

Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin

Juan José Cabrera-Balarezo, Luis Manuel Timbe-Castro & Patricio Javier Crespo-Sánchez

*Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
juan.cabrera91@ucuenca.edu.ec, luis.timbe@ucuenca.edu.ec, patricio.crespo@ucuenca.edu.ec*

Received: March 14th, 2018. Received in revised form: February 4th, 2019. Accepted: March 25th, 2019.

Abstract

In this study, the performance of the HEC-HMS model was evaluated for the simulation of rain-runoff processes in a paramo basin of approximately 21.8 km², south of Ecuador. The calibration and validation comprise the period of July-2013 to June-2016 with daily data. The Soil Moisture Accounting (SMA) method was used to compute the water flow in the soil. For the rainfall distribution, the Thiessen method was used, while the Evapotranspiration was calculated with the Penman-Monteith equation. The results revealed that (1) 83% of the water infiltrates the soil while only 17% is retained in plants and the soil surface, (2) the water is retained for approximately 42 days before reaching the river and (3) that more than 60% of the flow corresponds to sub-surface flow.

Keywords: HEC-HMS; calibration; validation; andean paramo wetlands; rainfall-runoff.

Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo

Resumen

En este estudio se evaluó el desempeño del modelo HEC-HMS, para la simulación de los procesos de lluvia-escorrentía en una cuenca de páramo de aproximadamente 21.8 km² al sur del Ecuador. La calibración y validación comprende el periodo de julio-2013 a junio-2016 con datos diarios. Se usó el método de Contenido de Humedad del Suelo (SMA) para calcular el flujo de agua en el suelo. Para la distribución de la lluvia se utilizó el método de Thiessen, mientras que la evapotranspiración se calculó con la ecuación de Penman-Monteith. Los resultados revelaron que (1) el 83% del agua se infiltra en el suelo mientras que solo el 17% es retenido en plantas y la superficie del suelo, (2) el agua es retenida por aproximadamente 42 días antes de llegar al río y (3) que más del 60% del flujo corresponde a flujo sub-superficial.

Palabras clave: HEC-HMS; calibración; validación; páramo; precipitación-escorrentía.

1. Introduction

El entendimiento y el estudio de la dinámica de los procesos de lluvia-escorrentía son fundamentales para la conservación y mitigación de los cambios del uso del suelo y los impactos del cambio climático [1]. Los páramos de los Andes, ubicados en su gran parte en América Central y América del Sur en los países de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú entre 11°N-8°S, proporcionan una gran variedad de servicios de ecosistema [2]. Los más importantes son: proporcionar una gran cantidad de agua limpia todo el

año [3,4], regular el caudal y almacenar carbono [5], y como un soporte a la biodiversidad endémica [6]. Los páramos están particularmente afectados por los controladores del cambio global [7,8] tales como cambios en el uso de suelo y cambio climático.

El páramo normalmente se encuentra en altitudes superiores a los 3500 m s.n.m. [9] y muy pocas veces por debajo de los 2800 m s.n.m. [10]. Es un ecosistema frágil y susceptible a impactos antropogénicos y al cambio climático, esto puede alterar su dinámica afectando negativamente tanto a la biodiversidad como a su capacidad funcional [11]. El

agua originada en el páramo es utilizada por millones de personas y ayuda al desarrollo del sustento socio-económico de ciudades ubicadas en los Andes como son Mérida, Bogotá, Cuenca y Quito [12]. En el Ecuador el páramo cubre aproximadamente el 10% de la superficie terrestre y el agua se usa para la generación de energía eléctrica, irrigación, usos industriales, como también para el consumo humano [2,3].

Existe una gran variedad de modelos hidrológicos que se han desarrollado para estimar los diferentes componentes del ciclo hidrológico. En la actualidad, la clasificación más popular considera la discretización espacial de la información; categorizando los modelos hidrológicos en agregados, distribuidos y semi-distribuidos. Los modelos agregados consideran valores promedios de las variables/parámetros para toda la cuenca de drenaje. Generalmente estos valores no pueden obtenerse directamente de mediciones físicas, requiriendo de un proceso de calibración para su determinación. Los modelos conceptuales agregados están desarrollados como reservorios que representan los diferentes procesos hidrológicos. En los modelos distribuidos la cuenca se discretiza en elementos (regulares o irregulares) que permiten considerar la variabilidad espacial de la información (p.e. lluvia, suelo). Por lo general, estos modelos son físicamente-basados (parámetros pueden obtenerse de mediciones físicas) a nivel de celda. Sin embargo, también requieren de un proceso de

calibración para obtener valores promedio a nivel de celda. Los modelos semi-distribuidos dividen la cuenca en varias subcuencas, permitiendo tener una respuesta hidrológica particular en cada subcuenca.

