

Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano

Raúl Fernando Vázquez Zambrano

Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente, Dirección de Investigación, Universidad de Cuenca,
Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador

E-mail: raulfvazquez@yahoo.co.uk

Fecha de recepción: 11 de octubre 2010 - Fecha de aceptación: 3 de noviembre 2010

RESUMEN

A pesar de su importancia, la hidrología de las cuencas de los Andes se conoce pobremente. Por ello, ante la creciente demanda de la sociedad por una explotación sostenible de los recursos hídricos y la conservación de cuencas altoandinas del Austro Ecuatoriano, es necesario emprender iniciativas de investigación para conocer, entre otros aspectos, las interrelaciones entre el clima y la hidrología de páramos y su capacidad de producción de agua. En este contexto, el presente artículo describe las experiencias de modelación hidrológica de una microcuenca altoandina ubicada al sur oeste de Cuenca (Ecuador), presentando el detalle del desarrollo del modelo en base a un código conceptual, agregado (NAM), así como algunos resultados preliminares de la modelación. El protocolo de modelación incluyó una aproximación determinista/estocástica en base a simulaciones Monte Carlo. Los resultados de la modelación son halagadores, lo cual alienta una revisión de la versión actual del modelo, incluyendo en el mismo la nueva información que se recabe en un futuro próximo, así como la aplicación del código hidrológico a otras subcuencas y cuencas altoandinas de interés.

Palabras clave: Páramo, región Andina, modelación numérica, incertidumbre, análisis de sensibilidad, simulaciones Monte Carlo, GLUE

ABSTRACT

Despite its importance, the hydrology of the Andean catchments is at the moment not well known. Hence, facing the continuously growing concern from society for a sustainable use of water resources and the conservation of mountain catchments of the Ecuadorian Austral region, it is relevant to start with research initiatives for getting to know, among other aspects, the interrelationships between climate and hydrology of páramos and the capacity of these ecosystems to “produce” water. In this context, the current manuscript describes some of the experiences modelling the hydrology of a micro-catchment located to the south-west of Cuenca (Ecuador), presenting some details of the model construction for the study site on the basis of a lumped conceptual code (NAM), as well as, some preliminary modelling results. The modelling protocol included a deterministic/stochastic approach based on Monte Carlo simulations. The initial modelling results are acceptable, which encourages the further improvement of the current version of the model, as well as, the further use of the numerical code on additional study sites such as Andean sub-catchments and catchments of interest.

Keywords: Páramo, Andean region, numerical modelling, uncertainty, sensibility analysis, Monte Carlo simulations, GLUE

1. INTRODUCCIÓN

El páramo es un ecosistema ubicado en las cumbres de algunas regiones tropicales de Centro y Sudamérica, Asia, África y Oceanía. En América, los páramos se distribuyen a lo largo de la

Cordillera de los Andes, en Ecuador, Colombia y Venezuela y en las montañas de Costa Rica, entre 3200-3300 y 4700-4800 m.s.n.m. (Sánchez y Santiesteban, 2004). Los ecosistemas altoandinos tienen un rol protagónico para sostener la forma de vida de miles de personas al proporcionarles servicios ambientales esenciales. El más importante de estos servicios es la regulación de los caudales y la producción de agua de excelente calidad (Buytaert, 2004). Sin embargo, a pesar de su importancia, la hidrología y su relación con los ecosistemas acuáticos de las cuencas de los Andes se conocen pobremente, por lo que se dificulta la gestión sostenible de sus recursos hídricos, en vista de que no se cuenta con un diagnóstico adecuado de la salud de los ecosistemas (incluyendo el grado de afección antropogénica) y del nivel de integración de estos ecosistemas y la hidrología (Buytaert y col., 2006; Célleri y Feyen, 2009).

Por ello, ante la creciente demanda de la sociedad por una explotación sostenible de los recursos hídricos y la conservación de cuencas altoandinas del Austro Ecuatoriano, es necesario emprender iniciativas de investigación para conocer (i) las interrelaciones entre el clima y la hidrología de páramos; (ii) la capacidad de producción de agua de los páramos; (iii) los efectos de las distintas coberturas vegetales en la producción hídrica de los páramos; (iv) las respuestas de los sistemas altoandinos al cambio climático global; etc. En este contexto, la modelación numérica está llamada a jugar un papel muy importante ya que puede constituirse en una herramienta muy útil de gestión de los recursos hídricos (Refsgaard, 1997).

