

Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú

Semi-distributed hydrological modeling in the Titicaca hydrographic region: case study of the Ramis river basin, Peru

Efrain Lujano Laura¹, Jesus David Sosa Sarmiento², Apolinario Lujano Laura³, Rene Lujano Laura⁴

^{1,2}Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú - ³Autoridad Nacional del Agua, Perú - ⁴Investigador independiente, Puno Perú
Correspondencia email: elujano28@gmail.com, jsosa@senamhi.gob.pe, apolex23@gmail.com, rlujano131@gmail.com

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido 30-09-2016
Artículo aceptado 05-12-2016
On line: 20-12-2016

PALABRAS CLAVES:

RS-MINERVE,
rio Ramis,
modelo sacramento,
modelización semidistribuida.

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la cuenca del río Ramis, ubicado en la región hidrográfica del Titicaca, Perú, con el objetivo de calibrar y validar el modelo hidrológico Sacramento (SAC-SMA) desde un enfoque semidistribuido. La información hidrometeorológica utilizada de precipitación pluvial, temperatura y caudal, corresponden a una serie de registro 2005 – 2016. La metodología de interpolación espacial de datos meteorológicos en la estación virtual, fue estimada mediante el procedimiento de Shepard y la evapotranspiración potencial por el modelo de Turc, estas metodologías vienen incorporados en la plataforma RS-MINERVE y son estimaciones automatizadas. La fase de calibración y validación del modelo, se realizó de forma aleatoria con el 70% y 30% del total de datos respectivamente. La evaluación estadística de eficiencia y error fueron medidos a través del coeficiente de Nash, coeficiente de Nash para valores del logaritmo y raíz del error medio cuadrático relativo. Los resultados son satisfactorios y se afirma que las salidas del modelo hidrológico representan adecuadamente los caudales de avenida y estiaje, constituyéndose como una alternativa para el fortalecimiento del pronóstico hidrológico a paso de tiempo diario del río Ramis.

ARTICLE INFO

Article received 30-09-2016
Article accepted 05-12-2016
Online: 20-12-2016

KEY WORDS:

RS-MINERVE,
river Ramis,
sacramento model,
semi-distributed modeling.

ABSTRACT

The present research was held in the basin of the river Ramis, located in the hydrographic region of Titicaca, Peru, with the objective of calibrating and validating the Sacramento hydrological model (SAC-SMA) from a semi-distributed approach. The hydrometeorological information used for rainfall, temperature and flow, correspond to a series of records 2005 - 2016. The methodology of spatial interpolation of meteorological data in the virtual station was estimated using the Shepard procedure and potential evapotranspiration by the model Turc, these methodologies are incorporated in the RS-MINERVE platform and are automated estimates. The calibration and validation phase of the model was performed randomly with 70% and 30% of the total data respectively. The statistical evaluation of efficiency and error were measured by the Nash coefficient, Nash coefficient for logarithm values and root mean square error. The results are satisfactory and it is stated that the outputs of the hydrological model adequately represent the flows of avenue and drought, constituting as an alternative for the strengthening of the hydrological forecast at the daily time step of the river Ramis.

INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de precipitaciones generalizadas, causan inundaciones por el incremento súbito de niveles y caudales en el río Ramis, resultando ser un impacto negativo por el aniego de viviendas, cultivos, familias damnificadas y pérdidas económicas. En este contexto el pronóstico hidrológico, constituye un aporte esencial y útil para tomar medidas preventivas ante un evento de crecida repentina. En la actualidad, el uso de herramientas para el pronóstico hidrológico es uno de los temas que aún no ha sido implementado en la zona de estudio, siendo una necesidad la calibración de parámetros de modelos hidrológicos que permitirán plantear propuestas para una adecuada gestión del riesgo de desastres.

