

Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrentamiento HBV

Surface hydrological modeling of the tributary basin of hydrometric station 12378 in Aguascalientes, Mexico using the HBV precipitation-runoff model

Roxana Nicté-Há Hughes Lomelín, Sonia Tatiana Sánchez Quispe*, Liliana García Romero

Para citar este artículo: Hughes Lomelín RN, Sánchez Quispe ST*, García Romero L (2024). Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrentamiento HBV. *Ciencia Nicolaita* 90: 86-94.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.738>

Historial del artículo



Recibido: 16 de agosto de 2023

Aceptado: 31 de enero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



*Correspondencia de autor: quispe@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escurrimiento HBV

Surface hydrological modeling of the tributary basin of hydrometric station 12378 in Aguascalientes, Mexico using the HBV precipitation-runoff model

Roxana Nichte-Há Hughes Lomelín¹, Sonia Tatiana Sánchez Quispe^{2*}, Liliana García Romero²

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Química

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil

Resumen

El modelado hidrológico superficial es una herramienta fundamental en el estudio de la hidrología, ya que permite una mejor comprensión del comportamiento, propiedades y características de sistemas hidrológicos; a través de la simulación de estos modelos se puede analizar cómo los cambios en particularidades y parámetros de cada sistema afectan a los fenómenos hidrológicos. En este trabajo se modela la cuenca tributaria de la estación hidrométrica con ID 12378 ubicado por la Presa Plutarco Elías Calles en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación – escurrimiento Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning (HBV). Se usan las series de precipitación y temperaturas proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, y los escurrimientos resultantes del modelo se comparan con las series de caudales medidos en esta estación disponible en el BANDAS del CONAGUA, para poder determinar sus índices de bondad de ajuste con respecto a la literatura y determinar la robustez del modelo, para poder asegurar que simulaciones futuras concuerdan con un elevado grado de confianza con lo que podría pasar en la realidad.

Palabras clave: Modelo hidrológico, modelo HBV, Aguascalientes

Abstract

Superficial hydrological modelling is a fundamental tool in the study of hydrology, allowing a better comprehension of hydrological system behaviours, properties, and characteristics; through the simulation of these models, the analyst can determine how changes to the particularities and parameters of each system affect hydrological phenomena. In this paper, the tributary basin to the hydrometric station with ID 12378, located by the Calles Dam in Aguascalientes, Mexico, is modelled using the HBV model. The precipitation and temperature series are obtained from the National Meteorological Service, and the resulting runoffs are compared to the series of measured runoffs by this station, which is available in the BANDAS by CONAGUA, to determine the model's evaluation statistics according to the existing literature and determine the model's robustness, assuring in this manner that future simulations correspond by a high degree of confidence with what may really happen.

Keywords: Hydrological model, HBV model, Aguascalientes

Introducción

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en el estudio de la hidrología, ya que permite obtener una mejor comprensión del comportamiento, las características y las propiedades de un sistema hidrológico. También, se puede analizar la influencia que ejerce la alteración de las condiciones hidrológicas del sistema en los fenómenos hidrológicos (González-Mendoza, 2016). Mediante la simulación de la representación simplificada del sistema, se puede estimar, predecir y analizar eventos futuros que pudieran ocurrir, de tal forma reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones dentro de la gestión de los recursos hídricos.

El modelo HBV (Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1976; Lindström *et al.*, 1997) es un modelo conceptual y agregado que ha sido utilizado ampliamente en el estudio del balance hídrico, dado que es un modelo robusto con una estructura simple y pocos parámetros (Paredes *et al.*, 2014). El modelo promedia los diferentes parámetros y valores de entrada para cuencas pequeñas. La **Figura 1** representa esquemáticamente los procesos e interacciones hidrológicas simulados por el modelo HBV.

La versión del modelo utilizado (módulo HBV de la herramienta Evaluación de los Recursos Hídricos EvalHid; (Paredes *et al.*, 2011) requiere como variables de entrada, la precipitación mensual acumulada y evapotranspiración potencial (ETP).

