaluación del Desempeño de los Modelos – Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)

Para la evaluación del desempeño de los modelos se ha empleado la ecuación de eficiencia de Nash-Sutcliffe, la cual relaciona los caudales observados con los obtenidos de la simulación mediante un valor numérico que oscila entre 1 y $-\infty$, siendo un valor de 1 una coincidencia perfecta entre modelo y observaciones^{21,27,28}.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

Dónde: O_i = Caudal Observado, M_i = Caudal simulado, \bar{O} = Promedio de los caudales observados.

Moriasi *et al.*²⁸ establece varios rangos de desempeño, siendo “Muy bueno” un valor de NSE entre 0.75 y 1; “Bueno” un valor de NSE entre 0.65 y 0.75; “Satisfactorio” un valor entre 0.5 y 0.65. Valores inferiores a 0.5 son considerados como “No Satisfactorios”.

Resultados

Modelo de Témez

A continuación, se muestran los resultados del proceso de calibración de los parámetros $H_{máx}$, $I_{máx}$, C y α del modelo de Témez, para la subcuenca del Río Guacerique. La función objetivo que se ha empleado, la de NSE, ha mostrado un valor de 0.773. A continuación, se muestran los valores calibrados para $H_{máx}$, $I_{máx}$, C y α .

La grafica de caudales observados en el sitio vs caudales simulados con el modelo Témez se muestran a continuación. En general, los resultados son satisfactorios, tanto

en la representación de los caudales altos como en los que se dan en la época seca. Algún valor pico se ha subestimado con el modelo, como en el caso de agosto de 1995. En otros casos, como en octubre de 1999, el pico es sobrestimado por el modelo.

Empleando los valores de los parámetros $H_{máx}$, $I_{máx}$, C y α del modelo de Témez, obtenidos durante la fase calibración, se ha simulado la serie de tiempo que inicia en enero de 2006 y finaliza en abril de 2015. El valor de NSE obtenido para la etapa de validación es de 0.662.

Modelo ABCD de Thomas

A continuación, se presentan los resultados del proceso de calibración de los parámetros A, B, C y D del modelo de Thomas, para la subcuenca del Río Guacerique. La función objetivo que se ha empleado, la de NSE, ha mostrado un valor de 0.858. A continuación, se muestran los valores calibrados para A, B, C y D.

La grafica de caudales observados en el sitio vs caudales simulados con el modelo Thomas se muestran a continuación. El modelo de Thomas también muestra una subestimación del caudal observado en agosto de 1995 y una sobrestimación en octubre de 1999.

Empleando los valores de los parámetros A, B, C y D del modelo de Thomas, obtenidos durante la fase calibración, se ha simulado la serie de tiempo que inicia en enero de 2006 y finaliza en abril de 2015. El valor de NSE obtenido es de 0.882.

Modelo Thornthwaite-Mather

A continuación, se muestra el proceso de calibración de los parámetros $C_{máx}$ Suelo, Factor Escorrentía Directa (FED), Factor Recarga Directa (FRD) del modelo de Thornthwaite-Mather, para la subcuenca del Río Guacerique. La función objetivo que se ha empleado durante la fase de calibración, la de NSE, ha mostrado un valor máximo de 0.639. A continuación, se muestran los valores calibrados para $C_{máx}$, FED, FRD.

La grafica de caudales observados en el sitio vs caudales simulados con el modelo Thornthwaite-Mather se muestran a continuación. Con este modelo no hay subestimación del caudal observado en agosto de 1995, aunque si se observa la sobrestimación del caudal para octubre de 1999. Se observan varios periodos donde la representatividad es baja.

Empleando los valores de los parámetros $C_{máx}$, FED, y FRD del modelo de Thornthwaite-Mather, obtenidos durante la fase calibración, se ha simulado la serie de tiempo que inicia en enero de 2006 y finaliza en abril de 2015. El valor de NSE obtenido es de 0.527.

Tabla Resumen de Resultados

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos para cada modelo durante la calibración y validación de los mismos. Los resultados muestran que el modelo de Thomas es el que muestra una eficiencia más alta tanto en la fase de calibración como en la validación. El modelo de Thornthwaite-Mather presenta el desempeño más bajo.

