



Comparativa entre los modelos de precipitación-escorrimento HBV y Témez a escala mensual. Caso de estudio Cuenca del Lago de Cuitzeo

Comparison between the HBV and TEMEZ precipitation-runoff models on a monthly scale. Case study Lake Cuitzeo Basin

Ulises Helios Méndez Vallejo, José Guadalupe García Contreras, Jesús Pardo Loaiza*, Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán.

Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024
Manuscrito aceptado: 31 de octubre de 2024
Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Jesús Pardo Loaiza
E-mail: jesus.pardo@umich.mx

Resumen

El presente trabajo realiza una comparativa entre los modelos precipitación-escorrimento HBV y Témez a escala mensual para determinar cuál representa mejor los escurrimientos históricos. El análisis se llevó a cabo en la cuenca del Lago de Cuitzeo, por medio del análisis de tres subcuencas a régimen natural durante el periodo de 1960 a 1990. Para la aplicación de los modelos, se utilizaron los softwares EvalHid y CalEv. Con base en los índices de bondad de ajuste calculados a partir simulaciones realizadas a escala mensual, se observó que el modelo HBV representa los caudales pequeños y grandes de manera más precisa, acercándose mejor a la media de escurrimientos. No obstante, el modelo HBV tiende a sobrestimar los caudales en algunos meses húmedos, mientras que el modelo de Témez sobrestima notablemente los escurrimientos en los meses secos. La metodología propuesta requiere pocos recursos económicos, materiales, humanos y tecnológicos, por lo que la aplicación de un modelo de precipitación en zonas con escasa información resulta eficaz para la evaluación de los recursos hídricos, a falta de métodos que consideren menos variables de análisis y que generalicen el fenómeno del ciclo hidrológico.

Palabras clave: Hidrología, modelación superficial, escurrimiento, HBV, Témez

Introducción

Los modelos sobre precipitación-escorrimento son herramientas imprescindibles en hidrología, ya que permiten simular los procesos físicos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca, logrando representar la transformación de la precipitación en escurrimiento superficial y subsuperficial. Estas simulaciones son

Abstract

The present work makes a comparison between the HBV and Témez precipitation-runoff models on a monthly scale to decide which best represents the historical runoff. The analysis was conducted in the Cuitzeo Lake basin, through the analysis of three sub-basins under the natural regime during the period from 1960 to 1990. For the application of the models, the EvalHid software was used, as well as its calibrator. Based on the goodness of fit indices calculated from simulations carried out on a monthly scale, it was observed that the HBV model represents small and large flows more accurately, being closer to the average runoff. However, the HBV model tends to overestimate flows in some wet months, while Témez's model significantly overestimates runoff in dry months. The proposed methodology requires few economic, material, human and technological resources, so the application of a precipitation model in areas with scarce information is effective for the evaluation of water resources, in the absence of methods that consider fewer variables of analysis and that generalize the phenomenon of the hydrological cycle.

Keywords: Hydrology, surface modeling, Cuitzeo lake, runoff, HBV, Témez.

fundamentales para comprender a profundidad el funcionamiento de la cuenca hidrográfica y para realizar pronósticos confiables de los caudales y volúmenes de escurrimiento esperados. Dentro de la amplia variedad de modelos precipitación-escorrimento desarrollados, los modelos que destacan por su versatilidad y uso extendido en distintas regiones del mundo son

particularmente, el modelo HBV originado en Suecia (Bergström, 1995) y el modelo Témez creado en España (Témez, 1977), los cuales se consideran hoy en día como dos de los modelos más utilizados para fines prácticos de simulación hidrológica.

A pesar de que ambos modelos han demostrado su utilidad en distintas regiones, su aplicabilidad en cuencas con condiciones climáticas y fisiográficas particulares puede variar. Por ello, es necesario evaluar su desempeño comparativo específicamente en la cuenca de interés. En regiones como la cuenca del Lago de Cuitzeo, así como en diversas partes de México, la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, la presencia de diversos usos y tipos de suelos, y la poca disponibilidad de información climatológica e hidrométrica (Sánchez-Quispe *et al.*, 2021) son retos importantes para la modelación hidrológica.

Considerando estas condiciones, el presente trabajo plantea como objetivo evaluar y comparar los modelos HBV y Témez a escala mensual en 3 subcuencas pertenecientes a la cuenca del Lago de Cuitzeo. La comparativa permitirá identificar fortalezas y debilidades en la representación de los escurrimientos, así como generar recomendaciones para la elección

de un modelo óptimo para realizar simulaciones de escurrimientos a nivel subcuenca y cuenca en función del objetivo de análisis. Los resultados sentarán las bases para mejorar la evaluación de recursos hídricos en zonas con poca información y apoyar la gestión de las cuencas hidrológicas en la región.

Materiales y métodos

La metodología consistió principalmente en la caracterización de las subcuencas en estudio, las cuales forman parte del Sistema de Recursos Hídricos (SRH) de la cuenca del Lago de Cuitzeo a través de la obtención de información geoespacial, climatológica e hidrométrica de distintas bases de datos (Figura 1), con su respectivo procesamiento y análisis en software como ArcGIS, QGIS y Microsoft Excel. Posterior al tratamiento de datos, se continuó con la aplicación de los modelos Témez y HBV, para ello, se emplearon los programas EvalHid y CalEv.

Información geoespacial

Para delimitar la zona de estudio, se descargaron diversos archivos de tipo ráster y vectorial, principalmente de tres bases de datos:

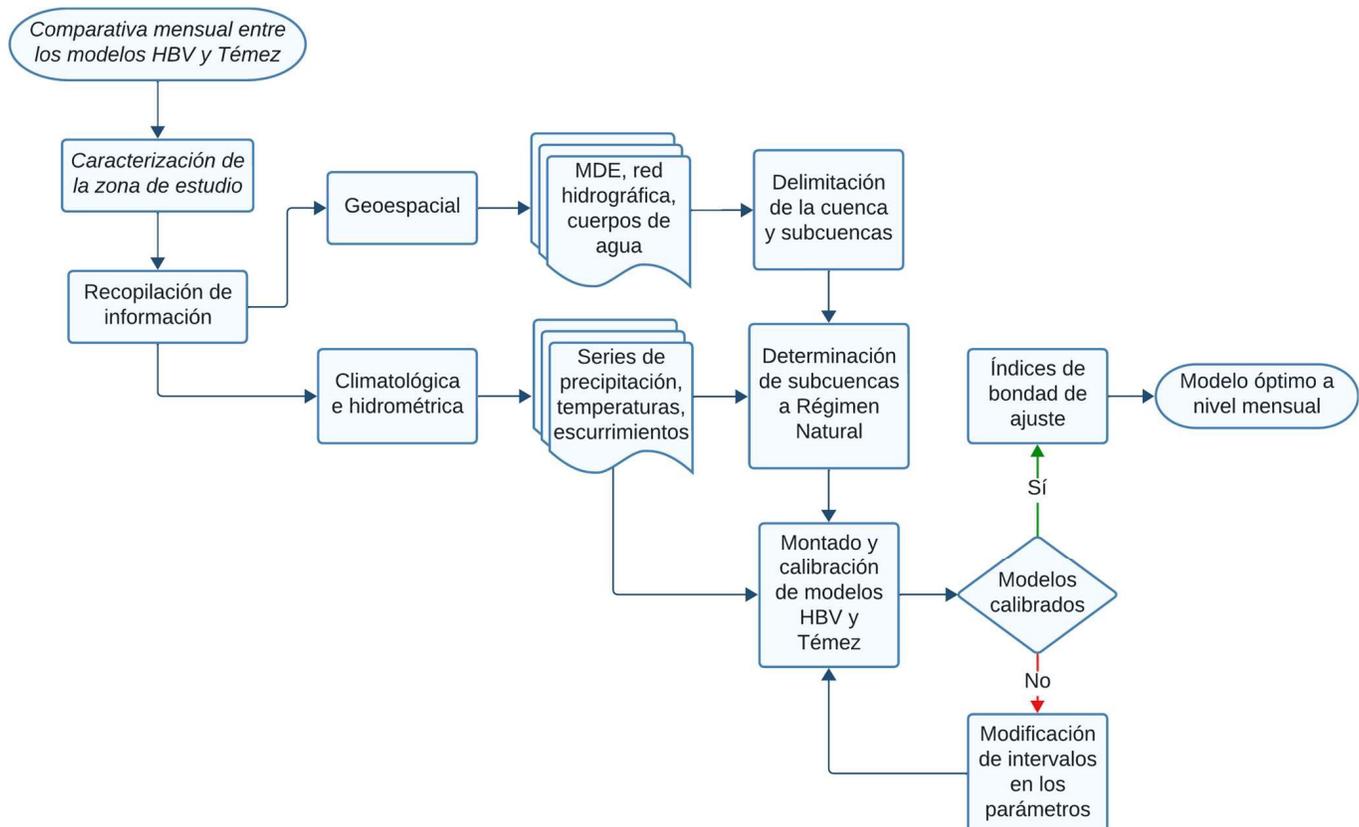


Figura 1. Metodología propuesta.

- a. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model V003 (NASA, 2018).
- b. Geografía y Medio Ambiente (INEGI, 2023).
- c. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB; CONABIO, 2023).

Procesamiento de información geoespacial

Los archivos se procesaron en Sistemas de Información Geográfica (SIG) los cuales se utilizaron para el procesamiento de datos vectoriales y ráster, permitiendo analizar capas como el modelo digital de elevación, redes hidrográficas, cuerpos de agua, etc. QGIS se empleó principalmente para la elaboración de mapas temáticos y representación gráfica de resultados.

Información climatológica

La obtención de información de las estaciones climatológicas se hizo a través de la base de datos de

Climate Computing Project (CLICOM) (CICESE, 2023) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se seleccionaron 64 estaciones climatológicas (**Figura 2**) dentro y fuera de la zona de estudio realizando un búfer de 20 km alrededor de la cuenca. El búfer se realizó con la finalidad de capturar las estaciones más cercanas a la cuenca de tal modo que tengan influencia en el sitio de interés. Los datos a recopilar de las estaciones climatológicas son de precipitación y temperatura.

Validación de estaciones climatológicas

Como parte del procesamiento de datos, se realizó la validación de la información de precipitación registrada en las estaciones meteorológicas. Esta debe ser representativa y precisa del lugar donde se mide, para ser utilizada de manera confiable en el análisis hidrológico y la gestión del recurso hídrico, las series utilizadas deben cumplir con dos propiedades: deben ser homogéneas e independientes (Li Juan y Zhong Wei, 2012).

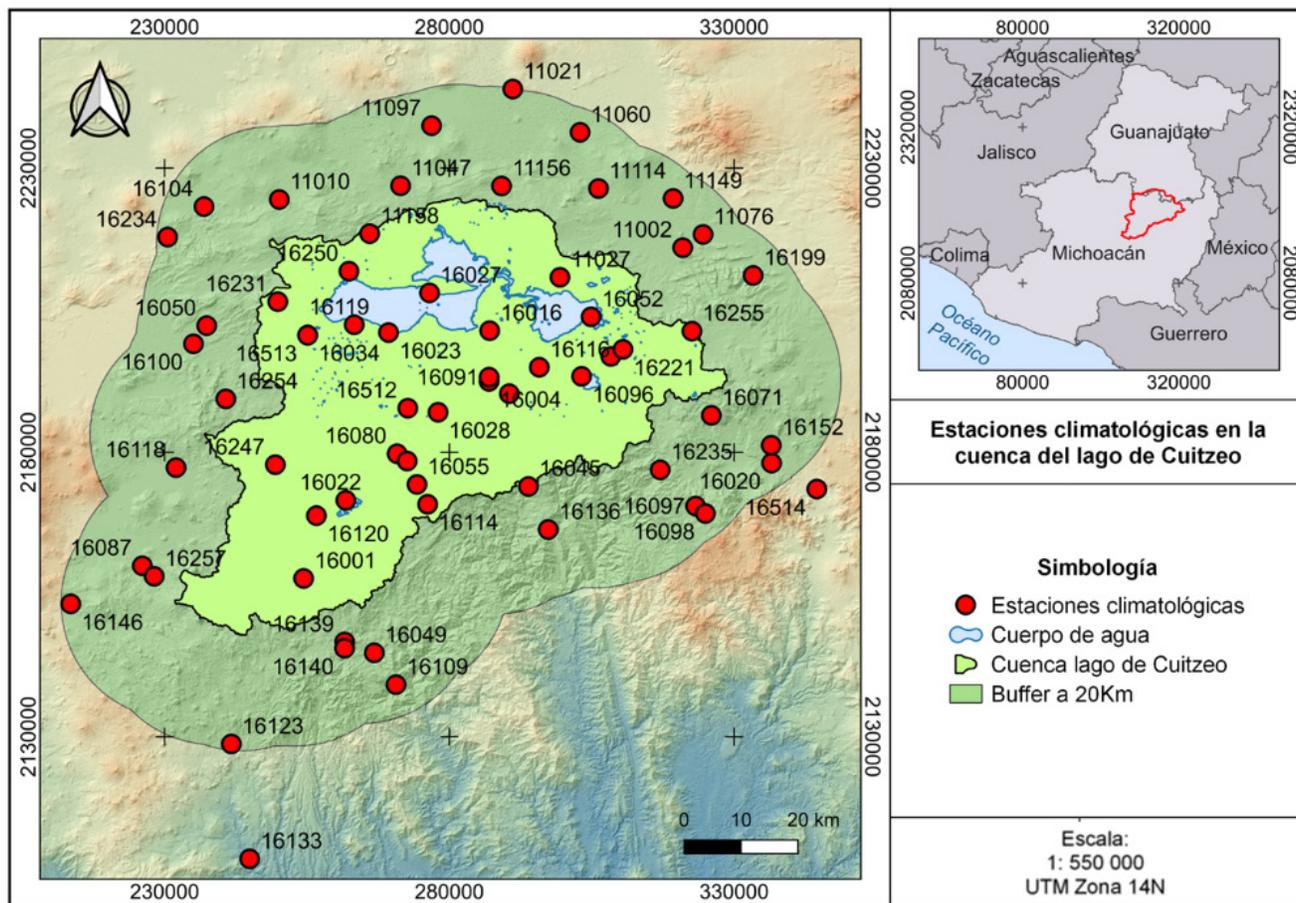


Figura 2. Estaciones climatológicas dentro y fuera de la zona de estudio.