Contempla el ajuste de ocho parámetros que influyen en la transferencia de agua entre las diferentes celdas (superficial, subsuperficial y subterránea) que simula. En la celda superficial, se tiene: β (adim), que controla la cantidad de agua que contribuye al escurrimiento superficial dado

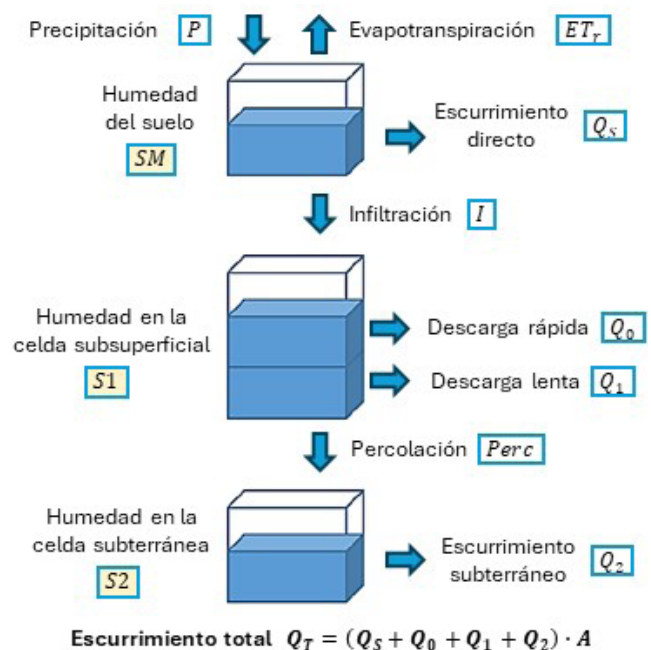


Figura 1. Diagrama que muestra el funcionamiento del modelo HBV y los flujos y almacenamiento del agua entre sus diferentes fases (celdas). Modificado de Paredes *et al.* (2014).

un déficit en la humedad del suelo; FC (mm), el cual define la capacidad de almacenamiento de agua máxima del suelo; y PWP (mm), que proporciona el punto de marchitez del suelo, influyendo en la evapotranspiración del sistema. L_{max} (mm) es la cantidad mínima del agua que puede almacenar el suelo antes de escurrir subsuperficialmente (en la celda subsuperficial); este escurrimiento es regulado por dos coeficientes adimensionales, K_0 y K_1 , dependiendo si la descarga del gasto es rápida o lenta, respectivamente. Esta celda presenta una salida más a través del proceso de percolación del agua, controlado por K_{perc} (adim). Con respecto a la celda subterránea, se tiene el escurrimiento subterráneo, limitado por K_2 (adim). El escurrimiento total del sistema, por tanto, está dado por la suma de los escurrimientos presentes en las tres celdas simuladas.

El modelo debe someterse a un proceso de calibración, a través del cual los parámetros del modelo se ajustan de tal manera que los datos simulados por el modelo se aproximen lo más estadísticamente posible a los datos medidos. Idealmente, también se realiza una validación, que es comparar una serie de datos simulados en otro periodo contra los datos medidos del mismo. Es importante mencionar que la validación no se debe hacer durante el mismo periodo que se usó para la calibración. Los parámetros se manipulan con base en el rendimiento del modelo, descrito por medio de índices de bondad de ajuste. Estos índices son coeficientes estadísticos que representan la similitud estadística de las dos series (observadas vs. simuladas). Los índices de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y su logaritmo ($\ln N$) determinan la magnitud relativa entre la varianza residual (ruido) comparada con la varianza de los datos medidos, indicando el ajuste que presentan los valores observados graficados con respecto a los datos simulados con respecto a la recta 1:1 (Moriasi *et al.*, 2007). NSE es más sensible a los valores altos mientras que $\ln N$ es más sensible a los valores bajos. El coeficiente de correlación de Pearson (R) describe a su vez el grado de

colinealidad entre las dos series de datos (Moriasi *et al.*, 2007). El coeficiente de simetría indica lo parecido que son las medias de las dos series. La **Tabla 1** resume los índices recomendados por la literatura para modelos hidrológicos (Moriasi *et al.*, 2007; Moriasi *et al.*, 2015) y sus rangos indicativos de calidad, mismos que se implementan en este trabajo.

El acuífero Valle de Aguascalientes se ubica en la parte central del estado de Aguascalientes, México. Tiene una superficie de 3,129 km². El acuífero, definido con la clave 0101 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, pertenece a la Región Hidrológica-Administrativa (RHA) VIII "Lerma-Santiago-Pacífico". El clima prevalente en la zona es semiseco, con temperatura media de 17 °C, una precipitación media anual de 510 mm y evaporación potencial de 2010 mm (CONAGUA, 2020).