El sistema RS-MINERVE (García *et al.*, 2015), muestra un enfoque de modelos conceptuales semidistribuidos utilizados para el pronóstico de caudales realizado por Jordan *et al.* (2012); García *et al.* (2011); Astorayme *et al.* (2015). Los modelos tienen dos principios, calibración y validación. El proceso de calibración se realiza normalmente de forma manual o mediante el uso de procedimientos automáticos basados en computadoras (Madsen, 2000). La calibración es el proceso de modificación de los parámetros de entrada a un modelo numérico hasta que la salida del modelo coincide con un conjunto observado de datos (Liu, 2009). En la calibración automática, los parámetros se ajustan automáticamente de acuerdo con un esquema de búsqueda especificada y medidas numéricas de la bondad del ajuste (Liu *et al.*, 2004; Madsen, 2000). El énfasis está en la inclusión de dos o más medidas de rendimiento para la calibración automática del modelo, es decir, multi-objetivo (Yapo *et al.*, 1998). En comparación con la calibración manual, la calibración automática es más rápido mientras cual sea el objetivo y relativamente fácil de implementar (Liu, 2009). RS-MINERVE cuenta con el algoritmo de optimización global Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA; Duan *et al.*, 1992) que está especialmente diseñado para proporcionar una estimación optimizada del conjunto de parámetro más probable. Seguidamente la validación es el

proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera de la calibración (Refsgaard y Knudsen, 1996).

Para modelar el proceso lluvia-escorrentía, se han desarrollado modelos que se basan en las representaciones conceptuales de los procesos físicos del flujo de agua agrupados en todo el área de la cuenca (Madsen, 2000). El modelo Sacramento (Burnash *et al.*, 1973; Burnash, 1995), es utilizado ampliamente en la predicción de crecidas en los centros de previsión del río a lo largo de los Estados Unidos. Así mismo resultados satisfactorios en la modelación hidrológica son demostrados por Ajami *et al.*, 2004; Anderson *et al.* (2006); Sorooshian *et al.* (1993); Gan y Burges (2006). El éxito de la modelación depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles para el proceso de calibración y validación. El objetivo del presente trabajo de investigación es calibrar y validar el modelo Sacramento mediante un enfoque semidistribuido, el cual nos permitirá simular los caudales medios diarios del río Ramis, y consecuentemente emitir reportes de nivel preventivo ante la presencia de evento extremos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Ramis (Figura 1), se encuentra ubicado entre las coordenadas UTM (WGS84, zona 19 sur); Este: 453,876 m – 271,772 m, Norte: 8'104,442 m – 8'447,692 m y altitud comprendida entre los 3,812 a 5,750 m.s.n.m.



Figura 1. Ubicación del área de estudio y estaciones hidrometeorológicas.

Base de datos

Se utilizó información de precipitación total (mm), temperatura media (°C) y caudales medios diarios (m^3/s), los registros corresponden a 15 estaciones hidrometeorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Figura 1), con un periodo de registro del 01 septiembre del 2005 al 31 de agosto del 2016. La base cartográfica de unidades de respuesta hidrología (URH) fueron delimitados en el entorno de ArcMap, cuyos parámetros son: Área (m^2),

Centro de gravedad de la cuenca (x e y) en metros y altitud (m.s.n.m.) correspondiente al centro de gravedad de las unidades de respuesta hidrología (Tabla 1). La altitud (z) de la estación virtual (centro de gravedad de la cuenca) se ha estimado mediante estadísticas zonales a partir del uso de modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Tabla 1.- Parámetros de las unidades de respuesta hidrología

Nombre	Área [m^2]	X [m]	Y [m]	Z [msnm]
URH1	319517957	386045	8302631	3830
URH2	54108182	370090	8306107	3835
URH3	544610129	372724	8335028	3841
URH4	1100314878	380154	8363947	3988
URH5	2781049096	324739	8403810	4312
URH6	1148460890	358622	8392231	4406
URH7	373000573	351774	8421311	4351
URH8	2906776568	402072	8404804	4263
URH9	1165357888	354391	8330226	3864
URH10	235074040	337183	8353619	3909
URH11	423535692	333047	8334266	4284
URH12	813011575	319350	8352392	3900
URH13	911630163	304454	8386561	4158
URH14	1993168891	297234	8343440	4281

Las estaciones virtuales fueron asociadas al centro de gravedad (Tabla 1) de las URH (x, y, z) y las variables meteorológicas fueron estimadas a través del método de interpolación Shepard (Shepard, 1968; Gordon y Wixom, 1978). La interpolación se realizó considerando un radio mínimo de 40000 metros. Otra variable de importancia es la evapotranspiración potencial (ETP) y para su estimación se utilizó la metodología propuesta por Turc (1955), que depende de la radiación solar global media en el suelo ($cal/cm^2/dia$), un factor de corrección considerado 0.37 para febrero y 0.40 para el resto de los meses. En el programa RS MINERVE la estimación de la ETP es de manera automática a partir del uso de temperatura, valores de latitud y longitud de la zona de estudio.