La reciente y creciente mejora de los recursos computacionales ha hecho factible el desarrollo y aplicación de complejos modelos numéricos, espacialmente distribuidos, para evaluar diversos procesos a varias escalas incluyendo la de cuenca hidrográfica (Vázquez, 2003; Rankinen y col., 2006). Sin embargo, en vista de que las subcuencas y cuencas hidrográficas son sistemas heterogéneos y los procesos hidro-bio-geo-químicos que allí se suceden no son lineales, el empleo de este tipo de modelos se ha cuestionado recientemente con respecto a los procesos de definición de parámetros y calibración, tales como “equifinalidad” (varios juegos de parámetros producen predicciones similares) y “parameterización excesiva” (Beven, 1993; Refsgaard y col., 1997). Ante ello se argumenta que el empleo de modelos conceptuales constituye una alternativa mucho más eficiente que no adolece de problemas tales como el de “equifinalidad” en vista de que sus parámetros no representan necesariamente entidades físicas y, como tal, se puede identificar un solo conjunto de parámetros que optimicen la bondad de ajuste de las predicciones del modelo a las observaciones pertinentes (DHI, 2000).

A más de análisis estadísticos de series de tiempo de caudal y precipitación, pocos estudios hidrológicos, en particular de modelación numérica, se han llevado a cabo en la región interandina. Recién en la última década se han iniciado algunas actividades, pero la mayoría de ellas se ha concentrado en estudios a escala puntual o de parcela, dejando las escalas de microcuenca y subcuenca casi desatendidas en su totalidad. Estudios en micro-cuencas Andinas se han concentrado en el análisis de los procesos de generación de escorrentía (Braud y col., 1999; Perrin y col., 2001; Fleischbein y col., 2006), del impacto de plantaciones de bosque en la producción de agua (Buytaert y col., 2006; Patiño y col., 2006) y en los efectos del cambio de uso de tierras en la hidrología (Braud y col., 2001; Buytaert y col., 2004). Otros estudios se han concentrado en un solo componente del ciclo hidrológico como hidrofísica de suelos (Buytaert y col., 2002), interceptación de la lluvia (Fleischbein y col., 2005), o infiltración y erosión (Harden y Scruggs, 2003; Poulénard y col., 2001; Zehetner y Miller, 2006).

El presente artículo describe las experiencias de modelación hidrológica de una microcuenca altoandina ubicada en el Austro, al sur oeste de Cuenca. A diferencia de estudios anteriores, el presente ha llevado a cabo una simulación en continuo, efectuada en el contexto de un protocolo determinista/estocástico mediante el cual se ha analizado la sensibilidad de los parámetros principales del modelo numérico y definido límites de predicción que brinden una cuantificación del grado de confianza en el modelo numérico como potencial herramienta (operacional) de gestión. El estudio además ha buscado explorar si en efecto el empleo de un modelo conceptual agregado garantiza que el concepto de identificar un solo juego de parámetros del modelo numérico mediante calibración es enteramente válido.

2. MATERIALES

2.1. La microcuenca de estudio

El presente artículo describe las experiencias de modelación hidrológica de una microcuenca altoandina ubicada en el Austro, al sur oeste de Cuenca. La zona global de estudio (Quimsacocha) en la cual la microcuenca modelada se encuentra emplazada está conformada por un total de siete microcuencas (Figura 1). Esta zona global de estudio fue antes el cráter del volcán Quimsacocha, es accidentada con valles y llanuras, principalmente de formación glaciaria, con un rango de elevación que va desde los 2760 hasta los 3960 m.s.n.m. La precipitación en la zona es más o menos uniforme y está entre los 1060 y los 1600 mm anuales.