Para elegir una estación hidrométrica (EH) del cual obtener datos que servirán como punto de comparación de un modelo hidrológico, se debe verificar que se encuentra a régimen natural (el flujo de agua que circula por los cauces no esté afectado por actividades de origen antrópico), de acuerdo con la metodología propuesta por Sánchez-Quispe *et al.* (2021). Idealmente, si el régimen que presenta una EH es alterado, se debería realizar una restitución a régimen natural; sin embargo, en México no se dispone de la información necesaria para realizar dicha restitución, por lo que, para garantizar hasta cierto punto el estado inalterado del caudal, la estación elegida debe situarse en la cabecera de la cuenca.

Este trabajo aplica el modelo HBV a una cuenca de cabecera tributaria de la EH 12378 (**Figura 2**), localizada por la Presa Calles en Aguascalientes, México. Esta cuenca servirá como base de calibración para un modelado mayor de toda la zona del acuífero.

Tabla 1. Calidad de índices de bondad de ajuste.

| Calidad | NSE | $\ln N$ | R | Simetría |
|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Muy buena | $0.75 < x \leq 1.00$ | $0.75 < x \leq 1.00$ | $0.90 < x \leq 1.00$ | $0.75 < x \leq 1.00$ |
| Buena | $0.65 < x \leq 0.75$ | $0.65 < x \leq 0.75$ | $0.75 < x \leq 0.90$ | $0.65 < x \leq 0.75$ |
| Satisfactoria | $0.50 < x \leq 0.65$ | $0.50 < x \leq 0.65$ | $0.50 < x \leq 0.75$ | $0.50 < x \leq 0.65$ |
| Insatisfactoria | $x \leq 0.50$ | $x \leq 0.50$ | $-1.00 < x \leq 0.50$ | $x \leq 0.50$ |

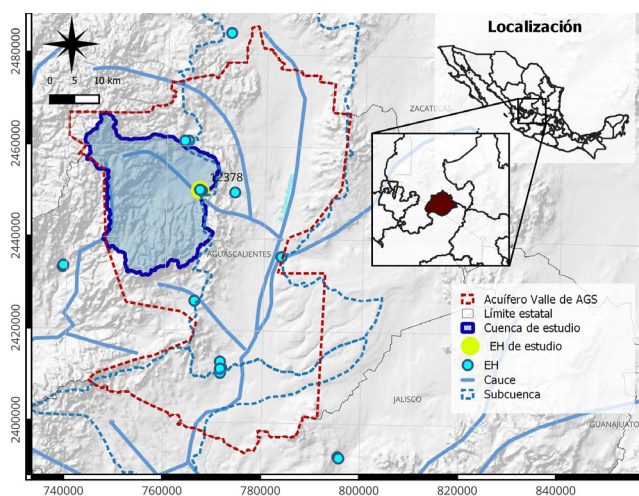


Figura 2. Ubicación de la cuenca de estudio.

Desarrollo

La información hidrométrica y meteorológica se encuentra en las bases de datos de las estaciones ubicadas en o alrededor de la zona de estudio; estas bases de datos son manejadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) y la CONAGUA (2016).

Se realiza una primera selección de EHs con base en su ubicación espacial; se les aplican pruebas estadísticas para determinar el comportamiento de sus datos (pruebas de Secuencias y Helmer para determinar homogeneidad y límites de Anderson al 95% para probar su independencia) y se definen coeficientes específicos que describen el caudal medido, con base en la metodología de Sánchez-Quispe *et al.* (2021). El módulo relativo Mr representa el escurrimiento en litros por segundo (lps) unidad de área de cuenca; por su parte, el coeficiente de escurrimiento Ce es la razón entre el volumen escurrido y el volumen precipitado en la cuenca. Una vez seleccionada la EH adecuada, se genera la cuenca utilizando la herramienta GRASS en el software de QGIS (GRASS Development Team, 2017).