$H_{máx}$ (mm)	$I_{máx}$ (mm)	C	A (mes^{-1})
547.9	400	0.010	0.056

Tabla 1. Valores Parámetros Calibrados Témez.

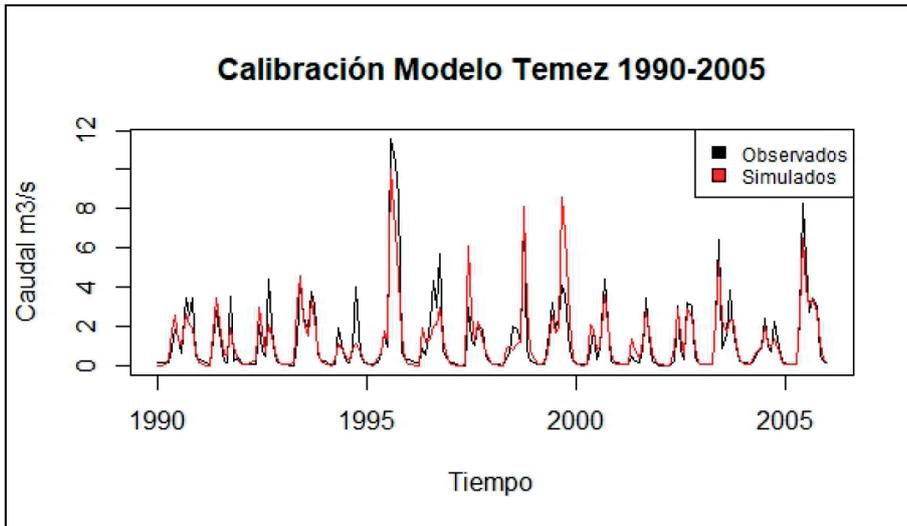


Figura 3. Fase Calibración Temez.

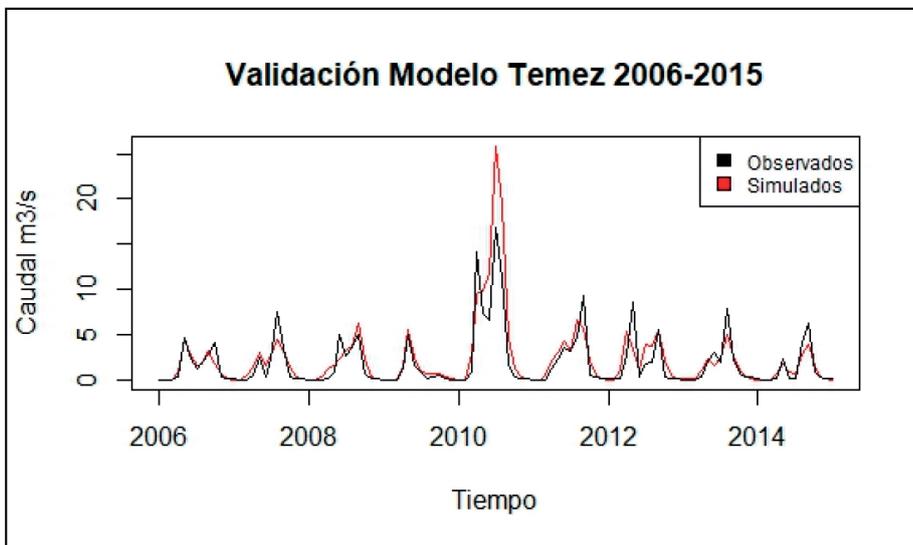


Figura 4. Fase Validación Temez.

A	B (mm)	C	D
0.913	374.42	0.001	0.056

Tabla 2. Valores Parámetros Calibrados ABCD Thomas.