Modelo Sacramento (SAC-SMA)

El modelo hidrologico Sacramento Soil Moisture Accounting fue desarrollado en los años 70 (Burnash *et al.*, 1973) para optimizar las características de humedad en el suelo, distribuidos en diferentes niveles, con características racionales de percolación, para una eficiente simulación de descargas. Este modelo calcula la descarga total de la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) en función de los parámetros y condiciones iniciales. El esquema de funcionamiento, se muestra en la Figura 2.

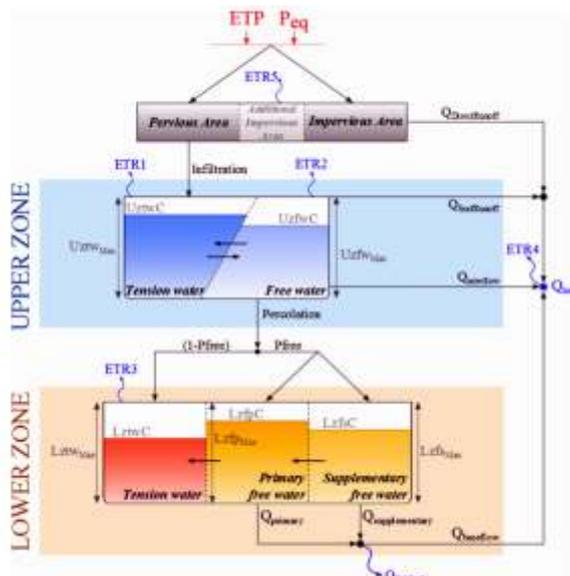


Figura 2.- Modelo Sacramento (SAC-SMA)

Fuente: García *et al.*, 2015

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} Q_{ref,t}^2} \quad (1)$$

$$Nash_{ln} = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln Q_{sim,t} - \ln Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} \ln \bar{Q}_{ref}^2} \quad (2)$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{n \bar{Q}_{ref}^2}} \quad (3)$$

donde, $t, simQ$ es la descarga simulada en el tiempo t (m^3/s), $refQ$, descarga observada en el tiempo t (m^3/s) y $refQ$ descarga promedio observado para el periodo considerado (m^3/s).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Configuración del modelo Sacramento (SAC-SMA)

La configuración inicial, se realizó mediante el uso

del entorno RS-MINERVE el cual requiere de información inicial procesada en un Sistema de Información Geográfica. La Figura 3 muestra los objetos que representan las unidades de respuesta hidrológica (URH), estaciones virtuales, confluencia de ríos, fuente y comparador entre caudales observados versus simulados. Así mismo se ha creado una base de datos de precipitaciones, temperatura y Caudal observada para estaciones hidrometeorológicas que se encuentran en el área de estudio.



Figura 3. Esquema de modelo hidrológico

Calibración y validación

Los parámetros optimizados en la etapa de calibración del modelo SAC-SMA (Tabla 3), los valores con superíndice* fueron optimizados mediante calibración automática a través del método de optimización global SCE-UA (Duan *et al.*, 1992), a través de los criterios de eficiencia y error establecidos por García *et al.* (2015). Así mismo siguiendo la recomendación de García *et al.* (2015) para mejorar el rendimiento en el proceso de calibración del modelo hidrológico, se optimizaron los parámetros para las estaciones meteorológicas (Tabla 2), entre ellos el coeficiente de corrección multiplicativo para datos de precipitación ($CoeffP$) y evapotranspiración ($CoeffETP$) y coeficiente de corrección aditivo para temperatura ($CoeffT$).

