

# COMPARACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS DE DIFERENTE ESTRUCTURA Y COMPLEJIDAD EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL TITICACA, CUENCA DEL RÍO HUANCANÉ

COMPARISON OF HYDROLOGICAL MODEL OF DIFFERENT STRUCTURE AND COMPLEXITY IN THE TITICACA HYDROGRAPHIC REGION, HUANCANE RIVER BASIN

Recibido: 14/05/22 Aceptado: 05/07/22

DOI: <http://doi.org/10.47190/nric.v4i1.7>

**Wilber Laqui Vilca**

<https://orcid.org/0000-0001-6236-8773>

wlaqui@unap.edu.pe - Universidad Nacional del Altiplano de Puno

**Juan Ocola Salazar**

<https://orcid.org/0000-0001-5317-6542>

juanocola@hotmail.com - Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico TDPS (ALT), La Paz, Bolivia

**Yony Laqui Vilca**

<https://orcid.org/0000-0002-8567-4543>

ylaqui@unap.edu.pe - Universidad Nacional del Altiplano de Puno

## RESUMEN

Con la finalidad de proveer información técnica a los usuarios para la selección adecuada de los modelos hidrológicos que se utilizan para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la Región Hidrográfica del Titicaca, en este estudio se compararon dos modelos de balance hídrico mensual de distinta estructura y grados de complejidad en la cuenca del río Huancané. El modelo GR2M presentó un mejor desempeño en comparación al modelo SWAT, obteniendo el calificativo de muy bueno y bueno, respectivamente, lo que sugiere que incrementar el grado de complejidad de un modelo hidrológico no necesariamente garantiza un buen desempeño. Asimismo, el estudio mostró que un modelo adecuadamente calibrado, muy a pesar de su poca complejidad puede tener un muy buen desempeño en la simulación de caudales mensuales, por lo que, GR2M constituye un buen ejemplo que un modelo de dos parámetros es suficiente para lograr un buen desempeño en la simulación de caudales mensuales, lo que el modelo puede ser utilizado como una herramienta para la hidrología operativa y la planificación y gestión de los recursos hídricos.

**Palabras Clave:** Modelos de balance hídrico mensual, comparación de modelos, GR2M, SWAT.

## ABSTRACT

To provide useful information to the users for hydrologic models selection used to management of water resources in the Titicaca Hydrographic Region, in this study, two monthly water balances model with different structures and various degree of complexity are compared in the Huancane River Catchment. The GR2M model showed better performance compared to the SWAT model, obtaining the qualification of very good and good, respectively, suggesting that increasing the degree of complexity of a hydrological model does not necessarily guarantee good performance. The study also showed that a model properly calibrated, in spite of its low complexity can have a very good performance in simulating monthly flows, so, GR2M is a good example of a model of two parameters is sufficient to achieve a good performance in simulating monthly flows, which the model can be used as a tool for planning and operational hydrology and water resources management.

Key Words: monthly water balance model, model comparison, GR2M, SWAT.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de cuenca se han convertido en herramientas fundamentales para la gestión moderna de los recursos hídricos (Sha et al., 2014), ya que son comúnmente usados para simular y predecir distintos procesos hidrológicos a través del uso de diferentes fórmulas matemáticas para conceptualizar el proceso del ciclo hidrológico (Bai et al., 2015), por lo que, una adecuada estimación del proceso hidrológico es esencial para la toma de decisiones, la gestión de la calidad del agua y recursos, así como la planificación de las cuencas debido a la complejidad de los procesos hidrológicos e hidráulicos operativos (Zhang et al., 2013).