Existen pocos modelos desarrollados específicamente para simular los procesos hidrológicos en el páramo, entre ellos tenemos el desarrollo de dos modelos, uno en Ecuador [13] que es un modelo conceptual agregado y otro en Perú [14] que es un modelo basado espacialmente (distribuido). Otros paquetes hidrológicos generales, como el modelo conceptual PDM se ha usado para el análisis de sequía [15] en una cuenca de Ecuador y el modelo semi-distribuido TOPMODEL basado en la topografía fue aplicado en una cuenca en Colombia [16] y una en Ecuador [17].

El principal objetivo de estudio es la calibración y validación del modelo hidrológico HEC-HMS para un ecosistema de páramo; que permita disponer de una herramienta para realizar un manejo técnico de los recursos hídricos y para la toma de decisiones en las políticas de conservación y el uso eficiente de dichos recursos [18]. El modelo debidamente validado ayudará a mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos en estos ecosistemas y a futuro permitirá realizar otros análisis (p.e. cambio climático, uso suelo) y/o la implementación de modelos de mayor complejidad.

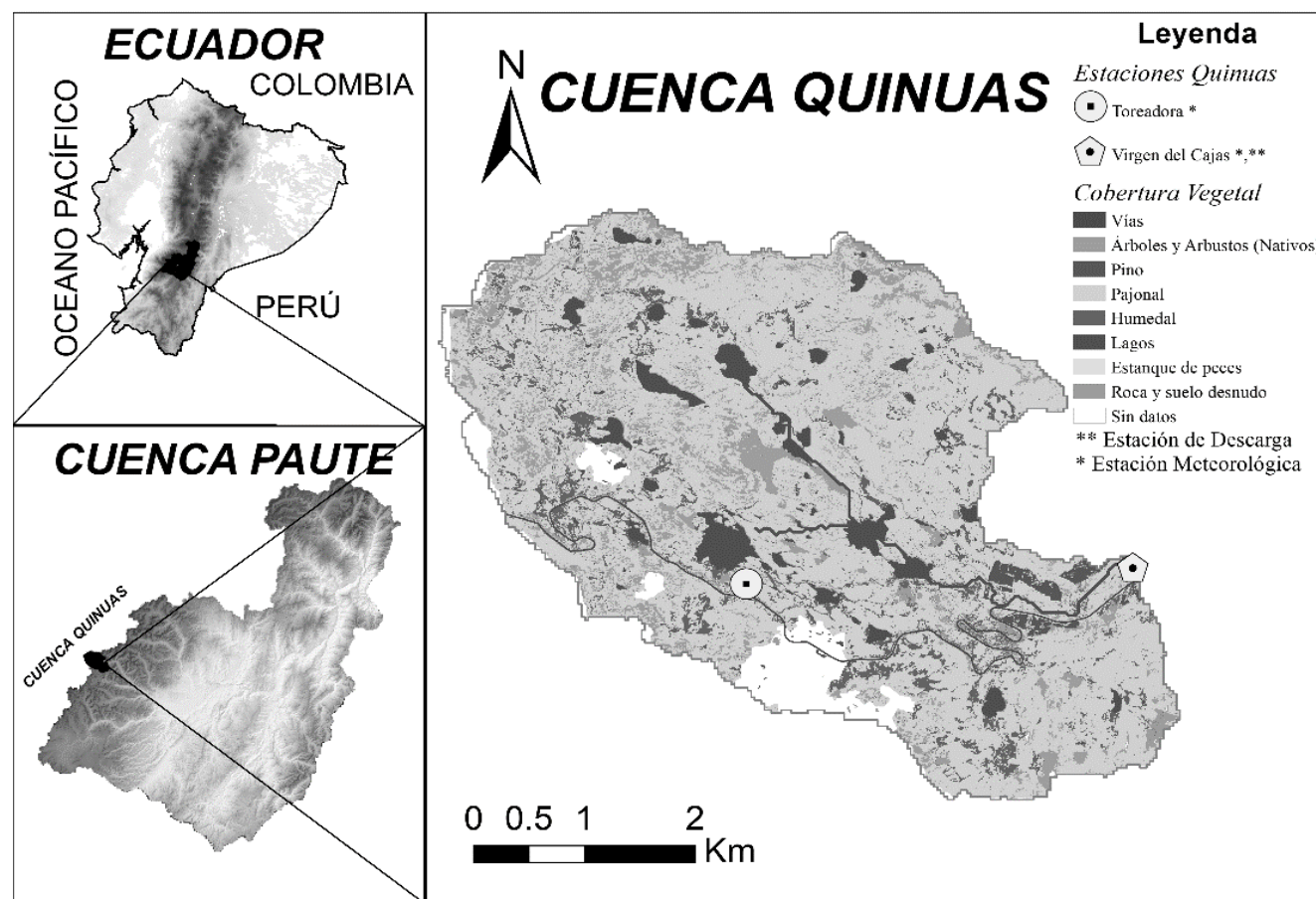


Figura 1. Zona de estudio, cobertura vegetal y localización de los sensores de medición.
Fuente: Los Autores.