Las series de entrada del modelo de precipitación y evapotranspiración potencial (calculada a partir de las series de temperatura) se encuentran en las estaciones meteorológicas (EM). Al igual que las EH, se requiere realizar un filtrado para determinar cuáles estaciones proveen la información más adecuada para el modelado. Se hace un primer filtrado con base en su distancia geográfica a la zona de estudio, su porcentaje de vacíos, sus años de servicio y el periodo de servicio. Las

series de precipitación y temperatura deben concordar temporalmente con la serie de caudales observados para lograr comparar la serie de escurrimiento resultante del modelo, para después calibrarlo. Las EM también se validan estadísticamente mediante la metodología de Sánchez-Quispe *et al.* (2021) para determinar su homogeneidad e independencia, usando las pruebas de Secuencias y Helmer y la prueba de los límites de Anderson, respectivamente. Si las pruebas para la homogeneidad resultan inconclusas, se aplican pruebas más específicas, como la de T-Student y la de Cramer (Sánchez-Quispe *et al.*, 2021).

A partir de los datos validados se obtiene la serie de precipitación y se calcula la serie de ETP con el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) utilizando las temperaturas medias mensuales obtenidas de la base de datos del SMN (2021).

El modelo HBV se genera en el módulo informático EvalHid. El modelo resultante se calibra con base en los datos hidrométricos de la EH 12378, garantizando la precisión de los datos simulados para que futuras simulaciones representen el sistema real de manera fiable. Idealmente, se realiza también la validación, para aumentar la confianza en los datos simulados. Sin embargo, se deja a criterio del modelador, puesto que, dependiendo del comportamiento o incluso de la cantidad de datos disponibles, puede no ser factible calibrar y validar el modelo (Hughes-Lomelín *et al.*, 2022a). Los parámetros del modelo se ajustan con base en la calidad de los índices de bondad de ajuste (**Tabla 1**).

Resultados

Después de seleccionar espacialmente las EH y aplicarles las pruebas estadísticas, se eligieron las estaciones hidrométricas mostradas en la **Figura 3**. La estación de cabecera, 12378, se propuso como la estación de calibración y se generó la cuenca mostrada en la **Figura 2**. La **Tabla 2** muestra los coeficientes y resultados de las pruebas aplicadas a la EH 12378.

De acuerdo con Sánchez-Quispe *et al.* (2021), los valores de los coeficientes de la **Tabla 2** significan que la serie de caudales observados de la EH 12378 no son fiables para la modelación, puesto que se busca que el Mr se encuentre entre los 3 y los 15 lps/km², aunque Ce cumple al ser menor que

Tabla 2. Resultados de las pruebas estadísticas y coeficientes de comportamiento de la EH 12378. Los datos que resultan menos que adecuados se señalan en cursiva.

| Clave | Mr (lps/km ²) | Ce (adim) | Secuencias | Helmert | Persistencia |
|-------|-----------------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------|
| 12378 | 1.835 | 0.116 | <i>No homogénea</i> | <i>No homogénea</i> | Persistente |

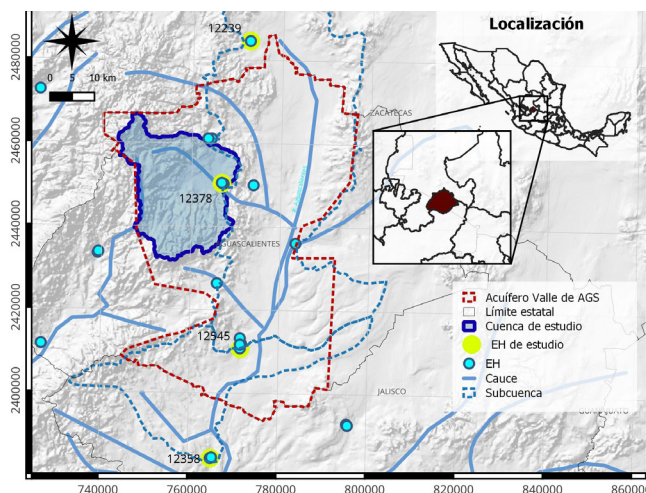


Figura 3. Ubicación de la EH 12378 y las otras EH consideradas para la calibración.

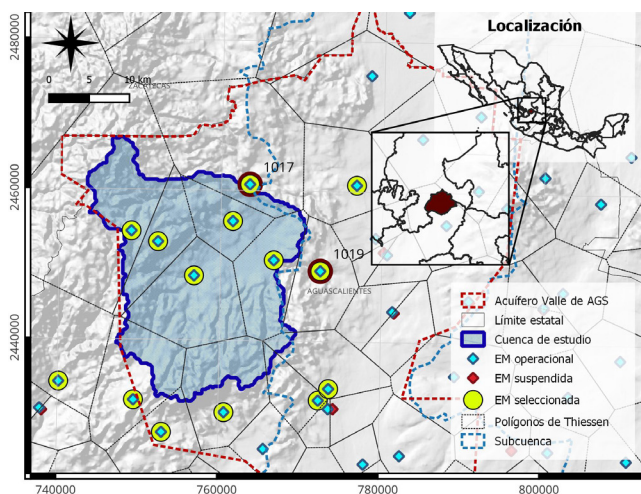


Figura 4. Ubicación de las EM consideradas, las EMs 1017 y 1019 (encerradas en rojo) y el centro de gravedad de la cuenca.

