

Modelación hidrológica SWAT en una cuenca de conservación forestal

Verenice Escamilla-Rivera^{1,2}

¹ El Colegio de México, A.C., Ciudad de México, México.

² Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (CCT-CENPAT-CONICET), Puerto Madryn, Chubut, Argentina. E-mail: vrivera@cenpat-conicet.gob.ar

Resumen

Los modelos hidrológicos como SWAT (Soil Water Assessment Tool) han sido una herramienta que ha ayudado a cuantificar servicios ambientales. La falta de información ha sido uno de los problemas para cuantificar los servicios ambientales. El objetivo de este trabajo es de proveer una visión de la aplicación del modelo SWAT y sus implicaciones en una cuenca donde se aplican políticas públicas de conservación forestal como es el Pago por Servicio Ambiental (PSA). Los resultados del modelo para calibración indicaron valores satisfactorios (coeficiente de Nash-Sutcliffe >0.5). La sensibilización indicó el potencial del modelo para cuantificar los servicios ambientales con el fin de ayudar a la toma de decisiones.

Palabras clave: Cuencas, servicios ambientales hidrológicos, Modelo SWAT, México.

Abstract

Hydrological models such as SWAT (Soil Water Assessment Tool) have been a tool that has helped to quantify environmental services. Lack of information has been one of the problems in quantifying environmental services. The objective of this paper is to provide an insight into the application of the SWAT model and its implications in a watershed where public forest conservation policies such as Payment for Environmental Services (PES) are applied. The model calibration results indicated satisfactory values (Nash-Sutcliffe coefficient >0.5). Awareness-raising indicated the potential of the model to quantify environmental services to aid decision-making.

Key words: Watersheds, hydrological environmental services, SWAT model, Mexico.

Artículo arbitrado

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Recibido: | Aceptado: |
| 15 de octubre de 2021 | 9 de noviembre de 2021 |

Introducción

La deforestación tiene serios impactos en los servicios ambientales hidrológicos, ya que modifica la intercepción de la lluvia, la infiltración, la evapotranspiración, y la recarga del acuífero, afectando completamente la hidrología de una cuenca (Baker & Miller, 2013). Sin embargo, la dinámica hidrológica de los servicios ambientales en bosques es poco entendida, y el principal problema es la escasez de evaluaciones de los servicios ambientales hidrológicos. Esto es principalmente en los servicios de “provisión”, que se pueden analizar a través de la producción y disponibilidad de agua para el riego en la agricultura, el uso doméstico y la producción de electricidad a través de presas e hidroeléctricas. A diferencia de los servicios de “regulación” que son propensos a disminuir o degradarse según los patrones de uso de los recursos naturales, y que pueden ser analizados a través de la conectividad hidrológica del paisaje (evapotranspiración, regulación de inundaciones, flujo hídrico base, entre otros) (Chan et al., 2006; Logsdon & Chaubey, 2013; Ozment & Filoso, 2017). Modelos hidrológicos como Soil Water Assessment Tool (SWAT) pueden ayudar a identificar las causas de estos problemas y mejorar la toma de decisiones políticas y financieras sobre el uso del suelo. Sin embargo, el conocimiento sobre el comportamiento biofísico del servicio hidrológico de los bosques que existe en el programa de Pago por Servicio Ambiental (PSA) se fundamenta en modelos hidrológicos basados en poca o ninguna información empírica (Bhattacharjee et al., 2017; Chan et al., 2006; Pandeya et al., 2016), y en vacíos en la investigación que

dificultan la extrapolación de los impactos de la deforestación en el suministro de agua de cuencas (Andréassian, 2004). Impidiendo así la capacidad predictiva sobre los cambios espacial y temporal, y la promoción del uso incorrecto del manejo del bosque.