Se validaron las 64 estaciones climatológicas a través de la metodología propuesta por Sánchez Quispe *et al.* (2021) para evaluar la calidad y cantidad de los datos, su homogeneidad e independencia a través de la aplicación de pruebas estadísticas para corroborar la consistencia de datos como lo son la prueba de Helmert, T-Student, Cramer, Wlad-Woldfowits y para determinar la independencia de los datos se aplicó la prueba de Límites de Anderson. Se pudo determinar que solo 16 estaciones climatológicas son adecuadas para utilizar sus datos por lo que se consideran estaciones principales para el estudio. Además, un criterio de selección fue que el registro histórico de las estaciones climatológicas coincidiera con las series históricas de las estaciones hidrométricas disponibles, el periodo abarca del año 1960 al 1990. De este modo, una vez que se ha garantizado la calidad de los datos y que dichas estaciones abarcan la zona de estudio, termina la etapa de la validación de la información.

Llenado de datos de las estaciones climatológicas principales

Se obtuvieron las series de precipitación (mm) y temperaturas mínimas, medias y máximas (°C) de las 16 estaciones climatológicas principales. Estas series presentan datos faltantes y se llenaron a través de los métodos matemáticos Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW) (Campos Aranda, 1998) el cual consiste en trasladar la información de una estación que cuenta con el dato faltante de otra ponderando el valor en función de la distancia en el caso de la precipitación y para las temperaturas se calculó la Media Aritmética dado que el valor de la temperatura no presenta variación drástica en el tiempo.

Obtención de la evapotranspiración potencial

La Evapotranspiración Potencial (ETP; mm), se calculó con las series de temperatura que se obtuvieron, para ello se utilizó el método de Hargreaves y Samani (1985), que es de escala diaria y cuenta con cuatro datos de entrada los cuales son: temperatura mínima, media, máxima y radiación solar extraterrestre definida como la cantidad de luz y calor que el sol envía a la tierra la cual es definida por tablas y se obtiene en función de la época del año y latitud de la estación climatológica. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración potencial en mm/día

T_{media} = Temperatura media diaria en °C

T_{max} = Temperatura máxima diaria en °C

T_{min} = Temperatura mínima diaria en °C

R_a = Radiación extraterrestre en mm/día

Información hidrométrica. Análisis y validación

Para obtener la información de las estaciones hidrométricas, se utilizó la base de datos del Banco Nacional de Datos de Agua Superficiales (BANDAS; CONAGUA, 2016). Se encontraron dentro de la delimitación de la cuenca 15 estaciones hidrométricas (**Figura 3**). De las 15 estaciones hidrométricas encontradas, se les aplicaron pruebas de consistencia de datos y un análisis visual siguiendo nuevamente la metodología propuesta por Sánchez-Quispe *et al.* (2021). Se determinó que solo tres estaciones hidrométricas se consideran a “régimen natural”, además de estar ubicadas en las subcuencas de cabecera de la cuenca. Estas estaciones hidrométricas se utilizaron como puntos de salida para generar las subcuencas tratadas en este estudio, las cuales son: Santiago Undameo, Queréndaro y Tarímbaro, los datos históricos de escurrimiento de estas estaciones se usaron para calibrar los modelos HBV y Témez y para el cálculo de los índices de bondad de ajuste de los modelos a nivel mensual.

Modelo precipitación-escurrimiento HBV

Uno de los modelos utilizados en el estudio es el modelo conceptual HBV (Bergström, 1995) del Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco, el cual es un modelo precipitación-escurrimiento de tipo agregado que consta de tres tanques o celdas principales que representan los procesos de humedad del suelo, humedad subsuperficial y humedad subterránea. El modelo opera a escalas temporales diaria, mensual y anual, cuenta con ocho parámetros que se definen en la **Tabla 1**, que requieren calibración y tres condiciones iniciales relacionadas con el contenido de agua en cada celda.

En la **Figura 4** se ilustran esquemáticamente las tres celdas del modelo HBV y las interacciones entre ellas que permiten calcular la escorrentía total combinando el

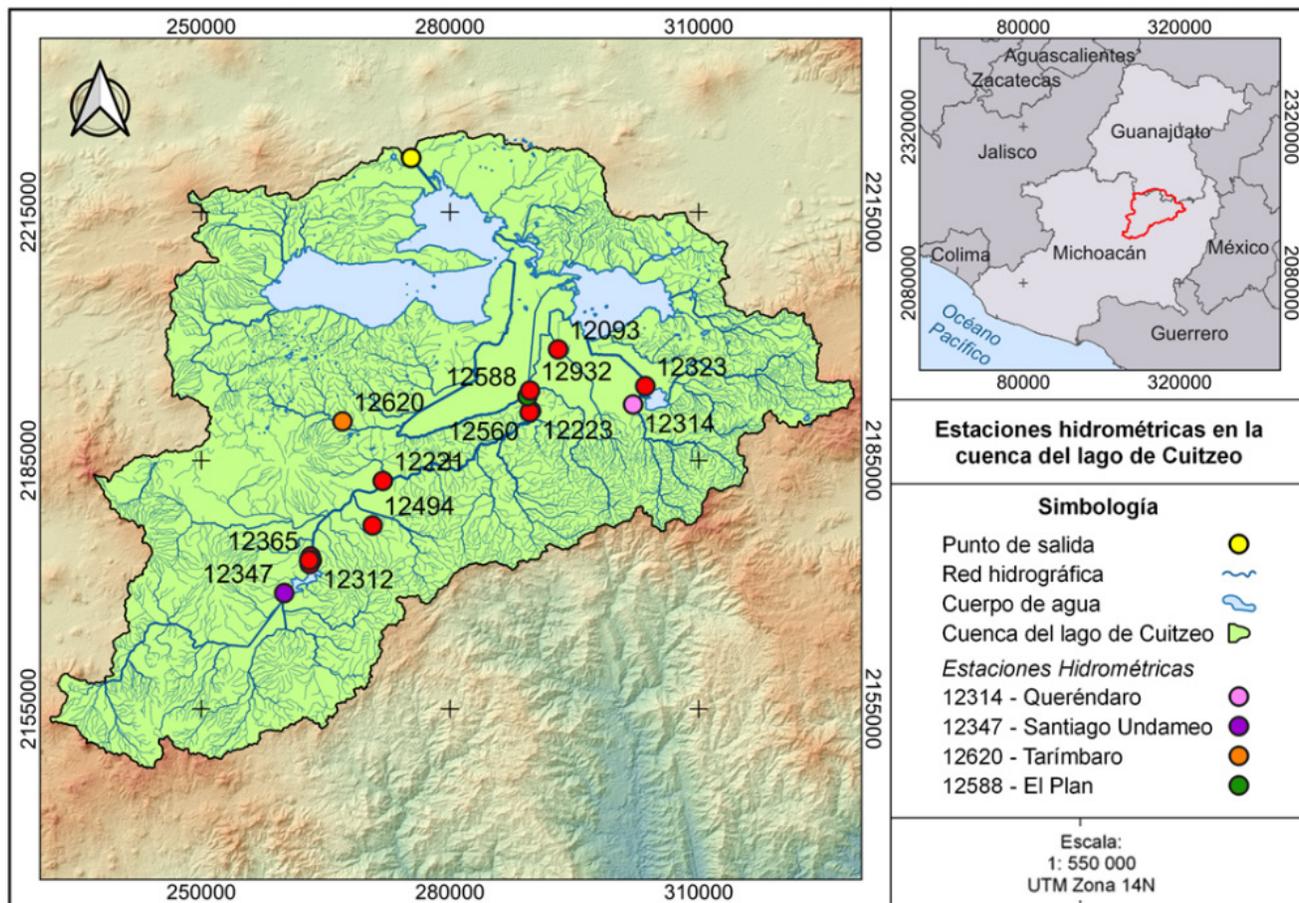


Figura 3. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

flujo superficial directo, el flujo rápido, el flujo lento y el flujo subterráneo.