Tabla 2.- Parámetros optimizados para estaciones meteorológicas mediante el proceso de calibración automática

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
Coeff P	Coficiente de corrección multiplicativo	0.7497954*	-
Coeff T	Coficiente de corrección aditivo	1.0122690*	-
Coeff ETP	Coficiente de corrección multiplicativo	0.5255262*	-

Tabla 3.- Parámetros optimizados mediante el proceso de calibración automática

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
Adimp	Área impermeable adicional	0.0165845	-
Pctim	Fracción impermeable del área de la cuenca	0.0121372	-
Riva	Porción de la cuenca cubierta por vegetación ribereña	0.0000007	-
UztlwMax	Máximo almacenamiento de la zona de tensión superior	0.0305305*	M
UzflwMax	Máximo almacenamiento de la zona de agua libre superior	0.0364237*	M
Uzlk	Velocidad de vaciado lateral del depósito de agua libre superior	0.2275744*	l/d
Zperc	Máxima tasa de percolación	181.2301435*	-
Rexp	Exponente de la ecuación de percolación	2.3843899*	-
Rfree	Fracción de la percolación desde transmitida hacia la zona de agua libre inferior	0.2427891*	-
LztlwMax	Máximo almacenamiento de la zona de tensión inferior	0.1207233*	M
LzflpMax	Máximo almacenamiento de la zona de agua libre primaria inferior	0.1054621*	M
LzflsMax	Máximo almacenamiento de la zona de agua libre suplementaria inferior	0.2065109*	M
Rserv	Fracción del agua libre del acuífero que no está disponible para transpiración	0.5665773*	-
Lzpk	Tasa de descarga de la zona de agua libre primaria inferior	0.0076214*	l/d
Lzsk	Tasa de descarga de la zona de agua libre suplementaria inferior	0.0708698*	l/d
Side	Porción del flujo base que no es observada en el río (pérdida)	0.4825832*	-

La Figura 4, muestra una comparación entre el hidrograma observado y simulado de la fase de calibración y validación. De los resultados de evaluación estadística (Tabla 4), se deduce que en la etapa de calibración, el indicador de eficiencia de Nash es igual a 0.87, interpretado con un rendimiento muy bueno según los criterios establecidos por Moriasi *et al.* (2007) y un rendimiento bueno según Ritter y Muñoz-Carpena (2013), en cuanto a la simulación de caudales bajos en meses de estiaje, se tiene un Nash-In de 0.91. Por otro lado en la etapa de validación los resultados de los indicadores estadísticos de eficiencia de Nash baja a 0.84 y Nash-In a 0.90, empero mantienen características similares a los obtenidos en la etapa de calibración,

demonstrando ser lo suficiente flexible para adaptarse satisfactoriamente en la realización de pronóstico hidrológico de caudales medios diarios del río Ramis y ello es demostrado en caudales simulados fuera del periodo de calibración (Refsgaard y Knudsen, 1996). Se puede afirmar que un criterio de evaluación menor o igual a 0.50 o 50% proporcionan resultados insatisfactorios entre los hidrogramas observados y simulados por el modelo (Moriasi *et al.*, 2007). De la misma forma en términos de RRMSE, verificando la Tabla 4 en la etapa de calibración y validación los valores son suficientemente pequeños; 0.47 y 0.50 respectivamente y a partir de estas cifras, existe una coincidencia muy similar entre los valores simulados y observados.

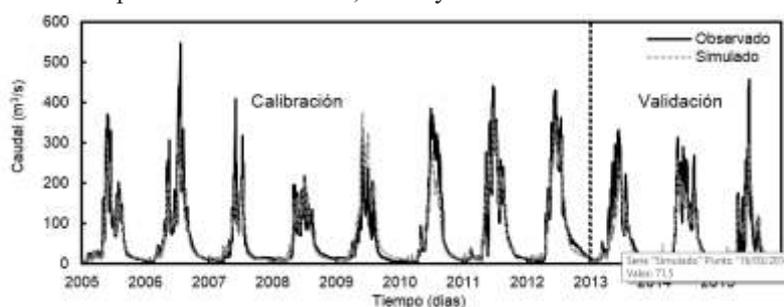


Figura 4.- Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de Calibración y Validación.