Son muy pocos los estudios de servicios ambientales hidrológicos en México utilizando el modelo SWAT. Torres-Benites et al. (2004, 2005), Trucios et al. (2007), Salas-Martínez et al. (2014) utilizaron el modelo para analizar el movimiento de sedimentos, Niraula et al. (2015) evaluaron el cambio de uso y cobertura del suelo (LULC), Molina-Navarro et al. (2016) sobre el cambio climático, Niraula et al. (2012), Hurtado et al. (2013) y González y Parés (2019) sobre la calibración del modelo, López-Ramírez et al. (2021) sobre la evapotranspiración potencial, y Bautista-Avalos et al. (2014) sobre la contaminación de los ríos donde obtuvieron precisiones que variaron de satisfactorias a muy buenas.

El objetivo de este estudio es proveer un enfoque de la aplicación del modelo SWAT y sus implicaciones en una cuenca de 256 km² localizada en el Área Natural Protegida La Frailescana, Chiapas. Elegimos el modelo SWAT porque permite simular los efectos del manejo del suelo, los cambios de uso del suelo y los factores climáticos en los procesos hidrológicos de cuenca (Gassman et al. 2007). Para ello, es fundamental calibrar el modelo y evaluar su rendimiento.

Método

Se analizó la cuenca del Río Blanco, localizado en la Sierra Madre de Chiapas, México (Figura 1). El clima es cálido-húmedo y con una precipitación media anual de 1,395 mm. El promedio de la

temperatura anual es 14C y 36C, respectivamente. Los eventos de lluvia son generalmente intensos de Julio a Octubre y la temporada de sequía de Diciembre a Abril. El Río Blanco tiene una longitud de 20 km y se origina en la parte mas alta de la Sierra Madre con una elevación de 2,483 m.

La cobertura vegetal de la cuenca consiste en bosque de encino, bosque de pino, bosque mesófilo, bosque de pino -encino, bosque siempreverde y vegetación secundaria, que en su conjunto cubren el 66% de la cuenca.

La cuenca concentra el programa de PSA del Área Natural Protegida "La Fraileskana", que cubre el 16% de la superficie de la cuenca. Entre los años 2005 y 2012, ocho de las 35 comunidades de la cuenca recibieron fondos de PSA con una superficie de conservación media de 6,8 km² por comunidad.

2.1 Desarrollo del modelo SWAT

SWAT es un modelo de parámetros distribuidos de base física desarrollado para simular los efectos de las prácticas de gestión del agua y de la tierra en la hidrología y la calidad del agua de las cuencas. El modelo SWAT (ArcSWAT) versión 2012 se configuró y parametrizó utilizando la interfaz de Arc-GIS (versión 10.2). Las variables de topografía se obtuvieron del Modelo Digital de Elevación 3.0 (MDE) obtenido del Servicio Geográfico Mexicano (INEGI, 2013), con una resolución de 15 x 15 m. Se utilizó un mapa de ríos del Simulador de Flujo de Agua de la Cuenca (INEGI, 2014) para complementar la información del MDE para delimitar la cuenca y subcuencas. Siguiendo los criterios de la FAO, la pendiente se dividió en cuatro clases: 0-15%, 15-30%, 30-45% y >45%. Se utilizaron los datos meteorológicos del

Reanálisis del Sistema de Predicción Climática (CFSR) del Centro Nacional de Predicción Ambiental para el período 1990- 2014. No se utilizaron los datos de la estación meteorológica más cercana porque la estación está situada a 18 km fuera de la cuenca y tiene vacíos de información. El mapa de uso de suelo se elaboró mediante la clasificación supervisada a partir de una imagen Landsat OLI/TIRS adquirida en Enero de 2015. El mapa de suelos se basó en unidades de paisaje que incorporan información obtenida de un muestreo de suelos. Para parametrizar el mapa de suelos, se recolectaron 72 muestras de suelos en 30 sitios, cuya ubicación se basó en la accesibilidad al campo, el tipo de uso del suelo y el tipo de vegetación. Se realizó la técnica de calicatas (Porta-Casanellas et al. 2003) para caracterizar los perfiles del suelo en cada sitio. Las muestras se analizaron en laboratorio siguiendo la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) para obtener los porcentajes de arena, limo y arcilla, la clase de textura y el porcentaje de materia orgánica. Conductividad hidráulica saturada, capacidad de agua disponible y densidad aparente del suelo- se calcularon con el software SPAW, versión 6.02 (USDA, 2013). Para determinar el grupo hidrológico, se utilizó el software NumCur. La erosionabilidad del suelo se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE); mientras que el contenido de carbono orgánico se usó la ecuación de Dudal et al. 2005; Romanowicz et al. 2005.