Modelo precipitación-escorrentía Témez

El segundo modelo utilizado fue el de Témez (1977), de precipitación-escorrentía de tipo agregado, pero con una estructura más simplificada. Consta únicamente

de dos tanques o celdas principales que representan la humedad del suelo y el volumen almacenado en el acuífero (Figura 5). Cuenta con cuatro parámetros a calibrar y dos condiciones iniciales relacionadas con el contenido de agua en cada celda. Opera a escala mensual y anual, por lo que requiere menos datos de entrada y su calibración es menos compleja en comparación con el

Tabla 1. Descripción y valores probables de los parámetros del modelo HBV (Adaptado de Beck et al., 2016).

Parámetro (unidades)	Descripción	Min.	Max.
FC (mm)	Capacidad máxima de almacenamiento de humedad en la zona saturada	30	650
β (-)	Coefficiente de forma de la función de recarga (infiltración)	1	6
PWP (mm)	Valor de la humedad del suelo por encima del cual la evaporación real alcanza la evaporación potencial	30	650
Lmax (mm)	Umbral de descarga extra de la zona superior	0	100
K0 (día ⁻¹)	Coefficiente de descarga rápida en el depósito superior	0.001	1
K1 (día ⁻¹)	Coefficiente de recesión del depósito superior	0.001	1
Kperc (mm día ⁻¹)	Coefficiente de máxima percolación a la zona inferior	0.001	1
K2 (día ⁻¹)	Coefficiente de recesión del depósito inferior	0.001	1

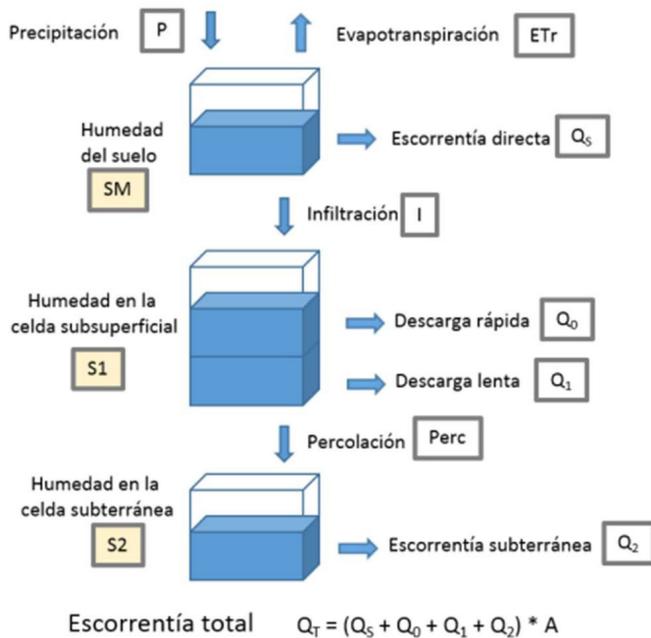


Figura 4. Esquema general del modelo HBV (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014).

modelo HBV. El modelo Témez podría tener ventajas en cuencas con escasez de datos.

Traslado de las series de datos

Tanto el modelo de Témez como el modelo HBV se aplicaron de forma semidistribuida en las tres subcuencas anteriormente mencionadas, es decir, las subcuencas se dividieron en microcuencas y se trasladaron por el método IDW las series de evapotranspiración y precipitación de las estaciones principales a los centroides de estas microcuencas (estaciones ficticias). La influencia de las estaciones principales sobre las microcuencas fue determinada mediante Polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911) ya que este método se aplica solo para conocer la influencia del área de la estación climatológica en el sitio de interés y resulta más sencillo de aplicar en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica.

EvalHid

Para calcular los escurrimientos de los modelos HBV y Témez se utilizó el software EvalHid (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014) de la Universidad Politécnica de Valencia, dicho software cuenta con una gran variedad de modelos de precipitación-escurrimiento (Témez, HBV, Sacramento, GR4J, GR2M y AWBM). El programa permite ingresar los datos de alimentación de los

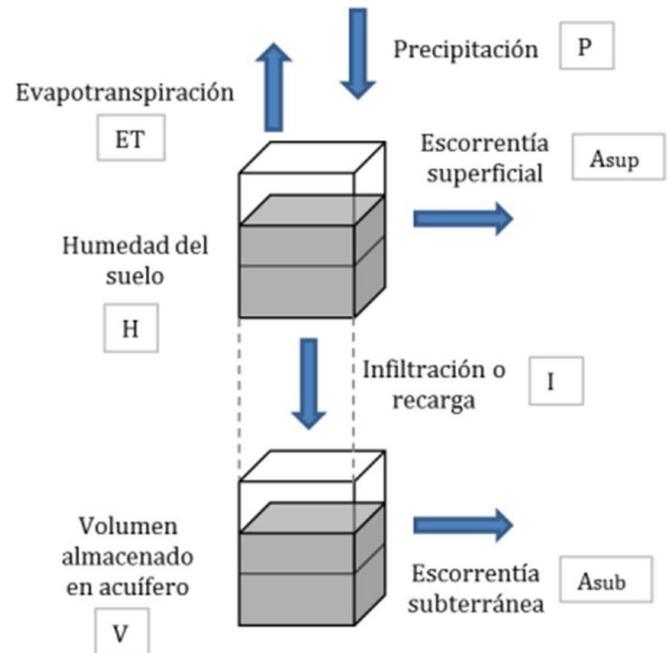


Figura 5. Esquema general del modelo de Témez (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014).

modelos (precipitación y evapotranspiración potencial) y los escurrimientos históricos de referencia a través de una hoja cálculo de Excel habilitada para macros, las series de precipitación y evapotranspiración potencial de las estaciones ficticias en las microcuencas fueron ingresadas de esta manera.

Calibrador para EvalHid

EvalHid solo permite realizar el cálculo y visualización de los escurrimientos de los modelos anteriormente mencionados, sin embargo, los parámetros de los modelos deben de ser ingresados de forma manual, por lo que fue necesario hacer uso del software Calibrador para EvalHid (CalEv) (García-Romero *et al.*, 2019) el cual usa para obtener los valores óptimos de dichos parámetros. Esta es una aplicación orientada a la optimización de los parámetros del modelo precipitación-escurrimiento a través de dos algoritmos de optimización: uno de búsqueda local con lanzamientos múltiples, y otro del tipo evolutivo. A través de una función objetivo (FO) compuesta por 4 índices estadísticos:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
- Logaritmo natural o neperiano del Coeficiente de

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (In NSE)
- Coeficiente de Correlación de Pearson (r)
- Coeficiente de Simetría de Medias (SM)

Estos algoritmos estiman el conjunto de parámetros óptimos que permiten que los caudales simulados sean estadísticamente similares a la serie de caudales aforados (García-Romero *et al.*, 2019).