la unidad. Sin embargo, al ser los únicos datos disponibles para la zona, se asumieron como válidas. Cabe destacar que las pruebas de homogeneidad y de independencia (persistencia) no son limitantes en la selección de la estación, mas son una representación del comportamiento estadístico de la serie.

La **Figura 4** muestra la selección espacial de las EMs, incluyendo las EMs ID de las cuales se ob-

Tabla 3. Las características de las EMs. Las EMs 1017 y 1019 y sus características están señaladas en cursiva.

| Clave | Año inicial | Año final | Años de servicio | Distancia al CG* (km) | % Vacíos |
|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------------|--------------|
| 1010 | 1961 | 2016 | 55 | 6.44 | 1.847 |
| <i>1017</i> | <i>1942</i> | <i>2016</i> | <i>74</i> | <i>13.52</i> | <i>1.918</i> |
| 1018 | 1933 | 2016 | 83 | 9.64 | 0.895 |
| <i>1019</i> | <i>1942</i> | <i>2016</i> | <i>74</i> | <i>15.28</i> | <i>0.966</i> |
| 1020 | 1963 | 2016 | 53 | 22.40 | 1.792 |
| 1021 | 1959 | 2016 | 57 | 0.53 | 1.775 |
| 1047 | 1975 | 2016 | 41 | 18.62 | 6.604 |
| 1082 | 1979 | 2016 | 37 | 22.97 | 1.865 |
| 1089 | 1980 | 2016 | 36 | 8.27 | 4.33 |
| 1095 | 1981 | 2016 | 35 | 21.64 | 3.033 |
| 1098 | 1986 | 2016 | 30 | 22.55 | 10.139 |
| 1103 | 1998 | 2016 | 18 | 10.00 | 10.602 |
| 1105 | 2001 | 2016 | 15 | 22.44 | 15.075 |
| 1106 | 2001 | 2016 | 15 | 18.77 | 11.073 |

* Distancia entre la EM y el centro de gravedad de la cuenca.

tuvieron las series de precipitación y temperatura utilizadas. El factor principal en la elección de la EM fue el periodo en el cual había registros de precipitación y que coincidiera con los registros hidrométricos (1942 – 2011).

La **Tabla 3** muestra las estaciones consideradas y sus características. Por su parte, la **Tabla 4** muestra los resultados de las pruebas estadísticas de las EM seleccionadas. En este caso, los resultados de las pruebas generales fueron inconclusas, por lo que se optó por aplicar las pruebas específicas.

Una vez ingresadas las series de precipitación y ETP al modelo, se procedió con la primera simulación utilizando los parámetros predeterminados en la herramienta de EvalHid, y posteriormente se procedió con la etapa de calibración.

El modelo se calibró considerando lo siguiente:

- Un periodo de calentamiento (octubre 1943 – septiembre 1945), permitiendo que el comportamiento del modelo se estabilice.

Tabla 4. Resultados de las pruebas estadísticas de las EMs 1017 y 1019. Los datos que resultan menos que adecuados se señalan en cursiva.

| Clave | Secuencias | Helmert | Anderson | T-Student | Cramer |
|-------|------------|---------------------|---------------|-----------|-----------|
| 1017 | Homogénea | <i>No homogénea</i> | Independiente | Homogénea | Homogénea |
| 1019 | Homogénea | <i>No homogénea</i> | Independiente | Homogénea | Homogénea |