Tabla 4.- Evaluación estadística del modelo SAC-SMA

Indicador estadístico	Calibración	Validación
Nash	0.87	0.84
Nash-In	0.91	0.90
Raíz del error medio cuadrático relativo	0.47	0.50

CONCLUSIONES

La modelización hidrológica semidistribuida aplicado en la región hidrográfica del Titicaca, Perú, caso de estudio la cuenca del río Ramis, muestra resultados satisfactorios y se afirma que las salidas del modelo hidrológico representan adecuadamente los caudales en periodos de avenida y estiaje, constituyéndose como una alternativa para el fortalecimiento del pronóstico hidrológico a paso de tiempo diario y consecuentemente para la emisión de alertas tempranas ante un probable suceso de eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen muy especialmente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Perú, que facilitaron la información hidrometeorológica para la realización del presente estudio de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AghaKouchak, A., y Habib, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education*, 26(4), 963-973.
- Anderson, R. M., Koren, V. I. y Reed, S. M. (2006). Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates. *Journal of Hydrology*, 320, 103–116.
- Astorayme, M. A., García, J., Soares, W., Felipe, O., Huggel, C., y Molina, W. (2015) Modelización Hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica*, 4, 109-124.
- Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T., y Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semidistributed hydrologic model for streamflow estimation

along a river system. *Journal Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates. Journal of Hydrology*, 320, 103-116.

- Burnash, R. J., Ferral, R., y McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system – Conceptual modelling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources, p 204.
- Burnash, R. J. (1995). The NWS River Forecast System - catchment modeling. In: Singh, V. P. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*, 311-366.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Management*, 28(4), 1015-1031.
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O., y Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1), 47-63.
- Gan, T. Y., y Burges, S. J. (2006). Assessment of soil-based and calibrated parameters of the Sacramento model and parameter transferability. *Journal of Hydrology*, 320, 117–131.
- García, J., Paredes, J., Foehn, A., y Roquier, B. (2015). *RS MINERVE–Technical manual v1.14*. RS MINERVE Group, Switzerland.
- García, J., Schleiss, A., y Boillat, J. (2011). Decision Support System for the hydropower plants management: the MINERVE project.
- Gordon, W., y Wixom, J. (1978). Shepard's method of “metric interpolation” to bivariate and multivariate interpolation. *Math. of Computation*, 32(141), 253–264.
- Jordan, F., García, J., Boillat, J. L., Bieri, M., De Cesare, G., y Schleiss, A. (2012). Prévission des crues sur le Yangtsé –Application du concept MINERVE. *Wasser Energie Luft*, 104, 282-288.

- Krause, P., Boyle, D. P. y Båse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Liu, Y. (2009). Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36, 9533-9538.
- Liu, Y., Khu, S. T., y Savic, D. A. (2004). A fast hybrid optimisation method of multi-objective genetic algorithm and k-nearest neighbour classifier for hydrological model calibration. *Lecture Notes in Computer Science*, 3177, 546-551.
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, (235), 276-288.
- Masmoudi, M. y Habaieb, H. (1993). The performance of some real-time statistical flood forecasting models seen through multicriteria analysis. *Water Resources Management*, 7(1), 57-67.
- McCuen, R.H., Knight, Z. y Cutter, A.G. (2006). Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M. W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., y Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., y Sutcliffe J. V. (1970), River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nóbrega, M. T., Collischonn, W., Tucci, C.E.M., y Paz, A.R. (2011). Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 585-595.
- Refsgaard, J., y Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, (32), 2189-2202.
- Ritter, A. y Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments, *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In Proc. ACM National Conference, 517-524.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., y Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 73-117.
- Sorooshian, S., Duan, Q., y Gupta, V.K., (1993). Calibration of rainfall runoff models: application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting model. *Water Resour. Res.* 29, 1185-1194.
- Turc, L. (1955). Le bilan de l'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agro.*, (6), 5-152.
- Yapo P.O., Gupta H.V., y Sorooshian S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 181, 23-48.