Índices de bondad de ajuste

Los distintos parámetros obtenidos en CalEv de ambos modelos para las tres subcuencas estudiadas y las condiciones iniciales supuestas se ingresaron en EvalHid y se simularon los escurrimientos, a su vez se evaluaron contra 4 índices de bondad de ajuste a nivel mensual: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Logaritmo de Nash-Sutcliffe (In NSE), Correlación de Pearson (r) y Coeficiente de Simetría de Medias (SM). Los índices de bondad de ajuste son los encargados

de determinar numérica y estadísticamente que tan similares son los escurrimientos simulados contra los históricos. El mejor valor de ajuste de los cuatro índices es la unidad.

Resultados y discusión

A través del procesamiento en los sistemas de información geográfica del modelo digital de elevaciones, y con apoyo de la red hidrográfica y cuerpos de agua, se realizó la delimitación de la cuenca del lago de Cuitzeo (**Figura 6**). Con la delimitación propuesta, la cuenca tiene un área total de 3933.06 km² y un perímetro de 425.32 km.

La **Figura 7** muestra espacialmente las delimitaciones de las tres subcuencas estudiadas con los modelos HBV y Témez en la cuenca del lago de Cuitzeo. Los puntos de salida son las estaciones hidrométricas 12347-Santiago Undameo, 12314-Queréndaro y 12620-Tarímbaro, las cuales se encuentran en la cabecera de la cuenca y están a régimen natural.

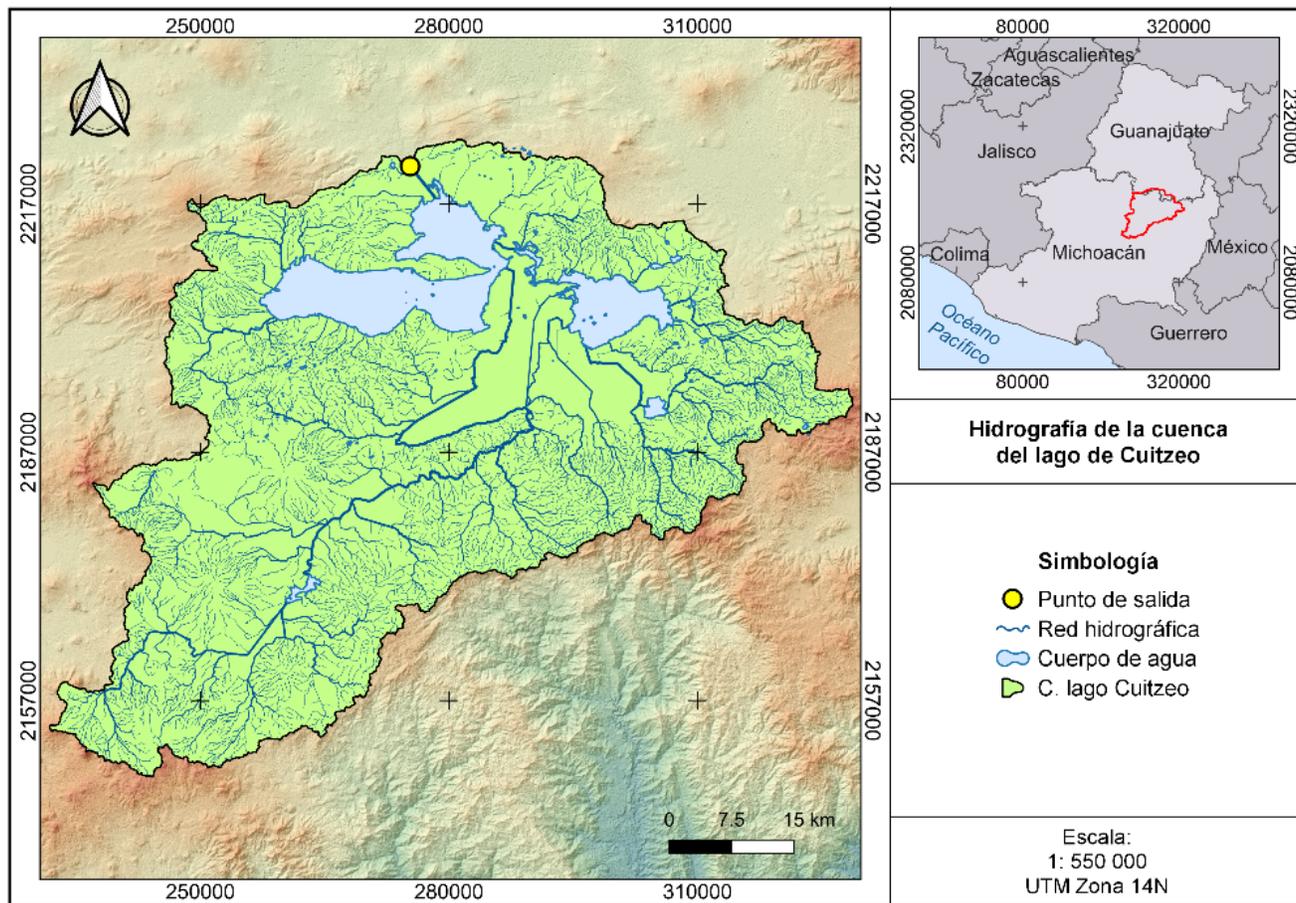


Figura 6. Delimitación de la cuenca del lago de Cuitzeo.