2.2 Calibración, sensibilización y validación

Teniendo en cuenta la disponibilidad de datos de caudales observados para la calibración y la validación, la calibración

mensual se realizó desde el 1 de enero de 1993 hasta el 31 de diciembre de 1998, y la validación desde el 1 de enero de 1999 hasta el 31 de diciembre de 2001. Se seleccionó un periodo de 25 años (del 1 de enero de 1990 al 31 de diciembre de 2014) para la simulación. Los tres primeros años se utilizaron para permitir que los parámetros alcanzaran el equilibrio (periodo de calentamiento) y el periodo restante se utilizó para la calibración y la validación. Los datos de los caudales son mensuales y se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2014). La estación de aforo cercana a la cuenca fue "El Brillante", ubicada a 12.4 km del embalse de la cuenca estudiada. La estación "El Brillante" llegan caudales de una superficie de 714 km². De acuerdo con Campos-Aranda (2010, 2011), los datos de los caudales en Chiapas son homogéneos, por lo que los datos de los caudales observados se ajustaron proporcionalmente al tamaño de la cuenca de estudio.

Los rangos iniciales de los parámetros para calibración se basaron en el análisis de sensibilidad utilizando el algoritmo SUFI-2. El algoritmo SUFI-2 proporciona una plataforma para llevar a cabo la calibración y la validación, así como el análisis de incertidumbre. Se realizaron utilizando el procedimiento Sequential Uncertainty Fitting, versión 2 (SUFI-2) del software SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) versión 5.1.4 (Abbaspour, 2015). El rendimiento del modelo se evaluó con el índice estadístico de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970).

Resultados y discusión

Los resultados gráficos (Figura 2) indicaron una calibración y una validación adecuadas en la gama de caudales observados, aunque el resultado de la calibración mostró una mejor coincidencia que el de validación. El análisis de sensibilidad indicó que el modelo SWAT fue sensible a la condición de humedad, seguido de los parámetros de infiltración ($NSE \leq 0.05$), estos parámetros coincidieron en general con la modelación SWAT previa en las cuencas del sur de México (González y Parés 2019, López-Ramírez et al. 2021). Los parámetros utilizados en el modelo se agrupan en sensibles, menos sensibles e insensibles (Tabla 1 y 2). Los parámetros sensibles son los que aportan un efecto sobre la salida, los menos sensibles son los que tienen un pequeño efecto ante varios cambios de valores, y los insensibles son los que no tienen ningún efecto de cambio. Para lograr el mejor ajuste del modelo, sólo se ajustaron los parámetros más sensibles en el proceso de calibración. Los valores iniciales se definieron para ver un cambio en la salida de cada parámetro (Arnold et al. 2012; Alim et al. 2017; González y Parés 2019). Posteriormente, se ajustaron los valores iniciales en función del tipo de suelo, y el comportamiento sensible en relación a la precisión del modelo. Se observó que los parámetros más sensibles eran aquellos con mayor diferencia entre el NSE máximo y el mínimo. El número de curva de condición de humedad fue el primer parámetro calibrado en el modelo, este resultado está de acuerdo con Moriasi et al (2010), que sugieren que el parámetro sensible de un modelo está mayormente relacionado con la infiltración. Se observó que una mayor cantidad de agua del horizonte superior satisficiera la demanda