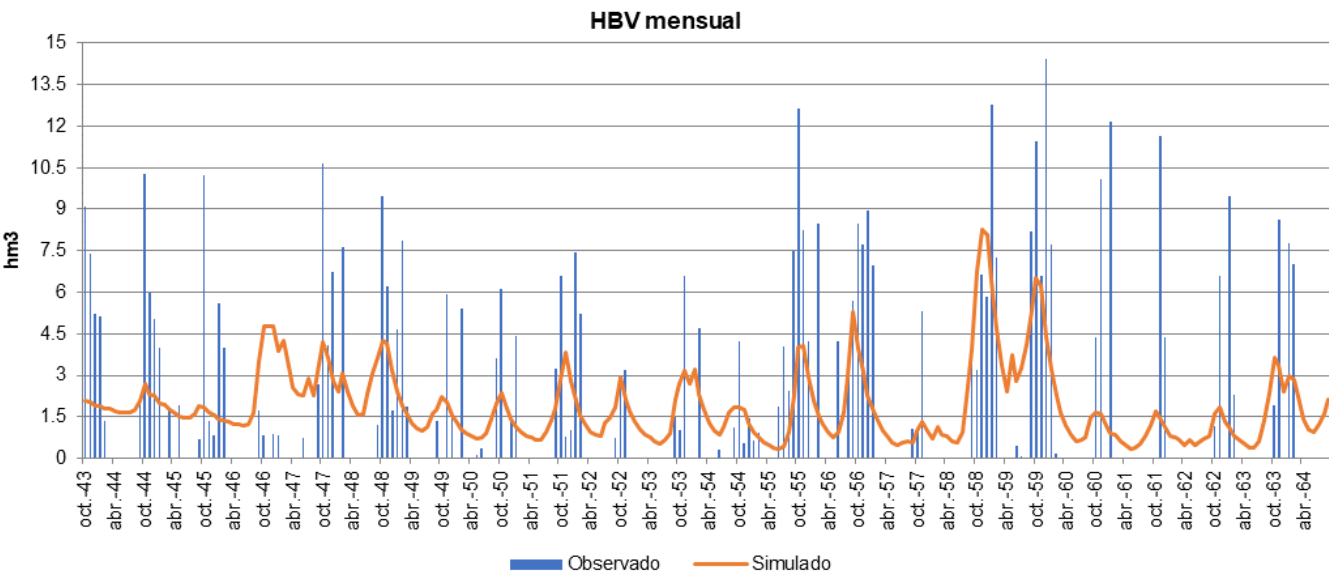


Figura 5. Gráfica de datos simulados vs. datos observados para el modelo HBV calibrado.

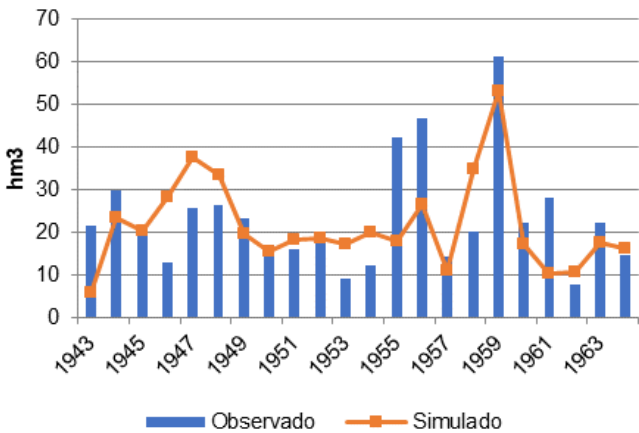


Figura 6. Observados vs. simulados, acumulación anual.

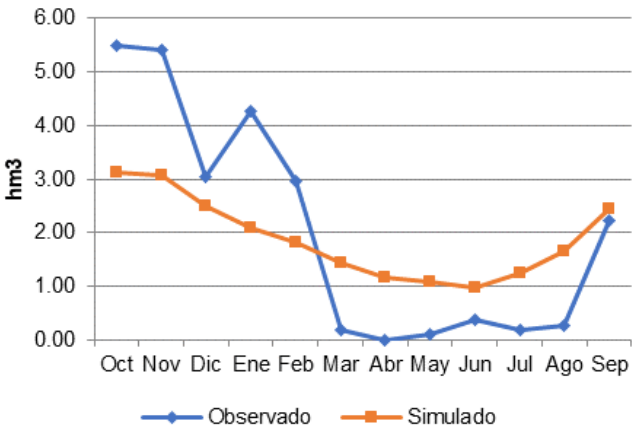


Figura 7. Observados vs. simulados, medias mensuales.