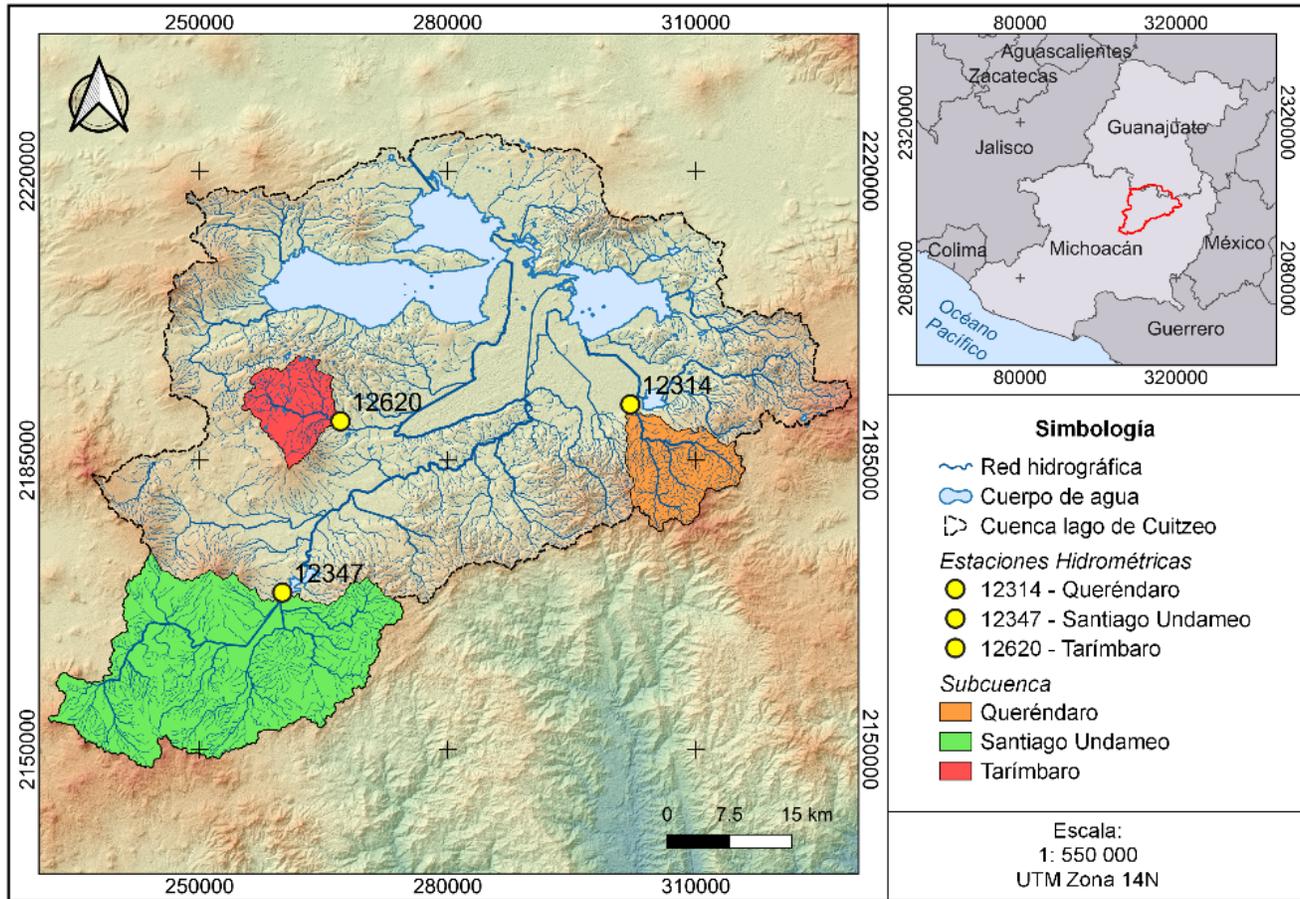


Figura 7. Subcuencas a régimen natural en la cuenca del lago de Cuitzeo.

La **Figura 8** representa de forma gráfica el traslado de las series de precipitación y evapotranspiración potencial a los centroides de las microcuencas de Santiago Undameo por los métodos IDW y Polígonos de Thiessen, este proceso fue realizado de forma similar para las dos subcuencas restantes.

En la **Tabla 2** se muestran los ocho parámetros óptimos del modelo HBV obtenidos con el software CalEv en las tres subcuencas, se puede observar que varían significativamente entre sí, ya que

las condiciones hidrológicas son distintas, debido a las diferentes características como el área, la precipitación media anual, los usos y los tipos de suelo, así como la

cobertura vegetal.

La **Tabla 3** establece las condiciones iniciales supuestas de las tres celdas del modelo HBV que obtuvieron los mejores índices de bondad de ajuste en la calibración.

En la **Tabla 4** se indican los valores óptimos de los cuatro parámetros y las condiciones iniciales de las dos celdas del modelo de Témez en las tres subcuencas, como es de esperarse y tal como en el modelo HBV, los parámetros son muy distintos entre sí por las razones ya comentadas.

Cabe destacar que algunos parámetros como el Factor de Campo (FC) del modelo HBV y la Capacidad Máxima

Tabla 2. Parámetros óptimos del modelo HBV en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	Beta	FC (mm)	PWP (mm)	Lmax (mm)	K0	K1	K2	Kperc
Santiago Undameo	1.372	797.251	156.712	0.400	0.067	0.067	0.005	0.067
Queréndaro	0.755	998.967	198.197	85.029	0.229	0.124	0.056	0.479
Tarimbaro	3.408	355.571	276.859	13.192	0.636	0.299	0.001	0.065

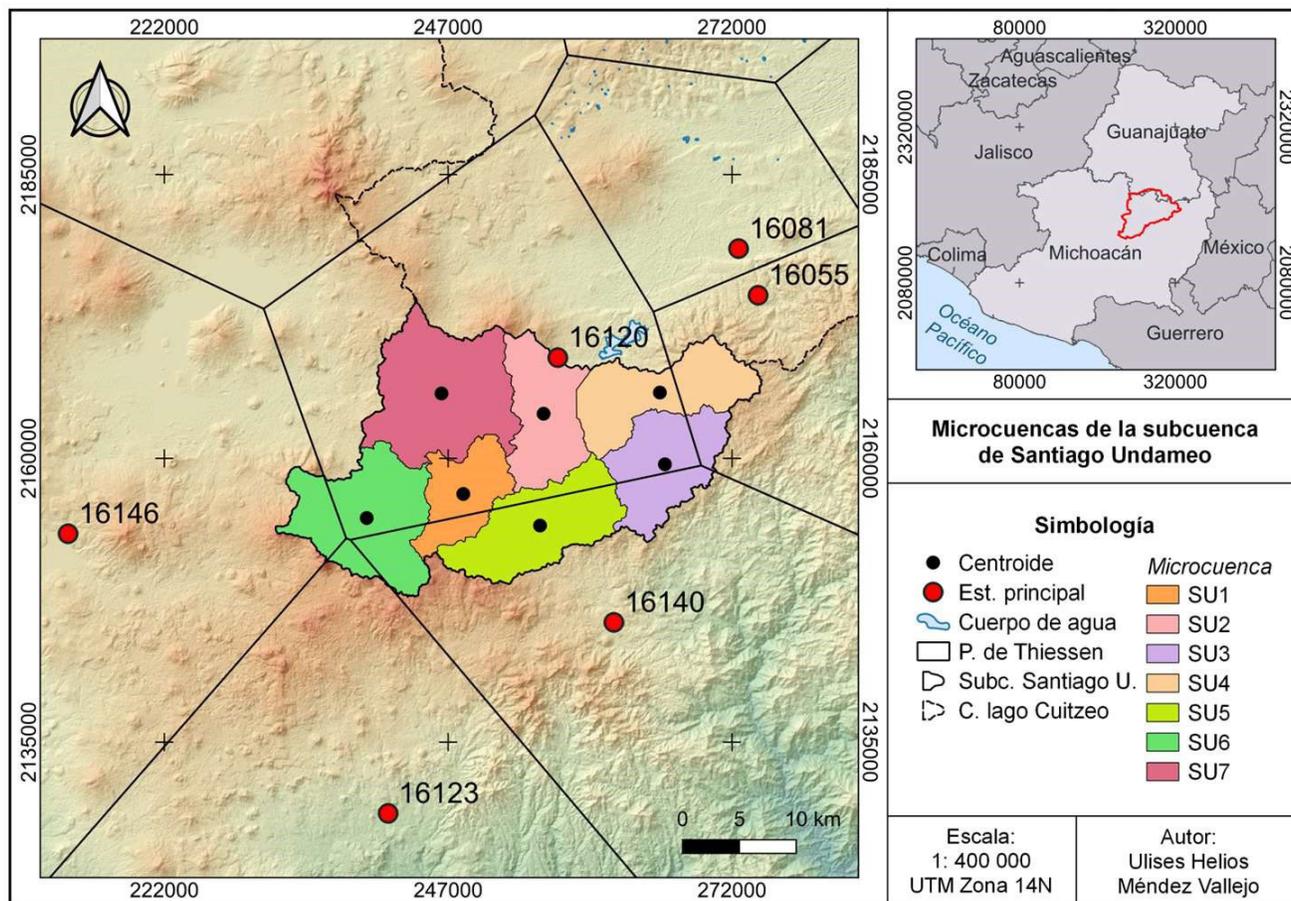


Figura 8. Polígonos de Thiessen en la subcuenca de Santiago Undameo.