2. Metodología

2.1. Área de Estudio

El estudio se realizó en la parte alta de la cuenca del río Quinuas (sur del Ecuador) que tiene un área aproximada de 21.8 km² y un gradiente altitudinal que está entre los 3612 y 4400 m s.n.m. Los principales grupos de suelos en el área de estudio son los Andosoles e Histosoles. Los Andosoles se forman a partir de material volcánico con un desarrollo relativamente pequeño del horizonte: formados por un horizonte Ah oscuro con alto contenido carbónico orgánico sobre un horizonte mineral C que es generalmente alto en arcilla [19,20]. Los Histosoles consisten en un horizonte H altamente orgánico, son suelos localizados principalmente en el fondo de los valles, pueden tener varios metros de profundidad y permanecer saturados durante la mayor parte del año [17,20,21]. Los andosoles e histosoles son húmicos y ácidos, tienen una estructura extremadamente porosa con una capacidad muy alta de retención de agua y baja densidad aparente [19,20,22-24]. La vegetación dominante es el pajonal (*Calamagrostis* sp. y *Festuca* sp.) en los Andosoles y plantas de cojín (*Plantago* rigida, *Xenophyllum* humile, *Azorella* spp.) en los Histosoles [20].

El clima del sitio de estudio está influenciado mayormente por las masas de aire de la cuenca del Amazonas, en menor intensidad por la Zona de Convergencia Intertropical y en pocos casos por las masas de aire del oeste (influencia de la corriente de Humboldt). La precipitación media anual varía entre 991 y 1244 mm. La temperatura media es de 6.8 °C, con valores máximos de 18.6°C y mínimos de hasta -2.9°C. La humedad relativa promedio mensual es de 91%. La radiación solar y la temperatura son relativamente constantes durante el año, pero a lo largo del día varían de forma extrema y bien marcada [25,26].

2.2. Información disponible

La cuenca está monitoreada por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. Se dispone de dos estaciones meteorológicas completas (Toreadora y la Virgen del Cajas) y una estación de caudal a la salida de la cuenca (Virgen del Cajas), con monitoreo continuo desde octubre de 2012 (Fig. 1).

Para calcular la precipitación promedio de la cuenca se usó el método de Thiessen [27]. En la Fig. 2 se presenta la precipitación ponderada (mm) y el caudal (l s⁻¹), faltando datos de caudal en el mes de junio-2015, por esta razón el período de validación seleccionado fue de julio-2015 a junio-2016. Las precipitaciones y caudales observados varían entre 0 mm a 22.1 mm y 75.1 l s⁻¹ a 1460.6 l s⁻¹ respectivamente. Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se utilizó el método de Penman-Monteith recomendado por la FAO [27].

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

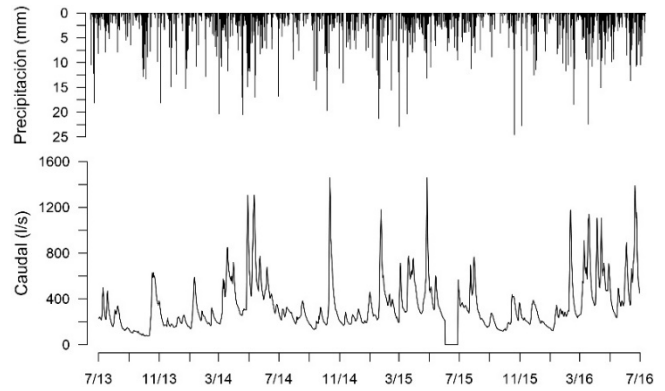


Figura 2. Precipitación y caudal diario en la cuenca del río Quinuas.

Fuente: Los Autores

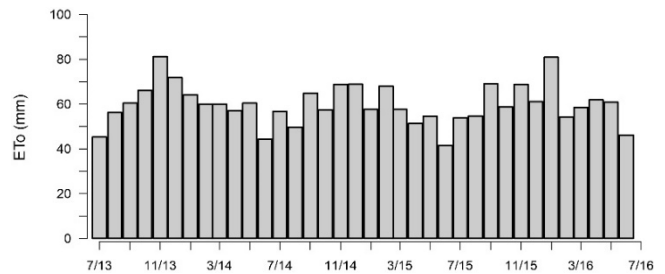


Figura 3. Evapotranspiración de referencia en la cuenca del río Quinuas.