de caudal en las estaciones lluviosas y no sobrestimaba el caudal en los períodos secos. GW_DELAY fue el segundo parámetro más sensible, y se redujo de 450 días a 31 días. Esto representa que el modelo produce una gran cantidad de agua disponible para contribuir al caudal. En consecuencia, el acuífero poco profundo libera agua más rápidamente, y el sistema se comporta más como una capa permeable. Sin embargo, el volumen de agua que contribuye al flujo del arroyo proviene del acuífero poco profundo. Si GW_DELAY hubiera sido con valores mayores (alrededor de 400 días), en consecuencia, el acuífero somero libera el agua más lentamente, y el sistema se comporta más como una capa semipermeable, la descarga de la cuenca estaría determinada por el volumen de agua almacenada cuando debería estar caracterizada por coeficientes de tasa no lineales (Velázquez y Ordaz 1992, Kirchner 2009, López-Ramírez et al. 2021). Al reducir el GW_DELAY, el REVAPMN disminuyó de 1.000 a 750 mm. Otros parámetros ajustados fueron la conductividad hidráulica saturada (SOL_K), la capacidad de agua disponible de la capa de suelo (SOL_AWC) y el factor alfa del flujo base (ALPHA_BF). GW_DELAY siguió siendo sensible cuando se modificó ALPHA_BF. El ALPHA_BF describe la velocidad a la que el flujo de la corriente disminuye cuando el agua subterránea recarga el canal de la corriente. Los mejores valores de ALPHA_BF se obtienen analizando los caudales medidos durante los periodos de no recarga en la cuenca (Tabla 7).

El rendimiento del modelo durante la calibración puede calificarse como bueno ya que la función objetivo $NSE = <0,5$, basándose en las calificaciones generales de rendimiento para un paso de tiempo mensual dadas por Moriasi et al. (2007).

La correlación entre el caudal medido y el simulado mostró que los procesos físicos implicados en la generación del caudal en la cuenca de estudio son capturados satisfactoriamente por el modelo durante la calibración. Sin embargo, los caudales máximos observados fueron menores en el periodo de validación, por lo que los caudales máximos simulados tienden a ser más cercanos (Tabla 3 y Figura 3). Este comportamiento también se puede observar en los valores de PBIAS, donde los caudales máximos simulados son inferiores a los máximos observados ($<12\%$) para el periodo de calibración y los valores de PBIAS fueron inferiores al 10% en el periodo de validación. Evidencia local sugirió que la cuenca de estudio tuvo una mayor tasa de deforestación alrededor del 0,9% del área total de 1985 a 2005, y un proceso de recuperación forestal a partir de 2007 debido a la implementación de actividades de conservación con los fondos del PSA (CONAFOR 2015). Además, la cuenca ha enfrentado fenómenos hidrometeorológicos como lluvias extremas e inundaciones derivadas de ciclones tropicales en 1998 y 2005 (CONAGUA 2016, Pérez et al. 2015), todo lo cual genera incertidumbre en los volúmenes de caudales en el periodo seleccionado para la calibración y validación del modelo.

Conclusión

Está claro que la calidad del modelo hidrológico depende de la base de datos subyacente. Los estudios previos con SWAT en México muestran que la modelación hidrológica se restringe a zonas en las que existe al menos una estación de aforo, datos disponibles al público y cuencas mayores a 1,000 km². Nuestro estudio muestra que es posible lograr un buen desempeño del modelo en

cuenca pequeñas, para ello es necesario contar con datos específicos de la zona de estudio.