de Almacenamiento del Suelo (Hmax) del modelo de Témez rebasaron los límites probables de la literatura, sin embargo, en un modelo calibrado, los parámetros pueden rebasar los límites (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014). Es importante no rebasar en gran medida estos parámetros ya que esto indica un sobreajuste que no representa las condiciones físicas e hidrológicas de la cuenca modelada. Tras calibrar y validar ambos modelos en las subcuencas, se simularon los escurrimientos, sin embargo, no es posible compararlos ya que están a diferente escala temporal. Para lograr la comparación se acumularon los escurrimientos diarios del modelo HBV

Tabla 3. Condiciones iniciales en las celdas del modelo HBV en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	H0 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
Santiago Undameo	40	1.50	75
Queréndaro	0	0	0
Tarímbaro	50	1	100

para conseguir la escala mensual y se compararon con los escurrimientos mensuales del modelo de Témez y a su vez con los escurrimientos mensuales históricos, es decir, se comparan los escurrimientos mensuales de ambos modelos contra los escurrimientos observados para determinar la calidad de la modelación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9.

Los índices de bondad de ajuste mostrados en la Tabla 5 indican que el modelo HBV representó mejor los escurrimientos en las tres subcuencas, siendo la de Santiago Undameo donde tuvo un mejor ajuste, seguido de Queréndaro y Tarímbaro. Esto se observa gráficamente en la Figura 9, donde el modelo HBV se ajusta mejor a los caudales grandes y pequeños en comparación con el modelo de Témez. Lo anterior se refuerza con los índices NSE y ln NSE, que tienen sensibilidad a caudales altos y bajos respectivamente. Aunque en algunos meses húmedos el modelo HBV tiende a sobreestimar los escurrimientos, mientras que

Tabla 4. Parámetros óptimos y condiciones iniciales del modelo Témez en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	Parámetros				Condiciones iniciales	
	Hmax (mm)	C	Imax (mm)	Alfa	H0 (mm)	V0 (mm)
Santiago Undameo	499.993	0.121	110.318	0.331	40	80
Queréndaro	289.431	0.06	998.688	0.99	0	0
Tarímbaro	366.885	0.1	53.907	0.436	0	0

Tabla 5. Índices de bondad de ajuste de los modelos HBV y Témez en las subcuencas a régimen natural.

Índice de bondad de ajuste	HBV			Témez		
	Santiago U.	Queréndaro	Tarímbaro	Santiago U.	Queréndaro	Tarímbaro
NSE	0.85	0.58	0.58	0.74	0.48	0.45
ln NSE	0.83	0.62	0.47	0.72	0.65	0.37
r	0.93	0.77	0.76	0.86	0.72	0.67
SM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Promedio	0.90	0.74	0.70	0.83	0.71	0.62

el modelo de Témez los sobreestima notoriamente en meses secos. No obstante, el modelo de Témez es mucho más sencillo de implementar al ser de escala mensual, requiere considerablemente menos datos y la mitad de los parámetros, ofreciendo resultados muy cercanos al modelo HBV.

De acuerdo con los criterios de calidad de ajuste de Moriasi *et al.* (2007) de la **Tabla 6** basados en el índice NSE, el modelo HBV para la subcuenca de Santiago Undameo se considera «Muy Bueno», mientras que en las subcuencas de Queréndaro y Tarímbaro ambos modelos son «Satisfactorios». En cuanto al modelo de Témez, en Santiago Undameo es «Bueno», pero en Queréndaro y Tarímbaro es «No Satisfactorio». Sin embargo, para este caso se utilizó el promedio de los índices de calidad de ajuste dado que el uso de un promedio de varios métodos puede proporcionar una estimación general. No obstante, si se requiere mayor certeza de la calidad de los datos se puede proponer un promedio ponderado dándole mayor peso a aquel índice de calidad de ajuste que sea más representativo. Se determina que la evaluación de

ambos modelos mejora considerablemente en todas las subcuencas.

Conclusiones

Con base en los índices de bondad de ajuste calculados a partir de todas las simulaciones realizadas a escala mensual, se observó que el modelo HBV representa los caudales pequeños y grandes de manera más precisa, acercándose mejor a la media de escurrimientos. No obstante, el modelo HBV tiende a sobrestimar los caudales en algunos meses húmedos, mientras que el modelo de Témez sobreestima notablemente los escurrimientos en los meses secos.

En general, ambos modelos sobreestiman los escurrimientos, aunque el modelo HBV lo hace en menor medida que el modelo de Témez. Esta diferencia se debe a la falta de información de precipitación, lo cual obliga a generar información sintética para lograr series continuas. A pesar de ello, los resultados obtenidos son útiles cuando se dispone de poca información. La metodología propuesta es una solución que requiere pocos recursos económicos, materiales, humanos y tecnológicos, por lo que la aplicación de un modelo de precipitación en zonas con escasa información resulta eficaz para la evaluación de los recursos hídricos, a falta de métodos que consideren menos variables de análisis y que generalicen el fenómeno del ciclo hidrológico.

Los puntos mencionados anteriormente indican que el modelo HBV es más eficaz que el modelo Témez a

Tabla 6. Calidad de ajuste para el índice Nash-Sutcliffe (NSE) (Adaptado de Moriasi *et al.*, 2007).

Calidad de Ajuste	NSE
Muy Buena	$0.75 < NSE \leq 1$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No Satisfactoria	$NSE \leq 0.50$