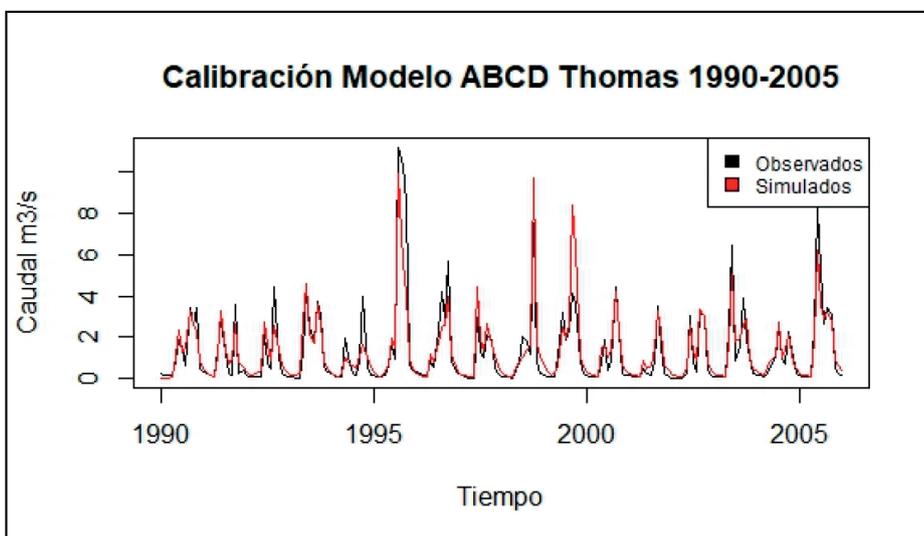


Figura 5. Fase Calibración Thomas.

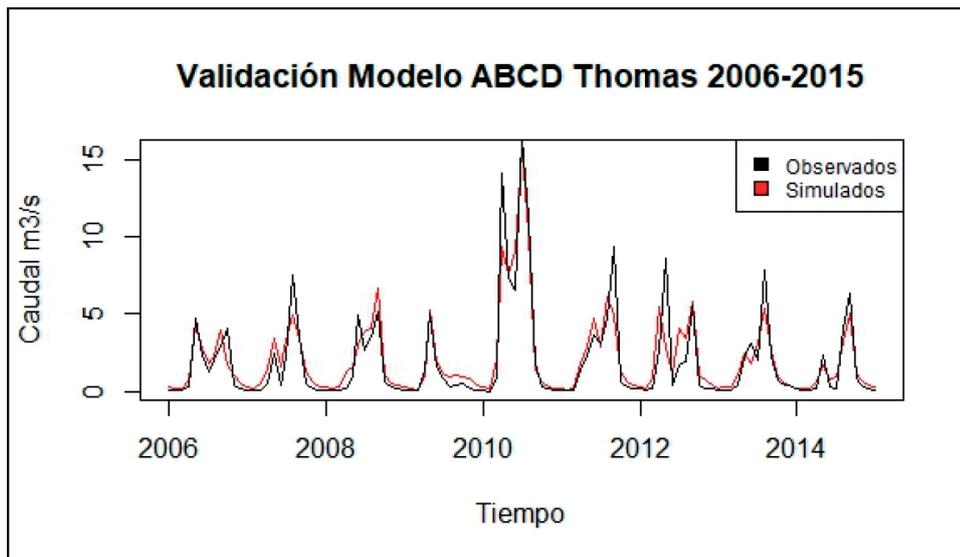


Figura 6. Fase Validación Thomas.

Cmáx (mm)	FED	FRD
125.8	0.543	0.457

Tabla 2. Valores Parámetros Calibrados ABCD Thomas.