La elección del modelo hidrológico puede depender de un número de criterios de selección, incluyendo el carácter (p.ej. escala espacial y temporal, nivel de error aceptable e incertidumbre de las proyecciones frente al diseño detallado) de la problemática de la gestión de los recursos hídricos. Asimismo, la escala de las características físicas (p.ej. uso del suelo, elevación y geología) que influyen en los importantes procesos hidrológicos (p.ej. evapotranspiración, acumulación y fusión de nieve, o recarga y descarga de las aguas subterráneas) pueden ser un factor importante en la selección de modelos hidrológicos (Surfleet et al., 2012). Finalmente, los aspectos particulares de los modelos pueden influir en su apropiada aplicación, tales como la facilidad de uso que incluye el pre y post-procesamiento, los requisitos de hardware, el rigor y la

exhaustividad de los procesos modelados, la disponibilidad y calidad de los datos requeridos, la adaptabilidad del código fuente, la disponibilidad de los modelos, y el costo (Surfleet et al., 2012).

La existencia de un número significativo de modelos hidrológicos ha generado, que los usuarios requieran de ayuda para seleccionar un modelo adecuado para una práctica hidrológica específica (Chau et al., 2005). Por lo que, para proveer una guía científica en la aplicación de modelos hidrológicos se han desarrollado varios estudios de comparación de tipos de modelos hidrológicos (Arsenault et al., 2015; Bai et al., 2015; Chau et al., 2005; Johnson et al., 2003; Liu et al., 2016; Niraula et al., 2013; Sahu et al., 2010; Surfleet et al., 2012; Zhang et al., 2013).

La creciente demanda de agua limpia, combinadas con cambios en las prácticas de uso del suelo, el crecimiento demográfico, el deterioro de la infraestructura y el cambio climático, suponen una amenaza para la sostenibilidad de los recursos hídricos (Eshtawi et al., 2016). Las zonas de montañas han sido reconocidas como los entornos físicos especialmente sensibles donde el cambio climático podría tener repercusiones considerables en el régimen de escurrimiento de los ríos aguas abajo y la disponibilidad de agua (Beniston, 2012). En ese contexto, el río Huancané considerado como una de las principales fuentes de abastecimiento de agua y tributario del lago Titicaca, ha llevado a que

muchas entidades se interesen en conocer la disponibilidad hídrica actual y futura, ya que conocer dichos valores son de fundamental importancia para el planeamiento y manejo de los sistemas de recursos hídricos (Laqui, 2010). Asimismo, debe tenerse en cuenta que el lago Titicaca, por su superficie y su volumen, y por su situación de altitud elevada en zona intertropical, constituye una originalidad hidrológica en el mundo (Roche et al., 1991). En razón a ello, este estudio plantea como principal objetivo evaluar el desempeño de dos modelos hidrológicos de distinta complejidad y estructura, así como proveer información valiosa para la selección y mejora de los modelos hidrológicos en la Región Hidrográfica del Titicaca.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

La cuenca del río Huancané (CRH) está localizada entre 69.28° y 70.17° O, 14.48° a 15.37° S en el extremo sur este de Perú. El área de drenaje delimitada hasta la estación Puente Carretera Huancané, próxima a la desembocadura en el lago Titicaca cubre un área aproximada de 3 522 km<sup>2</sup> (Figura 1a). El curso principal es de 125 km de longitud y los rangos de elevación entre 3 820 y 5 162 m.s.n.m. (Figura 1b). La CRH se localiza en la zona climática semiseca fría, caracterizada por veranos húmedos y cálidos e inviernos secos y fríos (SENAMHI, 2010). La precipitación promedio anual es de 699.5 mm y la temperatura 7.71°C (ANA, 2010). La CRH tiene un paisaje típico de las cuencas del altiplano y está comprendida de aproximadamente 82.1% de pastizales, 12.6% de áreas forestales y 3.3% de áreas de cultivo (Figura 2a). Los suelos principalmente corresponden a suelos de textura franca (Figura 2b) y el 70.7% del área total es supera el 10% de pendiente longitudinal (Figura 2c).

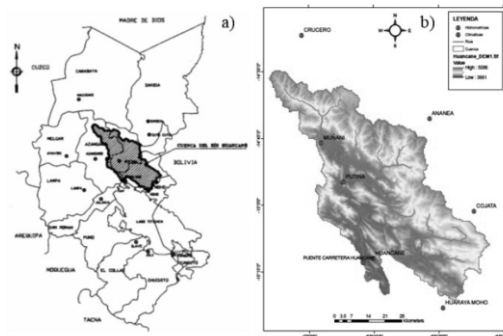


Figura 1. a) Ubicación de la cuenca del río Huancané. b) ubicación de estaciones climáticas e hidrológicas.