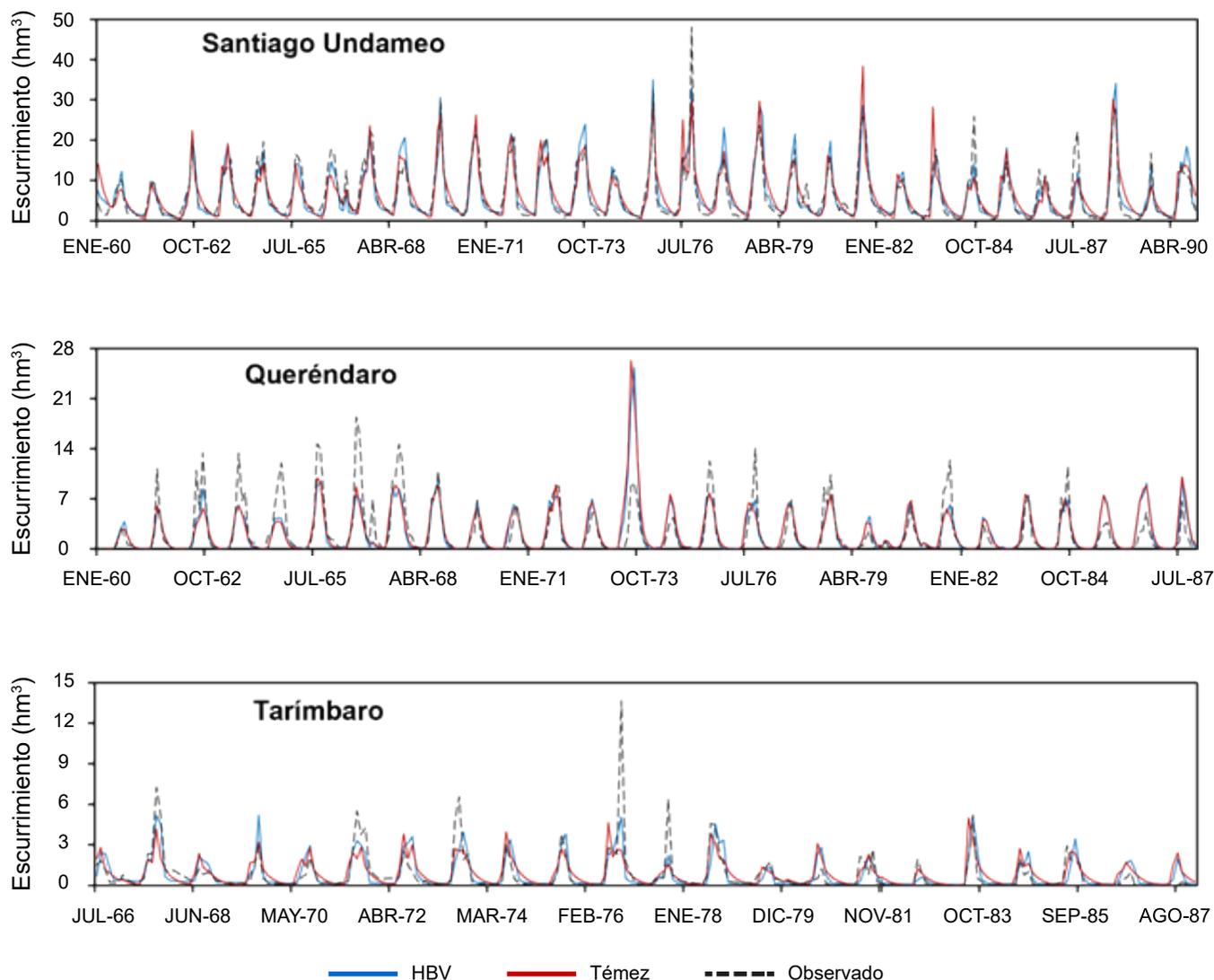


Figura 9. Ecurrimientos mensuales en las subcuencas a régimen natural.

escala mensual. Esto se explica porque el modelo HBV se calcula a escala diaria y fue acumulado mensualmente para poder compararlo con el modelo Témez, que se calcula de forma mensual. Esta diferencia en las escalas influye en que los escurrimientos mensuales grandes y pequeños sean mejor representados, al igual que la cantidad media de agua escurrida. Sin embargo, es importante recalcar que estos resultados se obtuvieron en la cuenca del lago de Cuitzeo en las subcuencas estudiadas y con el criterio del modelador, por lo que esta regla puede no cumplirse siempre en otras cuencas debido a las condiciones hidrológicas y a las experiencias de los modeladores. No obstante, esta metodología es una propuesta que genera recomendaciones para el

objetivo de análisis y de trabajo de otros modeladores.

En cuanto a los procesos realizados para la creación de los modelos precipitación-escurrimiento, se pudo determinar que el modelo Témez es más fácil y rápido de realizar, así como de calibrar, ya que cuenta con solo cuatro parámetros y dos condiciones iniciales. La cantidad de datos necesarios para alimentar el modelo Témez es mucho menor, aproximadamente 30 veces menos cantidad de datos en un modelo a escala mensual en comparación con un modelo a escala diaria. En cuanto a la recopilación de información, no hubo diferencias, ya que la información de las estaciones climatológicas es de escala diaria. Con respecto a la validación de datos a través de pruebas estadísticas, no hubo diferencias, ya

que estas se realizan a nivel anual. Para el llenado de datos faltantes, resulta mucho más fácil hacerlo a escala mensual, ya que a escala diaria estos faltantes son mucho más numerosos y, por lo tanto, se complica su llenado.

En conclusión, la escala temporal influye en la determinación de los escurrimientos simulados; un modelo a escala diaria proporciona mejores resultados a nivel mensual y, por lo tanto, a nivel anual, en comparación con un modelo a escala mensual. Se recomienda utilizar el modelo HBV en caso de que el estudio requiera una mayor precisión en la simulación de escurrimientos, es decir, cuantificar de manera precisa los escurrimientos pequeños, grandes y el promedio con el fin de lograr una gestión óptima de los recursos hídricos, recordando que este tipo de modelos no se utilizan para estimar eventos extremos o de riesgo. Sin embargo, la diferencia no es tan significativa en comparación con el modelo Témez, que también ofrece buenos resultados. Por lo tanto, si el estudio no requiere de precisión, por ejemplo, para una cuantificación de recursos hídricos, es conveniente usar el modelo Témez, ya que no vale la pena el tiempo, la dificultad y la cantidad de información que requiere un modelo a escala diaria solo por esa precisión adicional que ofrece.

Referencias

Bergström S (1995). The HBV Model, in: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 443–476 pp.

Campos-Aranda DF (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, México: Editorial Universitaria Potosina.

CICESE “Base de Datos Climatológica Nacional” (2023). Sistema CLICOM, <http://clicomex.cicese.mx/> [consultado el 12 de marzo de 2023].

CONABIO “Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad” (2023). Portal de Geoinformación 2023, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [consultado el 12 marzo de 2023].

CONAGUA “Bases de Datos Hidrométricas” (2023). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>, [consultado el 12 de marzo de

2023].

García-Romero L, Paredes-Arquiola J, Solera-Solera A, Palop-Donat C (2019). “Herramienta para la calibración de modelos precipitación-escorrentía en cuencas altamente reguladas”, VI Jornadas de Ingeniería del Agua: JIA 2019, <https://www.hidralab.com:4430/jia2019/wpcontent/uploads/2019/10/R116.pdf> [consultado el 12 de marzo de 2023].

Hargreaves GH, Samani ZA (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96-99. doi:10.13031/2013.26773.

INEGI “Geografía y Medio Ambiente” (2023). Temas, <https://www.inegi.org.mx/temas/> [consultado el 12 de marzo de 2023].

Li CJ, Zhong WY (2012). Progress in research on homogenization of climate data. *Advances in Climate Change Research* 3(2):59–67. doi:10.3724/SP.J.1248.2012.00059.

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Binger RL, Harmel RD, Veith TL (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900. doi:10.13031/2013.23153.

NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team (2018) ASTER Global Digital Elevation Model V003: distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/ASTER/ASTGTM.003.

Paredes-Arquiola J, Solera-Solera A, Andreu-Álvarez J, Lerma-Elvira N (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf [consultado el 12 de marzo de 2023].

Sánchez-Quispe ST, Navarro-Farfán M del M, García-Romero L (2021). Methodology for processing meteorological and hydrometric data at basin level: Handbook T-XVI CIERMMI Women in Science Engineering and Technology. pp 107-157. doi:10.35429/H.2021.16.107.145.

Témez JR (1977). Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. 39 pp.

Thiessen AH (1911). Climatological data for July 1911. District no. 10, Great Basin. *Monthly Weather Review* 39:1082-1084.