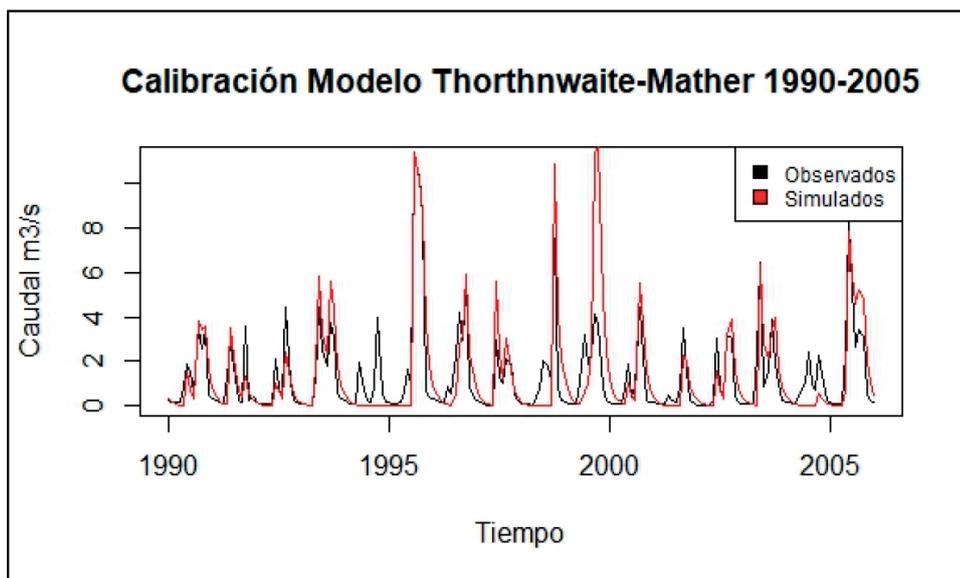


Figura 7. Fase Calibración Thornthwaite-Mather.

Modelo	NSE Calibración	NSE Validación
Témez	0.773	0.662
Thomas	0.858	0.882
Thornthwaite-Mather	0.639	0.527

Tabla 4. Valores NSE para los 3 modelos.

Discusión

Los resultados obtenidos mediante la modelación con Témez muestran un valor de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.773 durante la fase de calibración, lo cual representa un valor "Muy Bueno"^{23,24}. Esto indica que el modelo simula de muy buena manera los caudales observados para el periodo de 1990 a 2005. Observando las gráficas se infiere una muy buena representación entre lo modelado y lo observado, sobre todo en cuanto a los caudales medios y altos, con excepción de un periodo en 1996 donde el modelo se observa un poco errático, siendo sus resultados muy bajos respecto a la realidad. En septiembre de 1999 se observa

una sobrestimación del caudal observado. Estas diferencias notables pueden deberse no necesariamente al modelo sino también a aspectos relacionados con los insumos de entrada. Una vez definidos los parámetros calibrados para el modelo, observamos que el valor de eficiencia de NS se reduce para el periodo de validación que transcurre de 2006 a 2015. Dicho valor es de 0.662, el cual se considera "Bueno"²⁴.

De manera similar el modelo ABCD de Thomas nos presenta el valor de eficiencia para la fase de calibración de 0.858, el cual es también "Muy Bueno". Gráficamente, a excepción de la subestimación del caudal de octubre de 1999, la relación entre modelo y datos observados es exce-

lente. Durante la fase de validación, su desempeño mejoró ligeramente, pero con un valor muy similar al de la calibración. Su valor de 0.882 se considera también “Muy Bueno”.

El modelo de Thornthwaite-Mather es el que mostró el desempeño más bajo de los 3 modelos. El valor de NSE durante la fase de calibración es de 0.639, el cual, aunque es bueno, es considerablemente menor que los otros dos modelos. Durante la fase de validación el valor de NSE baja considerablemente a 0.527, el cual es considerado “satisfactorio”. Al observar la gráfica de caudales observados vs. Simulados se puede inferir un bajo desempeño en algunos periodos de tiempo como el de 1994-1996, cerca del año 2000 o el año 2005. Este modelo tiene un comportamiento “satisfactorio”.

En términos generales, y en base al valor de NSE, el modelo ABCD de Thomas es el que mejor representa los valores de caudal observados en el sitio de aforo entregando un excelente desempeño tanto en la fase de calibración como en la de validación. El modelo de Thornthwaite, aunque bueno, es el que ha mostrado el desempeño más bajo en ambas fases de análisis, y esto puede corroborarse en las gráficas comparativas.

En este trabajo, al igual que en algunos de los estudios citados, desarrollados sobre todo en la zona de Suramérica, el modelo de Thomas ha presentado resultados satisfactorios^{10,11}. En estudios desarrollados en Norteamérica también mostrando un desempeño notable⁹. El modelo de Témez, empleado ampliamente en España y Sudamérica^{3,7,11}, también ha dado resultados satisfactorios en el presente trabajo. Lo anterior denota una buena aplicabilidad de los métodos estudiados en distintas regiones de América y España.