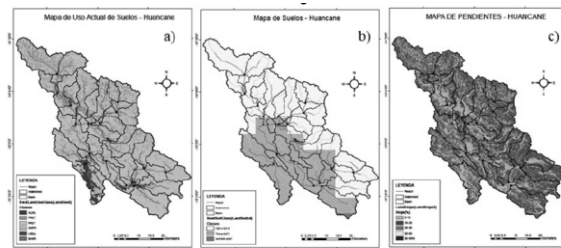


Figura 2. a) Mapa de uso actual de suelos, b) mapa de tipos de suelos y c) mapa de pendientes

Se recopilaron datos diarios de precipitación y temperatura de siete estaciones climáticas y registros diarios de caudales de la estación Puente Carretera Huancané, todos administrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), el período de datos seleccionado para el análisis hidrológico fue entre 1978 y 1997 (Figura 1b, Tabla 1). Estos registros fueron sometidos a análisis, crítica y tratamiento de datos a través del método de Vector Regional (Hiez, 1977; Brunet-Moret, 1979) y los datos faltantes de precipitación y temperatura fueron completados utilizando datos de estaciones vecinas.

Tabla 1. Red de estaciones

Estación	Ubicación			Variable
	Latitud (°S)	Longitud (°E)	Altitud (m.s.n.m.)	
Huaraya	-15.39	-69.48	3890	Precipitación, temperatura
Huancané	-15.20	-69.75	3890	Precipitación, temperatura
Cojata	-15.03	-69.36	4380	Precipitación
Putina	-14.91	-69.87	4878	Precipitación
Munani	-14.77	-69.95	3948	Precipitación, temperatura
Ananea	-14.68	-69.53	4660	Precipitación
Crucero	-14.36	-70.03	4183	Precipitación
Puente Carretera Huancané	-15.12	-69.47	3860	Caudal

El modelo digital de elevación (DEM) con resolución de 90 m de la CRH fue obtenida de la página web (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) del Consorcio para Información Espacial (CGIAR-CSI). Los datos de suelos con resolución de 8 km corresponden a la clasificación efectuada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y se pueden

encontrar en el sitio web [http://www.waterbase.org/download\\_data.html](http://www.waterbase.org/download_data.html). Los datos de cobertura y uso del suelo generados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con resolución de 30 m están disponibles en <http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>.

### Modelo GR2M

GR2M es un modelo de balance hídrico conceptual a paso de tiempo mensual con un reducido número de parámetros (Lavado Casimiro et al., 2011). X1 y X2 definen la máxima capacidad de almacenamiento del reservorio y la relación de intercambio de agua entre la superficie y las aguas subterráneas, respectivamente, además de los dos parámetros considera dos estados iniciales, denominados; cuantificación del almacenamiento de humedad del suelo (S) y reservorio cuadrático (R) (Rwasoka et al., 2014). El modelo fue condicionado para simular caudales mensuales a partir de evapotranspiración potencial y precipitación mensual (Mouelhi et al., 2006). En la Figura 3 se presenta un diagrama esquemático del modelo de GR2M. Para la formulación ver Mouelhi et al. (2006).

La evapotranspiración potencial utilizada como dato de entrada para el modelo mensual GR2M se calculó utilizando el método de Oudin (Oudin et al., 2005) a partir de registros de temperatura media mensual, cuyos valores promedio fueron estimados con ayuda del módulo espacial de Hydraccess (Vouchel, 2006) para el periodo 1977-1998, al igual que la precipitación.

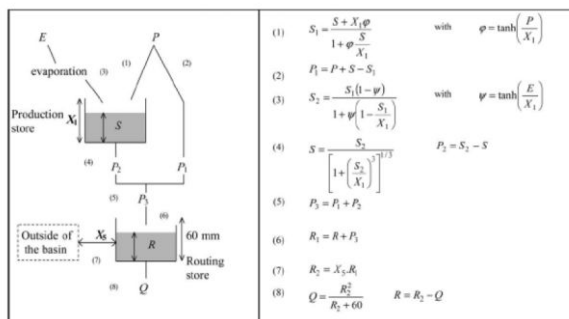


Figura 3. Diagrama del modelo GR2M extraído de Mouelhi et al. (2006).