- El periodo de calibración fue de octubre 1945 – septiembre 1960; en esta etapa se observó que los datos medidos eran más homogéneos y tenían un comportamiento más estable.
- Se analizó la serie de datos observados y se determinó que ciertos datos en ceros eran más bien nulos, ya que el comportamiento de estos datos no concordaba con el conocimiento que se tiene del escurrimiento en la zona con respecto

- a las temporadas de lluvia. Estos datos no se consideraron al momento de calcular los índices de bondad de ajuste.
- Se decidió no validar el modelo, por el comportamiento de los datos observados.

Las **Figuras 5, 6, y 7** representan gráficamente los valores observados vs. los simulados por el modelo HBV calibrado. Los parámetros calibrados

Tabla 5. Parámetros calibrados del modelo HBV.

| Parámetro | Descripción | Unidad | Valor calibrado |
|-------------------|--|-----------|-----------------|
| β | Coefficiente de forma para la infiltración | Adim | 2.2542 |
| FC | Capacidad de campo | <i>mm</i> | 1000.0 |
| PWP | Punto de marchitez de la vegetación | <i>mm</i> | 549.4 |
| $L_{m\acute{a}x}$ | Umbral de descarga rápida | <i>mm</i> | 130.6 |
| K_0 | Coefficiente de descarga rápida | Adim | 0.2980 |
| K_1 | Coefficiente de recesión tanque superior | Adim | 0.2980 |
| K_2 | Coefficiente de recesión tanque inferior | Adim | 0.0150 |
| K_{perc} | Coefficiente de percolación | Adim | 3.80810^{-5} |

Tabla 6. Índices de bondad de ajuste para el modelo HBV calibrado.

| Índice | Valor | Calidad |
|----------|--------|-----------------|
| NSE | 0.3043 | Insatisfactoria |
| $\ln N$ | 0.1232 | Insatisfactoria |
| R | 0.5618 | Satisfactoria |
| Simetría | 0.9938 | Muy buena |

finales se resumen en la **Tabla 5**. Los índices de bondad de ajuste obtenidos por el modelo calibrado se resumen en la **Tabla 6**.

Conclusiones

El rendimiento general del modelo HBV para esta serie fue deficiente; los índices de bondad de ajuste permanecieron categorizados como insatisfactorios, aún después de la calibración del modelo. Esto se traduce en un modelo hidrológico poco fiable. Sin embargo, se ha demostrado que el modelo HBV es capaz de simular cuencas con datos escasos o con comportamiento errático, específicamente en esta zona de estudio (Hughes-Lomelín *et al.*, 2022b). Se

recomienda seguir modelando mediante el HBV, pero modificando los parámetros de modelado, más concretamente, trabajar con datos diarios en vez de datos mensuales, de manera que al contar con mayor número de datos se pueda lograr mejorar el modelo buscado.

La escasez y la calidad de datos es un factor importante a la hora de modelar hidrológicamente, tanto para la elección del modelo como la disponibilidad de datos para calibrar y validar. Es de suma importancia seleccionar los datos que sean los más adecuados para modelar según las metodologías propuestas en la literatura; no obstante, en ocasiones no será posible contar con datos de calidad y se deberá trabajar con los datos disponibles para cada zona a modelar.

Referencias

- Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Norrköping, Sweden.
- CONAGUA (2020). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero del Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes.
- CONAGUA (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- González-Mendoza JL (2016). Obtención de la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca del Río Tuxpan, mediante la NOM-011-CONAGUA-2015 y el modelo hidrológico HBV. Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- GRASS Development Team (2017). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software.
- Hughes-Lomelín RN-H, Sánchez Quispe ST, Hernández Hernández MA, García-Romero L (2022a). Modelación hidrológica superficial del área de aporte al acuífero Valle de Aguascalientes mediante el uso del modelo de Témez. XXVI Congreso Nacional de Hidráulica.
- Hughes-Lomelín RN-H, Sánchez Quispe ST, Hernández Hernández MA, García-Romero L (2022b). Superficial Hydrological Modelling of the Aguascalientes Valley Aquifer (Mexico) Contribution Area. A Comparison between Témez and HBV Models. XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Lindström G, Johansson B, Persson M, Gardelin M,

- Bergström S (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J Hydrol (Amst)* 201: 272–288
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50: 885–900.
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans ASABE* 58: 1763–1785.
- Paredes J, Solera A, Andreu J, Lerma N (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos: Manual Técnico v1.1.
- Paredes J, Solera A, Andreu J, Lerma N (2011). EVALHID.
- 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. ECORFAN, pp 107–145.
- SMN (2021). Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Thornthwaite CW (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* 38: 55–94.