Los resultados son muy positivos para todos los métodos y se ha podido apreciar un gran nivel de desempeño para cada uno de ellos. Lo anterior permite que el presente trabajo pueda servir como punto de partida para continuar evaluando la aplicabilidad de dichos métodos en otras cuencas instrumentadas y no instrumentadas del país. Y más allá, puede servir como referencia para futuros estudios de este tipo en la región latinoamericana.

Conclusiones

Las tres metodologías empleadas en este estudio han arrojado valores de eficiencia de Nash-Sutcliffe “buenos” y “muy buenos” durante la fase de calibración, siendo el modelo ABCD de Thomas el que ha presentado el valor más alto con 0.858. Durante la fase de validación el valor de NSE para Thomas fue incluso superior.

El modelo Thornthwaite-Mather es el que presenta la menor eficiencia tanto para la fase de calibración, 0.639 como para la de validación 0.527. Las gráficas muestran periodos de tiempo en los que los caudales observados difieren considerablemente de los que arroja el modelo.

Las tres metodologías muestran un ajuste al menos “satisfactorio” para la serie histórica de 26 años. Con ello se concluye que el uso de estos modelos matemáticos para estimación de caudales medios mensuales podrían ser un recurso muy útil para la planificación de los recursos hídricos y el diseño de obras hidráulicas, incluso en zonas que carezcan de datos de caudal pero que cuenten con información pluviométrica y de temperatura.

Este estudio y los resultados obtenidos representan un punto de partida para continuar con la evaluación en el des-

empeño de las diferentes metodologías de caudales medios. Se puede aplicar un análisis similar en otras cuencas instrumentadas, para poder confirmar si hay una tendencia de desempeño clara para cada modelo. Posteriormente se podrá analizar la aplicabilidad de los mismos en cuencas no instrumentadas.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, definición metodología, configuración odelos, edición artículo, Jose Castejón-Villalobos; edición artículo, revisión artículo, supervisión, Lenin Henríquez - Dole; Análisis y depuración datos, generación mapas, investigación, validación, Abner Rodríguez-Lacayo, Marvin Grádiz-Cáceres y Yolanda Fletes-Ramos.

Financiamiento

Este trabajo de investigación no ha contado con financiamiento externo.

Agradecimientos

Al departamento de Cuencas del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) por proporcionar la información de clima y caudales utilizados para el presente estudio. A Eduardo Coello y Pedro Flores, por su colaboración en la depuración de los datos de clima y proporcionar soporte con las actividades de SIG. A Elmer Santos y Jose Mejía por su colaboración en la configuración del modelo de Témez. A Jefferson Aguilar y Jose Lagos por su colaboración en la configuración del modelo de Thomas.

Conflictos de Interés

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses en este estudio.

Referencias bibliográficas

1. Kassahun, T.; Megersa, D. Application of SARIMA model to forecasting monthly flows in Waterval River, South Africa. *Journal of Water and Land Development* 2017, 35 (X-XII), 229-236.
2. Robredo, J. C.; Rojo, I.; Mintegui, J. A. Un método Aproximado para Estimar Caudales Medios Mensuales en Pequeñas Cuencas de Montaña. *Ecología* 2012, 24, 27-42.
3. Pizarro, R.; Soto, M.; Farías, C.; Jordan, C. Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque* 2005, 26(2), 123-129.
4. Carmona, A.; Ayuso, J.; Ayuso, J.L. Estudio de algunos Modelos Determinísticos Precipitación-escorrentía. Aplicación a una Cuenca Real. *Ingeniería Civil* 1990, 77, 13-28.
5. Estrela, T. Los Modelos de Simulación Integral de Cuenca y su Utilización en Estudios de Recursos Hídricos. *Ingeniería Civil* 1990, 72, 83-95.
6. Escobar, Y.; Arango, D.; Jiménez, H. Estimación de caudales promedios mensuales por subcuencas hidrológicas mediante modelación con HEC-HMS. *Tecnura* 2007, 11(21), 14-28.
7. Oñate-Valdivieso, F.; Bosque-Sendra, J.; Sastre-Merlin, A.; & Ponce, M. Calibration, validation and evaluation of a lumped hydrologic model in a mountain area in southern Ecuador. *Agrociencia* 2016, 50, 945-963.
8. Wang, X.; Gao, B.; Wang, X. A Modified ABCD Model with Temperature-Dependent Parameters for Cold Regions: Application to Reconstruct the Changing Runoff in the Headwater Catchment of the Golmud River, China. *Water* 2020, 12, 1812-1834.