### Modelo SWAT

SWAT es un modelo típicamente semidistribuido

y físicamente basado, desarrollado originalmente por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS) (Arnold et al., 1998). Inicialmente fue diseñado para predecir el impacto de los diferentes tipos de suelo, usos y prácticas de manejo de los suelos sobre el agua y sedimentos en la cuenca hidrográfica durante periodos prolongados. Asimismo, SWAT se ha convertido en una herramienta efectiva para la simulación de la distribución de nutrientes en la cuenca (Liu et al., 2016).

Los principales datos de entrada del modelo consisten en topografía, propiedades del suelo, uso del suelo/tipo de cobertura, datos meteorológicos/climáticos (precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa), y las prácticas de manejo del suelo como lo refiere Liu et al. (2016). La cuenca en el modelo SWAT se divide en pequeñas sub-cuencas conectadas en cascada por la red de corrientes. Las sub-cuencas se definen por un conjunto de unidades de respuesta hidrológica (HRU) que se basan en la combinación del uso del suelo, tipo de suelo y topografía como lo precisa Rocha et al. (2015). La generación de caudales, producción de sedimentos, y las cargas de contaminación de NPS son calculadas separadamente en las HRU, para luego ser totalizadas y determinar los caudales y cargas totales de la subcuenca (Liu et al., 2016).

### Calibración y validación de modelos

La calibración del modelo es el procedimiento que ajusta las variables de entrada para optimizar la relación entre la información observada y los resultados de la simulación del modelo, mientras que la validación del modelo es el proceso que demuestra que un modelo hidrológico dado es capaz de efectuar predicciones adecuadas para periodos distintos al periodo de calibración. Un buen resultado de la validación muestra que el modelo calibrado es un buen simulador de la información observada y que no genera sobre-estimaciones de los datos observados en el periodo de calibración (Liu et al., 2016).

Tanto los modelos GR2M como SWAT fueron ejecutados desde 1978 a 1997. El periodo 1982-1991 y 1992-1997 fueron seleccionados como los periodos de calibración y validación, respectivamente. Los primeros cuatro años (1978-1981) fueron considerados como periodo de calentamiento "warm up" para minimizar la incertidumbre de las condiciones iniciales de los modelos (p.ej. humedad del suelo, nivel de las aguas subterráneas, residuos de cosechas, otros) como lo refiere Niraula et al. (2013).

El modelo GR2M estructurado en Microsoft Excel (Perrin & Andréassian, 2006) permitió efectuar la calibración automática del modelo a través del uso de la herramienta Solver. Para el caso del modelo SWAT se adoptó técnicas de calibración manual, que consistió en la identificación de las variables a modificar a través del análisis de los hidrogramas de caudales observados y simulados, y la modificación integral de los parámetros por defecto mediante un código computacional desarrollado en lenguaje de programación R.

### Desempeño de los modelos

Para la calibración y validación, así como para la inter-comparación de los modelos, se requiere de información cuantitativa para medir el desempeño del modelo en relación a los datos observados (Zhang et al., 2013). En este estudio los registros de caudales medios diarios y mensuales de la estación Puente Carretera Huanané fueron utilizados para evaluar la exactitud de las predicciones de los modelos evaluados, a través del uso del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Ec. (1)) (Nash & Sutcliffe, 1970) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) (Ec. (2)) (Mihon et al., 2013).