Dado que el presupuesto público en México es limitado, proponemos la siguiente estrategia. En primer lugar, se debe realizar una evaluación preliminar con información disponible al público, después de realizar una evaluación inicial para asegurar que la exactitud de los datos disponibles para el público sea al menos satisfactoria. En el análisis exploratorio se puede determinar qué datos disponibles se pueden introducir para reducir el costo de un presupuesto limitado en el que se puede asignar en áreas con necesidad de evaluar el efecto de un esquema de conservación forestal.

Por último, las zonas prioritarias deben incluir necesariamente una estación de aforo en su interior o tener una muy cerca. Las estaciones de aforo pueden estar situadas más abajo y dar servicio a varias cuencas pequeñas. Por lo tanto, además del papel fundamental de las estaciones de aforo, es importante seleccionar un periodo del caudal observado en el que la cuenca no haya presentado eventos que lleven a una incertidumbre del servicio hidrológico (cantidad de agua) para tener valores óptimos de calibración y validación.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) con la beca No. 284431. Agradecimiento especial al Dr. Jordi Honey-Rosés del School of Community and Regional Planning de University of British Columbia por proporcionar comentarios útiles para este trabajo.

Referencias

- Andréassian, V., (2004). Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. 291 (1–2), 1–27. doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.015
- Baker, T. J., & Miller, S. N., (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*. 486, 100–111. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.041
- Bhattacharjee, N. V., Ranjan, P., Mandal, A., & Tollner, E. W., (2017). Inverse Mapping for Rainfall-Runoff Models using History Matching Approach. *Journal of Environmental Management*. doi: arxiv.org/abs/1709.02907
- Chan, K. M. A., Shaw, M. R., Cameron, D. R., Underwood, E. C., & Daily, G. C., (2006). Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology*. 4 (11), 2138–2152. doi: 10.1371/journal.pbio.0040379
- CONAFOR (2015). ‘Inventario Nacional Forestal y de Suelos’.
- CONAGUA (2014). ‘Banco Nacional de Datos de Agua Superficiales’. México.
- CONAGUA (2016). ‘Estadísticas del agua en México’. México.
- Diario Oficial de la Nación (2002) ‘Especificaciones para suelos, muestreo y análisis’. Última consulta en diciembre 15, 2017 en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002.
- Dudal, R. et al. (2005) Soil Survey in Belgium and its Applications, European Soil Bureau. Belgium.

- FAO (2009) Guía para la descripción de suelos. 4ta Edición. Edited by FAO. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Jujnovsky, J. et al. (2012). 'Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in southwestern Mexico City'. *Environmental Management*, 49 (3), pp. 690-702. doi: 10.1007/s00267-011-9804-3.
- Jujnovsky, J. et al. (2017). 'Hydrologic ecosystem services: water quality and quantity in the Magdalena River, Mexico City'. *Hidrobiológica*, 20(2), pp. 113-126.
- Kirchner, J.W., 2009. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resources*. 45, 1-35. <https://doi.org/10.1029/2008WR006912>
- Logsdon, R. A., & Chaubey, I., (2013). A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecological Modelling*. 257, 57-65. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.02.009
- López-Ramírez, et al. (2021) 'A comprehensive calibration and validation of SWAT-T using local datasets, evapotranspiration and streamflow in a tropical montane cloud forest area with permeable substrate in central Veracruz, Mexico', *Journal of Hydrology*, pp. 1-16. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126781.
- Molina-Navarro, E. et al. (2016). 'Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe river basin, Mexico', *Agricultural Water Management*, pp. 29-42. doi: 10.1016/j.agwat.2015.10.029.
- Moriasi, D. N. et al. (2007). 'Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations', *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp. 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.
- Moriasi, D. N. and Starks, P. J. (2010). 'Effects of the resolution of soil dataset and precipitation dataset on SWAT2005 streamflow calibration parameters and simulation accuracy', *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(2), pp. 63-78. doi: 10.2489/jswc.65.2.63.
- Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970) 'River flow forecasting through conceptual models. Part I- a discussion of principles', *Journal of Hydrology*, pp. 282-290.
- Niraula, R., Meixner, T., Norma, L. (2015). Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. *Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.007
- Ozment, S., & Filoso, S., (2017). *Unpacking the Complex Relationship Between Forests and Water Supply in Latin America*. World Resources Institute.
- Pandeya, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Karpouzoglou, T., Mao, F., & Hannah, D. M., (2016). A comparative analysis of ecosystem services valuation approaches for application at the local scale and in data scarce regions. *Ecosystem Services*. 22, 250-259. doi: 10.1016/j.ecoser.2016.10.015
- Pérez, S., et al. (2015) 'Curvas de escurrimiento para tres microcuencas de la cuenca Huixtla,