Fuente: Los Autores.

Se usó el software ETo calculator [28] para el cálculo de éste parámetro en el periodo seleccionado. La Fig. 3 presenta la ETo mensual calculada para la zona de estudio, la cual varía entre 41.6 mm a 81.2 mm.

2.3. Descripción del modelo

El sistema de modelamiento hidrológico (HEC-HMS) es de uso libre, desarrollado por el centro de ingenieros de las fuerzas armadas de los Estados Unidos y permite modelar tanto eventos independientes como períodos continuos. Este paquete dispone de varias opciones para calcular los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Inicialmente fue desarrollado para simular los procesos de lluvia-escorrentía en cuencas dendríticas, pero luego fue mejorado para resolver una amplia gama de problemas incluyendo: suministro de agua de cuencas grandes, hidrogramas de inundaciones y escorrentía de pequeñas cuencas urbanas o naturales [29].

Para el modelamiento hidrológico HEC-HMS tiene 4 componentes: 1) Modelo de la cuenca, 2) Modelo meteorológico, 3) Especificaciones de control y 4) Datos de entrada. Todos los parámetros físicos de la cuenca como las conexiones y parámetros de escorrentía están incluidos en el modelo de la cuenca. El modelo meteorológico incluye la precipitación que puede estar en forma de lluvia o nieve y la evapotranspiración. La estructura conceptual del HEC-HMS representa los diferentes procesos hidrológicos mediante reservorios [30]. El primer reservorio es Canopy interception, éste simula el agua interceptada por la vegetación; el siguiente es Surface depression, que describe el agua

Tabla 1.
Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto.

| | Parámetros | Condiciones Iniciales | Significado | Rangos de variación por defecto (Parámetros) |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|--|--|
| Canopy | Max Storage (mm) | Initial Storage (%) | Almacenaje máximo, Almacenaje inicial | 0.001 - 1500 |
| | Max Storage (mm) | Initial Storage (%) | Almacenaje máximo, Almacenaje inicial | 0.001 - 1500 |
| | Max infiltration (mm/hr) | Soil (%) | Infiltración máxima, Suelo | 0.01 - 500 |
| | Impervious (%) | Groundwater r 1 (%) | Zonas impermeables, agua subterránea 1 | 0 - 100 |
| | Soil Storage (mm) | | Almacenaje del suelo | 0.01 - 1500 |
| Surface | Tension Storage (mm) | | Almacenaje en zona de tensión | 0.01 - 1500 |
| | Soil Percolation (mm/hr) | | Percolación del suelo | 0.01 - 500 |
| | GW 1 Storage (m) | | Almacenaje en agua subterránea 1 | 0.01 - 1500 |
| | GW 1 Percolation (mm/hr) | | Percolación en agua subterránea 1 | 0.01 - 500 |
| | GW 1 Coefficient (hr) | | Coefficiente en agua subterránea 1 | 0.01 - 10000 |
| | GW 2 Storage (m) | | Almacenaje en agua subterránea 2 | 0.01 - 1500 |
| | GW 2 Percolation (mm/hr) | | Percolación en agua subterránea 2 | 0.01 - 500 |
| | GW 2 Coefficient (hr) | | Coefficiente en agua subterránea 2 | 0.01 - 10000 |
| Transform | Time of Concentration (hr) | | Tiempo de concentración | 0.0167 - 1000 |
| | Storage Coefficient (hr) | | Coefficiente de almacenaje | 0.01 - 1000 |
| Baseflow | GW 1 Storage Coefficient (hr) | GW 1 Initial (%) | Coefficiente de almacenaje en agua subterránea 1, Cantidad inicial en agua subterránea 1 | 0.01 - 10000 |
| | GW 2 Storage Coefficient (hr) | GW 1 Initial (%) | Coefficiente de almacenaje en agua subterránea 2, Cantidad inicial en agua subterránea 1 | 0.01 - 10000 |

Fuente: Los Autores.

interceptada en la superficie del suelo. El tercer reservorio es Soil profile storage, el cual está dividido en 2 sub-reservorios que representan el agua disponible y el agua en tensión del suelo. Los 2 últimos reservorios son Groundwater layer storage, los cuales simulan las capas sub-superficiales del suelo, de éstos sale el flujo base.

Para representar todo el modelo se requieren diecisiete parámetros y seis condiciones iniciales que se detallan en la Tabla 1, la cual también muestra el rango de variación de los parámetros. De los diecisiete parámetros dieciséis fueron calibrados, el porcentaje de zonas impermeables de la cuenca (“impervious”) no fue considerado ya que en la zona de estudio no se tienen superficies impermeables (es insignificante); por lo tanto, se asignó el valor de cero para este parámetro. Para establecer las condiciones iniciales se utilizó un período de calentamiento “warm-up”, con el objetivo de obtener valores razonables de los parámetros al inicio del período de calibración.