$$NSE = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right)$$

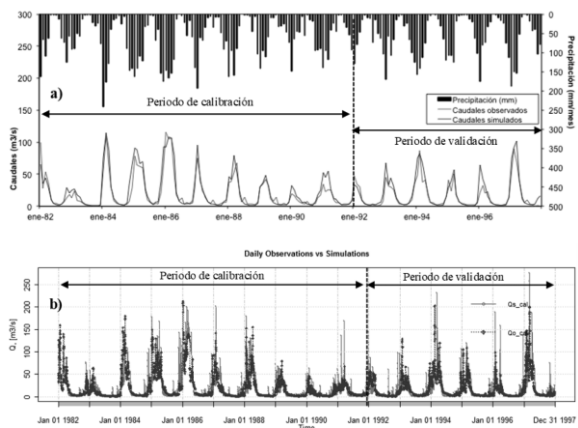
Donde O<sub>i</sub> es el caudal observado, P<sub>i</sub> es el caudal simulado en el tiempo i y  $\bar{O}$  es el promedio de los caudales observados, los rangos de NSE varían entre -∞ y 1.0 y el valor de 1.0 indica que el hidrograma de caudales simulados encaja perfectamente con los datos observados.

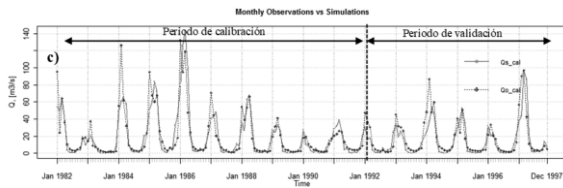
$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \right\}^2$$

Donde O<sub>i</sub> es el caudal observado, P<sub>i</sub> es el caudal simulado en el tiempo i,  $\bar{O}$  y  $\bar{P}$  son los promedios de los caudales observados y simulados, respectivamente. R<sup>2</sup> varía desde 0 a 1.0 (en caso de relación lineal positiva) o desde -1.0 a 0 (en caso de una relación lineal negativa).

### Resultados y discusión

Ambos modelos GR2M y SWAT fueron capaces de simular los caudales mensuales con buena exactitud (Figura 4 y Tabla 2). De acuerdo a las estadísticas de desempeño el modelo GR2M presentó un mejor desempeño en la simulación de los caudales, durante los dos periodos los valores de NSE (>0.85) y R<sup>2</sup> (>0.85) estuvieron todos en el rango de muy bueno según lo establecido por Moriasi et al. (2007), lo que sugiere que este modelo representaría adecuadamente los caudales escurridos en cuencas de la región Hidrográfica del Titicaca, por lo que, puede ser aplicado satisfactoriamente en el área de estudio, como también lo refiere Vera y Obando, 2011. Sin embargo, existen algunas diferencias entre los valores simulados y observados, ya que sobrestiman ligeramente los caudales, principalmente en las épocas de lluvias. Los valores de los parámetros X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> que optimizaron el valor de NSE en la etapa de calibración fueron de 5.59 y 0.87, respectivamente.





**Figura 4.** Caudales observados y simulados en la estación Puente Carretera Huancané, desde enero de 1982 a diciembre de 1997. Caudales simulados empleando los modelos, a) GR2M, b) SWAT a paso diario y c) SWAT a paso de tiempo mensual.

Tabla 2. Medidas de desempeño de GR2M y SWAT durante los periodos de calibración y validación.

Modelo	Calibración		Validación	
	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>
GR2M	0.87	0.91	0.90	0.86
SWAT	0.74	0.75	0.68	0.70

El modelo SWAT también presenta un buen desempeño en la simulación de caudales en la CRH tal es así que en ambos periodos presentó valores de NSE ( $>0.68$ ) y R<sup>2</sup> ( $>0.70$ ) considerado como bueno según los rangos establecidos por Moriasi et al. (2007), muy a pesar de haberse ajustado manualmente en la fase de calibración únicamente los parámetros de prácticas de manejos de suelos (CN) y de flujo en el subsuelo (GW\_REVAP) en las 43 subcuencas y 934 HRU consideradas en el modelamiento. Los valores de los parámetros CN y GW\_REVAP que permitieron optimizar el NSE y R<sup>2</sup> fueron -30% del valor de CN por defecto (79) y 0.22, respectivamente.