9. Al-Lafta, H.; Al-Tawash, B.; & Al-Baldawi, B. Applying the "abcd" Monthly Water Balance Model for Some Regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications* 2013, 25, 36-45.
10. Romero-Cuéllar, J.; Buitrago-Vargas, A.; Quintero-Ruiz, T.; Francés, F. Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Revista Iberoamericana del Agua* 2018, 5(1), 63-78.
11. Ricaldi, O. Comparación de Modelos Hidrológicos para la Simulación de Caudales Medios Mensuales en la Cuenca del río Tomayapo. *Ciencias Sur* 2016, 2(2), 1-9.
12. Poveda, G.; Mesa, O.; Carvajal, L.; Hoyos, C.; Mejía, J.; Cuartas, A.; Pulgarin, A. Predicción De Caudales Medios Mensuales En Ríos Colombianos Usando Métodos No Lineales. *Meteorología Colombiana* 2002, 6, 101-110.
13. Smith, M.; Phillips, J.; Spahr, N. Hurricane Mitch: Peak discharge for selected river reaches in Honduras (No. 1). US Geological Survey, US Department of the Interior 2002.
14. Quesada-Román, A.; Ballesteros-Cánovas, J.; Granados-Bolaños, S.; Birkel, C.; Stoffel, M. Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology* 2020, 359, 107133.
15. Charbonnier, S.; Connor, C.; Connor, L.; Sheridan, M.; Oliva Hernández, J.; Richardson, J. Modeling the October 2005 lahars at Panabaj (Guatemala). *Bulletin of Volcanology* 2018, 80, 1-16.
16. Quesada-Román, A.; Ballesteros-Cánovas, J.; Granados-Bolaños, S.; Birkel, C.; Stoffel, M. Improving regional flood risk assessment using flood frequency and dendrogeomorphic analyses in mountain catchments impacted by tropical cyclones. *Geomorphology* 2022, 396, 108000.
17. Rodríguez Cruz, G. O. Escasez de agua en Tegucigalpa, Honduras: ¿Está siendo afectada la subcuenca Guacerique por la variabilidad climática y el arrastre de sedimentos? *Revista de Ciencias Ambientales* 2021, 55, 118-142.
18. Jardí, M. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las Variables Morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía* 1985, 19, 41-68.
19. MiAmbiente/UNAH. Evaluación de los Recursos Hídricos en su régimen Natural. Tegucigalpa: UNAH, Honduras, 2014, pp. 43-44.
20. Pizarro, R.; Ramírez, C.; Flores, J. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. *Bosque* 2003, 24(3), 31-38.
21. Nash, J.; Sutcliffe, J. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 1970, 10(3), 282-290.
22. Meza, D.; Martínez, L. M.; Mercado, N.; García, D.; González, M.; Marchamalo, M.; De La Mora, C. Régimen natural de caudales del río Ayuquila-Armería en el occidente de México. *Terra Latinoamericana* 2017, 35, 203-217.
23. Thomas, H. Improved Methods for National Water Assessment: Final report USGS Water Resources Contract WR15249270. Cambridge, Massachusetts: Harvard University, 1981.
24. Martínez, G.; Gupta, H. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the "abcd" monthly water balance model for the conterminous United States. *Water Resources Research* 2010, 46(8), 1-21.
25. Thornthwaite, C.; Mather, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. New Jersey: Publications in Climatology, 1957.
26. Bohn, V.; Campo, A. Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas. *Investigaciones Geográficas* 2010, 71, 31-42.
27. Waseem, M.; Mani, N.; Usman, M. A Review of Criteria of Fit for Hydrological Models. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2017, 4, 1765-1772.
28. Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 2007, 50(3), 885-900.