2.4. Calibración y validación

El proceso de calibración es esencial en la modelación hidrológica, permitiendo ajustar los parámetros para que la simulación del hidrograma reproduzca satisfactoriamente los registrados observados en la cuenca. Calibrado el modelo hidrológico se procede a la validación, empleando un período de datos no usado en la calibración.

El período seleccionado para la calibración fue de julio-2013 a diciembre-2014, mientras que el periodo de validación fue julio-2015 a junio-2016. Para la calibración primero se hizo una aproximación del flujo base, es decir, al inicio se calibraron los parámetros que controlan el flujo base que en este caso son: GW 1 Storage, GW 1 Percolation y GW

1 Coefficient; junto con Soil Percolation que determina la cantidad de agua entrante para el agua subterránea. A continuación, se procedió a calibrar los demás parámetros, ya con un conocimiento previo del rango de valores de los parámetros que controlan el flujo base.

En una primera etapa se procedió a realizar la calibración manual (prueba y error) de los parámetros, con el objetivo de evaluar la influencia de cada parámetro en el hidrograma de salida del modelo. A continuación, se procedió a realizar una calibración semiautomática, usando el módulo “optimization trial” del HEC-HMS. En esta sección se debe elegir un método de búsqueda, una tolerancia, el número máximo de iteraciones y una función objetivo (Feldman, 2000). Como función objetivo se utilizó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), que se estima con la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

Donde E es el coeficiente adimensional, Q_{si} es el caudal calculado en el día i (m^3/s), Q_{oi} es el caudal observado en el día i (m^3/s), y \bar{Q}_o es el promedio de los caudales observados en los n días (m^3/s).

Este coeficiente muestra el nivel de ajuste entre los caudales observados y los caudales simulados. Cuando $E = 1$ la simulación es perfecta, esto significa que la varianza de errores es igual a cero; cuando $E = 0$, la simulación da como resultado valores semejantes al promedio de los caudales, y cuando $E < 0$ nos indica que el promedio de los caudales es una mejor solución que la obtenida por el modelo.

Adicionalmente se evaluó el desempeño del modelo en base al Error Absoluto Medio y a la Raíz del Error Cuadrático Medio (MAE y RMSE por sus siglas en inglés). El MAE

mide la magnitud de los errores en el período evaluado (promedio absoluto entre la observación y la predicción del modelo). El RMSE también evalúa la magnitud del error medio; pero considera las diferencias al cuadrado entre la observación y la predicción; por lo tanto, da mayor peso a los errores grandes. Ambas métricas pueden variar entre 0 y +infinito, mientras más cercano a cero mejor es el ajuste del modelo a las observaciones.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{oi} - Q_{si}|}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad (4)$$

3. Resultados y discusión

El objetivo del estudio fue evaluar el modelo hidrológico HEC-HMS para estimar la escorrentía superficial en la microcuenca del río Quinuas. Para la calibración y validación del modelo se usaron datos hidro-metroológicos diarios. La Tabla 2 presenta los parámetros estadísticos evaluados para el período de calibración y validación; adicionalmente para la estimación del flujo sub-superficial se consideraron una y dos capas de agua subterránea.

Los resultados muestran que en general el HEC-HMS tiene un buen desempeño. Como se muestra en la Tabla 2, el modelo predice apropiadamente el caudal promedio, con magnitudes similares al promedio observado. En cuanto al ajuste general del hidrograma observado (máximos y mínimos) también se tiene un buen ajuste para el periodo de calibración y validación, como se muestra en las Figs. 5 y 6.

Cuantitativamente este ajuste se evaluó con E, obteniendo en la calibración un valor de 0.65 y 0.74 para una y dos capas respectivamente. En cuanto al error de predicción promedio del modelo, estos son aceptables, y con valores similares del MAE y RMSE para una y dos capas. En el período de validación se obtuvo una E ligeramente superior a la calibración 0.81 (una capa) y 0.79 (dos capas). Los otros parámetros están en el mismo rango del período de calibración. Los coeficientes de escorrentía estimados del modelo con una y dos capas de agua subterránea son prácticamente iguales a los valores observados, tanto para el periodo de calibración como el periodo de validación.