Del análisis de los hidrogramas mensuales de los caudales observados y simulados con SWAT (Figura 4c) se observó que los caudales simulados principalmente en torno a marzo de 1984 y marzo 1994 fueron sobreestimados considerablemente, tanto en los periodos de calibración como en el de validación, respectivamente, lo que afectó el desempeño de los modelos en ambos periodos. Asimismo, debe destacarse que el modelo SWAT permitió reproducir satisfactoriamente los caudales para años calificados típicamente como húmedos (1985-1986) y secos (1991-1992).

El buen desempeño obtenido de la simulación con SWAT en la CRH bajo las limitaciones de calibración en el presente estudio, sugiere que efectuándose una calibración más adecuada que considere el ajuste del resto de parámetros del modelo SWAT se mejore considerablemente las estadísticas de evaluación de eficiencia, siendo

una alternativa inmediata el uso de SWAT-CUP, ya que dispone de más de 600 parámetros en 22 bases de datos (Rocha et al., 2015), que permitirán al modelador efectuar un adecuado proceso de calibración.

El muy buen desempeño obtenido por el modelo GR2M en los periodos de calibración y validación constituye un buen ejemplo que un modelo de 2 parámetros a veces es suficiente para lograr un buen desempeño en la simulación de caudales mensuales en una cuenca hidrográfica, como también lo refiere Bai et al. (2015).

## CONCLUSIONES

En este estudio se ha efectuado la comparación del desempeño de los modelos GR2M y SWAT para simular caudales medios mensuales en la CRH perteneciente a la Región Hidrográfica del Titicaca, por lo que, basados en los resultados del estudio se hicieron las siguientes conclusiones:

El modelo GR2M a pesar de ser un modelo agregado, logró reproducir satisfactoriamente las descargas medias mensuales en la CRH en los periodos de calibración y validación, por lo que, teniendo en cuenta las métricas de evaluación del desempeño se calificó su desempeño como muy bueno, logrando un muy buen ajuste global de los datos observados y simulados, los caudales de estiaje y los volúmenes de escurrimiento, por lo que, puede ser aplicado satisfactoriamente en el ámbito de estudio.

El desempeño del modelo SWAT en la capacidad de reproducir las descargas medias mensuales en la CRH puede calificarse como bueno, sin embargo, requiere de un proceso de calibración más exhaustivo para lograr coeficientes de eficiencia más significativos a los obtenidos en este estudio, a pesar de ello, el modelo SWAT ofrece ventajas significativas en la generación de descargas diarias y mensuales, ya que las asocia a temas calidad del agua, aspectos importantes para mejorar la gestión de recursos hídricos en la Región Hidrográfica del Titicaca.

En general, el estudio mostró que un modelo adecuadamente calibrado, muy a pesar de tener

un enfoque agregado, conceptual y de poca complejidad puede tener un muy buen desempeño en la simulación de caudales mensuales, por lo que, GR2M constituye un buen ejemplo que un modelo de 2 parámetros es suficiente para lograr un buen desempeño en la simulación de caudales mensuales, lo que sugiere que el modelo puede ser utilizado como una herramienta para la hidrología operativa y la planificación y gestión de los recursos hídricos.

El desempeño de los modelos hidrológicos depende de diversos factores, sin embargo, consideramos que el factor más importante corresponde a los datos de entrada al modelo (precipitación, temperatura y caudales), ya que si éstos son adecuados permitirán reducir las incertidumbres del modelo. Esto sugiere que se necesitan más inversiones para la recolección de datos y el monitoreo continuo de las cuencas hidrográficas.