- Chiapas, México', *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), pp. 1729-1742.
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo, M. and Roquero, C. (2003) *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3er edition. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Salas-Martínez, R. et al. (2014). 'Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el Estado de Oaxaca, México', *Agrociencia*, 48, pp. 1–15.
- Trucios Caciano, R. et al. (2007). 'Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextin en Durango, México', *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(1), pp. 91–101.
- Torres-Benites, E. et al. (2004). 'Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México', *Terra Latinoamericana*, 22(4), pp. 437–444.
- Torres-Benites, E. et al. (2005). 'Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México', *Agrociencia*, 39(5), pp. 481–490.
- USDA (2013) 'SPAW Hydrology'. U.S. Department of Agriculture. Last consulted on September 9, 2014 at: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/management/drainage/?cid=stelprdb1045331>
- Velázquez, L. and Ordaz, A. (1992) 'Provincias hidrogeológicas de México', *Boletín de la sociedad geológica mexicana*, pp. 15-32.

Tabla 1. Selección de parámetros para calibrar el modelo SWAT

| Parametro | Descripción | Unidad |
|------------------|---|--------------------------------|
| CN2 | Curva numérica | - |
| SOL_K | Conductividad hidráulica saturada | mm/h |
| SOL_AWC | Capacidad de agua disponible | mm H ₂ O mm soil |
| SOL_Z | Profundidad del suelo | mm |
| GW_DELAY | Tiempo de recarga al acuífero | days |
| GW_REVAP | Coefficiente de recarga al acuífero | mm H ₂ O/h |
| GWQMN | Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo necesaria para que se produzca el flujo de retorno. | mm H ₂ O |
| REVAPMN | Profundidad umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca la evaporación. | mm H ₂ O |
| ALPHA_BF | Factor alfa de flujo base | days |
| ESCO | Coefficiente de compensación de la evaporación del suelo | - |
| OFLOWMX | Máxima salida diaria del mes | m ³ s ⁻¹ |
| OFLOWMN | Salida mínima diaria del mes | m ³ s ⁻¹ |
| RCHRG_DP | Coefficiente de percolación del acuífero | - |
| SURLAG | Tiempo de retraso de la escorrentía superficial | days |

Tabla 2. Clasificación de la sensibilidad de los parámetros utilizados para calibrar y validar el caudal (clasificados en orden descendente desde los más sensibles hasta los menos sensibles).