Tabla 2. Estadísticas de caudales observados y simulados.

| Parámetro | Calibración | | Validación | |
|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | 1 capa de GW | 2 capas de GW | 1 capa de GW | 2 capas de GW |
| Caudal medio (mm) | | | | |
| Observado | 1.2 | | 1.49 | |
| Simulado | 1.21 | 1.17 | 1.45 | 1.44 |
| Desviación Estándar (mm) | | | | |
| Observado | 0.79 | | 0.92 | |
| Simulado | 0.82 | 0.81 | 0.82 | 0.88 |
| E (-) | 0.65 | 0.74 | 0.81 | 0.79 |
| MAE (mm) | 0.3 | 0.29 | 0.26 | 0.31 |
| RMSE (mm) | 0.47 | 0.4 | 0.4 | 0.42 |
| Coefficiente de Escorrentía | | | | |
| Observado | | | 0.51 | |
| Simulado | 0.45 | 0.44 | 0.49 | 0.49 |

Fuente: Los autores.

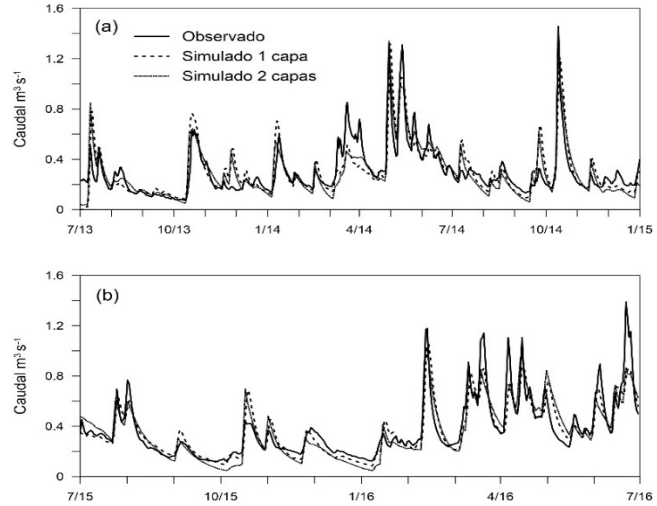


Figura 4. Hidrogramas diarios observado y simulado en la estación La Virgen para el período de (a) calibración y (b) validación.

Fuente: Los Autores.

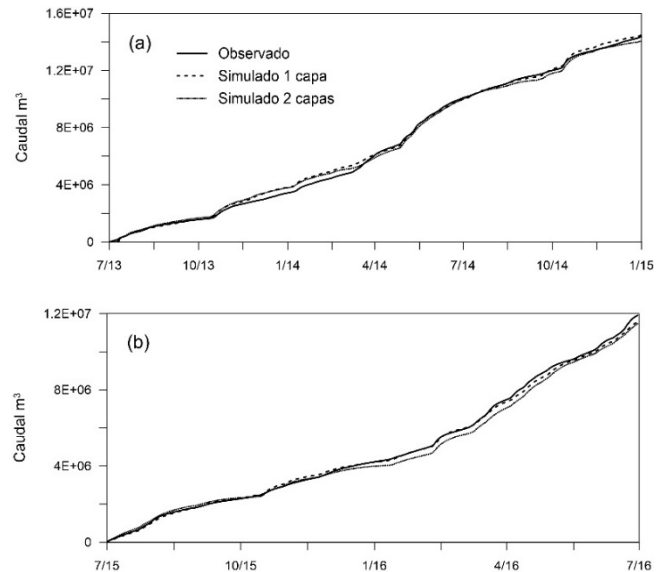


Figura 5. Caudal acumulado observado y simulado para el período de (a) calibración y (b) validación.

Fuente: Los Autores.

La Fig. 6 presenta el caudal acumulado para el período de calibración y validación. Como se puede observar, se tiene un buen ajuste entre el volumen simulado y observado. Para el período de calibración se tiene un error del volumen total de 6.7% y 3.6% al usar una y dos capas respectivamente; mientras que para la validación el error fue de 0.74% (una capa) y 2.3% (dos capas). Los resultados muestran que no hay diferencia significativa al usar una o dos capas de agua subterránea para el cómputo del flujo base.

La Tabla 3 presenta los valores finales de los parámetros del HEC-HMS obtenidos con la calibración. La mayor parte del agua infiltra en el suelo debido a la gran capacidad de percolación y las bajas intensidades de lluvia. Las intensidades de lluvia son menores a las tasas de infiltración del suelo, semejante a otras zonas de páramo [3].

Tabla 3.