## REFERENCIAS

- ANA (2010). Estudio de evaluación de recursos hídricos en la cuenca de los ríos Huancané y Suches. Informe Final. Perú. Autoridad Nacional del Agua.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. & Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, 73–89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Arsenault, R., Gatién, P., Renaud, B., Brissette, F. & Martel, J.-L. (2015). A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *J. Hydrol.* 529, 754–767. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.09.001
- Bai, P., Liu, X., Liang, K. & Liu, C. (2015). Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *J. Hydrol.* 529, 1030–1040. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.09.015
- Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *J. Hydrol.* 412–413, 291–296. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.046
- Chau, K.W., Wu, C.L. & Li, Y.S. (2005). Comparison of Several Flood Forecasting Models in Yangtze River. *J. Hydrol. Eng.* 10, 485–491. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:6(485)
- Eshtawi, T., Evers, M., Tischbein, B. & Diekkrüger, B. (2016). Integrated hydrologic modeling as a key for sustainable urban water resources planning. *Water Res.* 101, 411–428. doi:10.1016/j.watres.2016.05.061
- Johnson, M.S., Coon, W.F., Mehta, V.K., Steenhuis, T.S., Brooks, E.S. & Boll, J. (2003). Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *J. Hydrol.* 284, 57–76. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.07.005
- Laqui, W. (2010). Aplicación de redes neuronales artificiales a la modelización y previsión de caudales medios mensuales del río Huancané. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (2), 30–44.
- Lavado Casimiro, W.S., Labat, D., Guyot, J.L. & Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon-Andes basin. *Hydrol. Process.* 25, 3721–3734. doi:10.1002/hyp.8097
- Liu, Y., Yang, W., Leon, L., Wong, I., McCrimmon, C., Dove, A. & Fong, P. (2016). Hydrologic modeling and evaluation of Best Management Practice scenarios for the Grand River watershed in Southern Ontario. *J. Great Lakes Res.* doi:10.1016/j.jglr.2016.02.008
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., King, K.W., Griggs, R.L., Harmel, R.D. & Griggs, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 50 (3), 885–900.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.* 318, 200–214. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.06.046

- jhydrol.2005.06.014
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Niraula, R., Kalin, L., Srivastava, P. & Anderson, C.J. (2013). Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecol. Model.* 268, 123–133. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.08.007
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *J. Hydrol.* 303, 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- Perrin, C. & Andréassian, V. (2006). Application du modèle pluie-débit mensuel GR2M sous Excel. Recuperado de <https://webgr.inrae.fr/en/models/monthly-model-gr2m/>
- Rocha, J., Roebeling, P. & Rial-Rivas, M.E. (2015). Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Sci. Total Environ.* 536, 48–58. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.038
- Roche, M., Bourges, J., Cortes, J. & Mattos, R. (1991). El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual, Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca. ORSTON. Hisbol, La Paz, Bolivia.
- Rwasoka, D.T., Madamombe, C.E., Gumindoga, W. & Kabobah, A.T. (2014). Calibration, validation, parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2 – parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *Phys. Chem. Earth Pas ABC* 67–69, 36–46. doi:10.1016/j.pce.2013.09.015
- Sahu, R.K., Mishra, S.K. & Eldho, T.I. (2010). Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets. *Agric. Water Manag.* 97, 749–756. doi:10.1016/j.agwat.2010.01.005
- SENAMHI (2010). Mapa de clasificación climática del Perú. disponible en <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0240>.
- Sha, J., Swaney, D.P., Hong, B., Wang, J., Wang, Y. & Wang, Z.-L. (2014). Estimation of watershed hydrologic processes in arid conditions with a modified watershed model. *J. Hydrol.* 519, 3550–3556. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.10.063
- Surfleet, C.G., Tullos, D., Chang, H. & Jung, I.-W. (2012). Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. *J. Hydrol.* 464–465, 233–248. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.012
- Vera, H. & Felipe, O. (2011). Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del Río Ramis. *Revista Peruana Geo-atmosférica rpga* (3), 116-124.
- Vauchel, P. (2006). Hydraccess, software hidrológico, [http://www.m-pl.ird.fr/hybam/outils/ha\\_sp\\_dn\\_php](http://www.m-pl.ird.fr/hybam/outils/ha_sp_dn_php)
- Zhang, H., Wang, Y., Wang, Y., Li, D. & Wang, X. (2013). Quantitative comparison of semi- and fully-distributed hydrologic models in simulating flood hydrographs on a mountain watershed in southwest China. *J. Hydrodyn. Ser B* 25, 877–885. doi:10.1016/S1001-6058(13)60436-9

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y Autoridad Nacional del Agua (ANA) que facilitaron la información hidrometeorológica, para la realización del presente trabajo de investigación.