| Posición | Parametro | Valor inicial ^a | | Valor final | | NSE mensual | |
|-----------------------|------------|----------------------------|-------|-------------|-------|-------------|------|
| | | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Sensible | | | | | | | |
| 1 | R_CN2 | -0.2 | 0.2 | -0.1 | 0.1 | 0.55 | 0.67 |
| 2 | V_GW_DELAY | 0 | 450 | 0 | 31 | 0.52 | 0.63 |
| 3 | V_REVAPMN | 0 | 1000 | 0 | 750 | 0.51 | 0.56 |
| 4 | R_SOL_K | -1.0 | 1.0 | -1.0 | 1.0 | 0.53 | 0.56 |
| 5 | R_SOL_AWC | -1.0 | 1.0 | -1.0 | 1.0 | 0.53 | 0.57 |
| 6 | A_ALPHA_BF | 0 | 1 | 0.2 | 0.25 | 0.52 | 0.56 |
| Menos sensible | | | | | | | |
| 7 | V_GWQMN | 0 | 1,000 | 0 | 1,000 | 0.52 | 0.54 |
| 8 | V_GW_REVAP | 0.02 | 0.2 | 0.02 | 0.2 | 0.51 | 0.52 |
| No sensible | | | | | | | |
| 9 | R_ESCO | 0 | 1.0 | 0 | 1.0 | 0.54 | 0.54 |
| 10 | R_OFLOWMX | 0 | 2000 | 0 | 1100 | 0.54 | 0.54 |
| 11 | R_OFLOWMN | 0 | 1,000 | 0 | 200 | 0.54 | 0.54 |
| 12 | R_RCHRG | -0.5 | 0.5 | -0.5 | 0.5 | 0.54 | 0.54 |
| 13 | R_SOL_Z | -0.5 | 0.5 | -0.5 | 0.5 | 0.54 | 0.54 |
| 14 | A_SURLAG | 0.05 | 24 | 0.05 | 24 | 0.54 | 0.54 |

^a Los valores por defecto los da SWAT.

En los nombres de los parámetros, r_significa que el valor del parámetro existente se multiplica por (1+ un valor dado); v_significa que el valor del parámetro existente se sustituye por el valor dado y a_significa que un valor dado se añade al parámetro existente (Abbaspour, 2015).

Tabla 3. Estadísticas finales de calibración y validación

| Calibración | | | Validación | | |
|-------------|----------------|-----------|------------|----------------|-----------|
| NSE | R ² | PBIAS (%) | NSE | R ² | PBIAS (%) |
| 0.67 | 0.71 | 10.6 | 0.69 | 0.76 | 11.3 |

En la calificación del rendimiento, $0,50 < NSE \leq 0,65$ es satisfactorio y $0,65 < NSE \leq 0,75$ es bueno. El R² tiene un significado similar al del NSE. $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ es satisfactorio, $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ es bueno, y $PBIAS < \pm 10$ es muy bueno (Moriasi et al. 2007).