Valores de los parámetros calibrados para 1 y 2 capas de groundwater.

| Parámetros | | 1 capa de GW | 2 capas de GW |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|
| Canopy | Max Storage (mm) | 0.06 | 0.06 |
| | Surface | 0.85 | 0.85 |
| Loss | Max infiltration (mm/hr) | 0.92 | 1 |
| | Impervious (%) | 0 | 0 |
| | Soil Storage (mm) | 0.99 | 4.9 |
| | Tension Storage (mm) | 0.78 | 3.8 |
| | Soil Percolation (mm/hr) | 15 | 1 |
| | GW 1 Storage (m) | 932 | 1500 |
| | GW 1 Percolation (mm/hr) | 0.34 | 1 |
| | GW 1 Coefficient (hr) | 1001 | 572 |
| | GW 2 Storage (m) | - | 198 |
| | GW 2 Percolation (mm/hr) | - | 1 |
| | GW 2 Coefficient (hr) | - | 122 |
| | Transform | Time of Concentration (hr) | 80 |
| Storage Coefficient (hr) | | 117 | 116 |
| Baseflow | GW 1 Storage Coefficient (hr) | 1.33 | 91 |
| | GW 2 Storage Coefficient (hr) | - | 122 |

Fuente: Los Autores.

Aproximadamente el 60% del flujo total corresponde a flujo sub-superficial o flujo base, resultado que se confirma con otros estudios previos en páramos, donde la mayoría del flujo es flujo sub-superficial [31-34].

4. Conclusiones y recomendaciones

El modelo HEC-MHS es capaz de simular satisfactoriamente los caudales de escorrentía en la cuenca de estudio, dando buenos resultados tanto en el coeficiente de Nash como para el caudal acumulado y en los coeficientes de escorrentía. Se observó que el flujo base es el componente dominante en el caudal total y que la mayor parte de la lluvia infiltra en el suelo gracias a su gran capacidad de percolación y a las bajas intensidades de la precipitación. El modelo presenta cierta debilidad para simular con mayor precisión los caudales máximos, teniendo sub-estimaciones y/o sobre-estimaciones en el periodo de análisis; sin embargo, en general se tiene un desempeño aceptable. No existe una diferencia significativa en usar dos capas en vez de una capa de agua subterránea para el tipo de condiciones geológicas compactas presentes en la zona. Para este caso se recomienda usar solamente una capa con el objetivo de reducir la cantidad de parámetros a calibrar y el tiempo de calibración del modelo.

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la SENESCYT y la Universidad de Cuenca por el financiamiento del Proyecto PIC-13-ETAPA-001 "Desarrollo de indicadores hidrológicos funcionales para la evaluación del impacto del cambio global en ecosistemas Andinos". Agradecemos los permisos de investigación otorgados por el MAE y ETAPA.

Bibliografía

[1] Beniston M., Climatic change in mountain regions: a review of

- possible impacts. In: Diaz, H.F. (eds), Climate variability and change in high elevation regions: past, present & future. *Advances in Global Change Research*, 15, pp. 5-31, 2003. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-015-1252-7_2
- [2] Célleri, R. and Feyen, J., The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), pp. 350-355, 2009. DOI: 10.1659/mrd.00007
- [3] Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., et al., Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Rev.*, 79(1-2), pp. 53-72, 2006. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- [4] Roa-García, M.C., Brown, S., Schreiber, H. and Lavkulich, L.M., The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resour Res.*, 47(5), pp. 1-12, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009582
- [5] Harden, C.P., Hartsig, J., Farley, K.A., Lee, J., Bremer, L.L., Crespo, P., et al., Effects of land-use change on water in Andean Páramo grassland soils. *Ann Assoc Am Geogr.*, 103, pp. 375-84, 2013. DOI: 10.1659/mrd.00007
- [6] Vuille, M., Climate change and water resources in the tropical Andes, *IDB Tech Not.*, Inter-American Development Bank, 29, 35 P., 2013.
- [7] Farley, K.A., Bremer, L.L., Harden, C.P. and Hartsig, J., Changes in carbon storage under alternative land uses in biodiverse Andean grasslands: implications for payment for ecosystem services. *Conserv Lett.*, 6, pp. 21-27, 2013. DOI: 10.1111/j.1755-263X.2012.00267.x
- [8] Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. and Tobón, C., Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Glob Ecol Biogeogr.*, 20, pp. 19-33, 2011. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x
- [9] Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De. and Wyseure, G., Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: a case study from the south Ecuadorian Andes. *J. Hydrol.*, 329, pp. 413-421, 2006. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.031.
- [10] Vásconez, P. y Hofstede, R., Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica Los Andes Cent.*, 2006, pp. 91-109.
- [11] Erwin, K.L., Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetl Ecol Manag.*, 17, pp. 71-84. 2009. DOI: 10.1007/s11273-008-9119-1.
- [12] Buytaert, W. and Bievre, B. De., Water for cities: the impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resour. Res.*, 48, pp. 1-13, 2012. DOI: 10.1029/2011WR011755
- [13] Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H.-G., Ramírez, M., et al., Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss.*, 9, pp. 2475-2510, 2012. DOI: 10.5194/hessd-9-2475-2012.
- [14] Flores-López, F., Galaiti, S.E., Escobar, M. and Purkey, D., Modeling of Andean páramo ecosystems' hydrological response to environmental change. *Water*, 8(3), pp. 1-18, 2016. DOI: 10.3390/w8030094
- [15] Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W. and Wyseure, G., Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrol Earth Syst Sci.*, 20(6), pp. 2421-2435, 2016. DOI: 10.5194/hess-20-2421-2016.
- [16] Gil-Morales, E.G. and Tobón-Marín, C., Hydrological modelling with TOPMODEL of Chingaza páramo, Colombia. *Rev Fac Nac Agron.*, 69(2), pp. 7919-7933, 2016. DOI: 10.15446/rfna.v69n2.59137.
- [17] Buytaert, W. and Beven, K., Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrol Process*, 25(11), pp. 1784-1799, 2011. DOI: 10.1002/hyp.7936
- [18] Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. and Weingartner, R., An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ Model Softw.*, 24, pp. 1209-1222. 2009. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.
- [19] Buytaert, W., Deckers, J. and Wyseure, G., Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (paramo). *Geomorphology* 73, pp. 207-221, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.06.012.
- [20] Mosquera, G.M., Lazo, P.X., Célleri, R., Wilcox, B.P. and Crespo, P., Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, pp. 120-128, 2015. DOI:

- 10.1016/j.catena.2014.10.010.
- [21] Baxter, S., World reference base for soil resources. World soil resources report 103. Rome: food and agriculture organization of the United Nations (2006), Journal Experimental Agriculture, 43(2), pp. 264-264, 2007. DOI: 10.1017/S0014479706394902
- [22] Podwojewski, P., Poulénard, J., Zambrana T. and Hofstede, R., Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). Soil Use Manag., 18, pp. 45-55, 2002. DOI: 10.1079/SUM2002100
- [23] Poulénard, J., Michel, J.C., Bartoli, F., Portal, J.M. and Podwojewski, P., Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian paramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. Eur J Soil Sci., 55, pp. 487-96, 2004. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00625.x
- [24] Poulénard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.L. and Collinet, J., Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. Catena, 45, pp. 185-207, 2001. DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00148-5
- [25] Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B. and Célleri, R., Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. Mt Res Dev., 35, pp. 230-239, 2015. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1
- [26] Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C.J., Orellana-Alvear, J., Abril, A. and Carrillo-Rojas, G., Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: implications for temperature mapping. Arctic, Antarctic Alp Res., 48, pp. 673-684, 2016. DOI: 10.1657/AAAR0015-077
- [27] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 300, FAO, Rome, 1998, pp. 1-15.
- [28] Raes, D., The ETo calculator table of contents - Reference Manual, 2009, pp. 1-38.
- [29] Scharffenberg, W.A. and Fleming, M.J., Hydrologic Modeling System User's Manual. Security 2010, 318 P. DOI: CDP-74A.
- [30] Bennett, T.H., Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the hydrologic engineering. Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), 1998.
- [31] Crespo, P.J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.G., et al., Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). J. Hydrol. 407, pp. 164-174, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.021
- [32] Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Feyen, J.A.N., Iñiguez, V., Borja, P., et al., Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems, 2010.
- [33] Mosquera, G.M., Célleri, R., Lazo, P.X., Vaché, K.B., Perakis, S.S. and Crespo, P., Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. Hydrol Process., 30, pp. 2930-2947, 2016. DOI: 10.1002/hyp.10927
- [34] Mosquera, G.M., Segura, C., Vaché, K.B., Windhorst, D., Breuer, L. and Crespo, P., Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem. Hydrol Earth Syst Sci., 20, pp. 2987-3004, 2016. DOI: 10.5194/hess-20-2987-2016

Juan J. Cabrera, es Ing. Civil en 2017 por la Universidad de Cuenca, Ecuador. Es actualmente asistente de investigación en Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Sus áreas de interés son: ecología y modelación hidrológica. ORCID: 0000-0003-4163-6040

L. Timbe, es Ing. Civil en 1993 por la Universidad de Cuenca, Ecuador y PhD en Ingeniería (Hidráulica de Ríos) en 2007 por la Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica. Es actualmente docente investigador principal en el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Sus áreas de interés son: hidráulica de ríos, inundaciones, hidrología y recursos hídricos. ORCID: 0000-0001-5623-0487

P. Crespo, es MSc. en Manejo y Conservación de Agua y Suelo en 2006 por la Universidad de Cuenca y PhD en Ciencias Naturales en 2012 por la Universidad de Giessen, Alemania. Es actualmente profesor principal y director del Centro de Hidrología y Clima del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Sus áreas de interés son: ecología, trazadores en la hidrología e impactos del cambio de uso de la tierra en la hidrología de ecosistemas andinos.

ORCID: 0000-0001-5126-0687



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105