Figuras

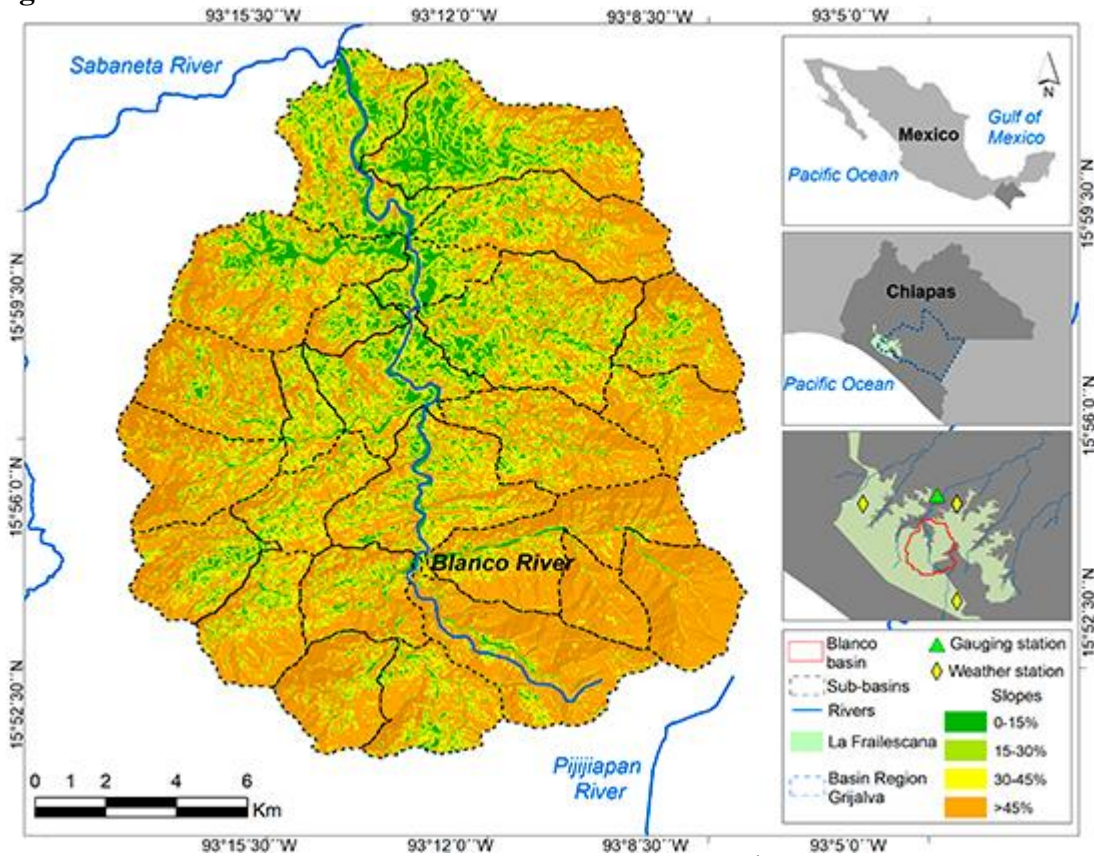


Figura 1. Localización de la cuenca del Río Blanco en el Área Protegida "La Frailesca". Pendiente, división de las subcuencas y ubicación de la estación meteorológica y de aforo.

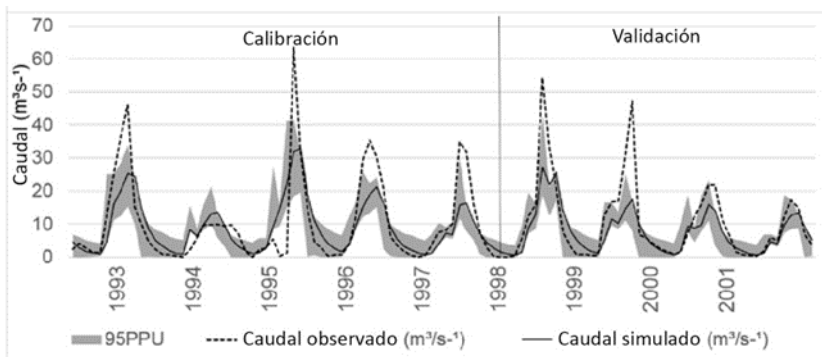


Figura 2. Caudal mensual/año observado y simulado para el periodo de calibración y validación 1993-2001.

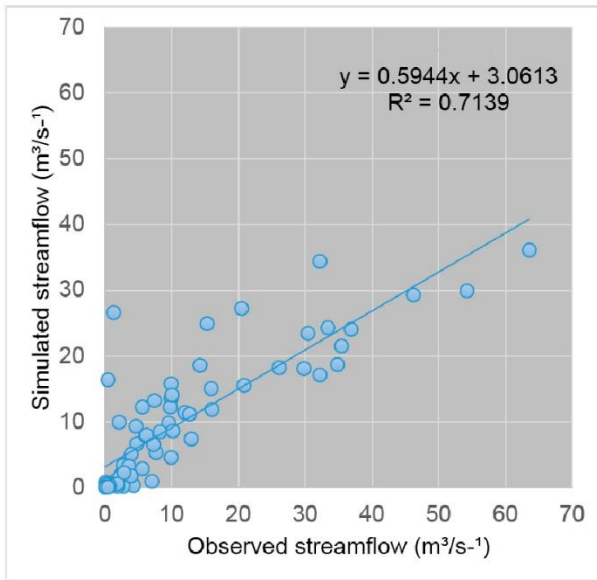


Figura 3. Comparación del caudal simulado con los valores observados.