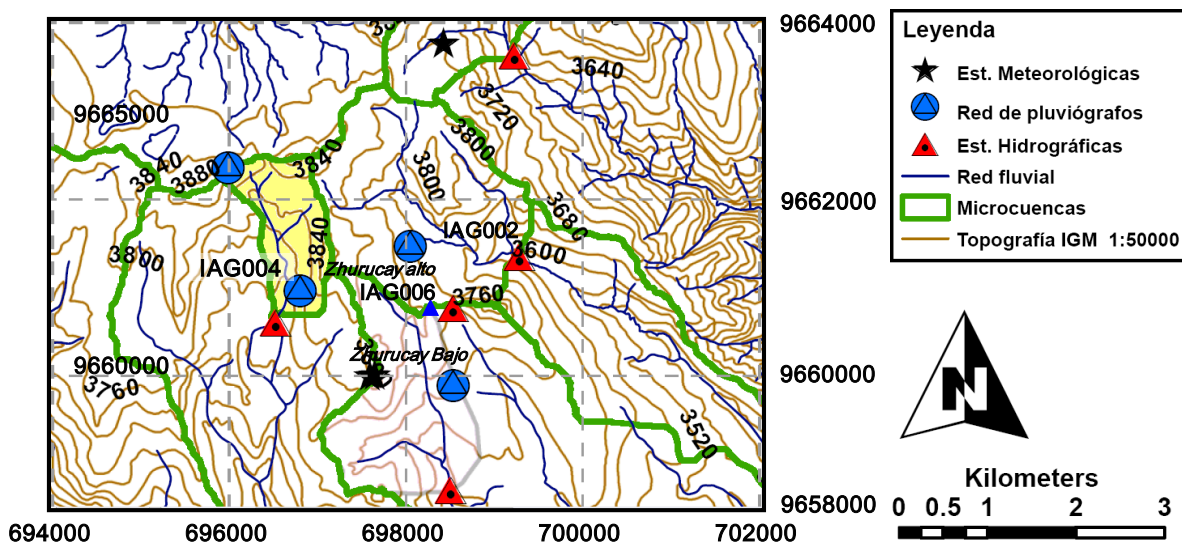


Figura 1. Ubicación de la microcuenca de estudio (Zhurucay alto) y distribución de las estaciones hidrométricas principales en parte de la zona global de estudio (Quimsacocha).

La microcuenca modelada corresponde al curso fluvial de Zhurucay alto (Figura 1). La microcuenca tiene un área aproximada de 1,34 Km² y cuenta con una estación hidrométrica a la salida de la misma (código IAG004; Figura 1) y una estación meteorológica en su parte central. La instrumentación de esta microcuenca se llevó a cabo recientemente con el objetivo de conducir investigaciones pertinentes a la hidrología de ecosistemas altoandinos. Para la presente modelación, se contó con series temporales observadas de caudal y lluvia, así como variables meteorológica tales como temperatura para la estimación de la evapotranspiración potencial (ET_p), en el período [1 de marzo de 2007 - 30 de noviembre de 2008]. En este período, se registró una lluvia media diaria de 3.99 mm (aproximadamente 1455 mm por año en promedio). La ET_p media diaria se estimó en 0,96 mm (aproximadamente 350 mm por año en promedio). El caudal medio diario fue de 2,70 mm (aproximadamente 985 mm por año en promedio).

2.2. El sistema de modelación NAM

El código NAM (DHI, 2000) que se ha empleado en la presente investigación forma parte del código MIKE 11 (Havnø y col., 1995). NAM representa varios componentes del proceso precipitación-escorrentía teniendo en cuenta el agua contenida en cuatro depósitos diferentes e interrelacionados entre sí (DHI, 2000; Vázquez y Feyen, 2008; Figura 2) que representan conceptualmente diferentes elementos físicos de la cuenca, es decir zona superficial, zona vadosa, zona saturada y depósito de nieve. Adicionalmente, pueden considerarse abstracciones del depósito subterráneo y riego (Figura 2). En vista de que NAM es un modelo agregado, éste trata a la cuenca hidrológica como una sola unidad, con sus parámetros representando valores medios para toda la cuenca (DHI, 2000; Céleri y

col., 2003; Vázquez y Feyen, 2008). NAM puede usarse tanto para modelación hidrológica continua (regímenes medios o de aportaciones), como para simular eventos singulares.

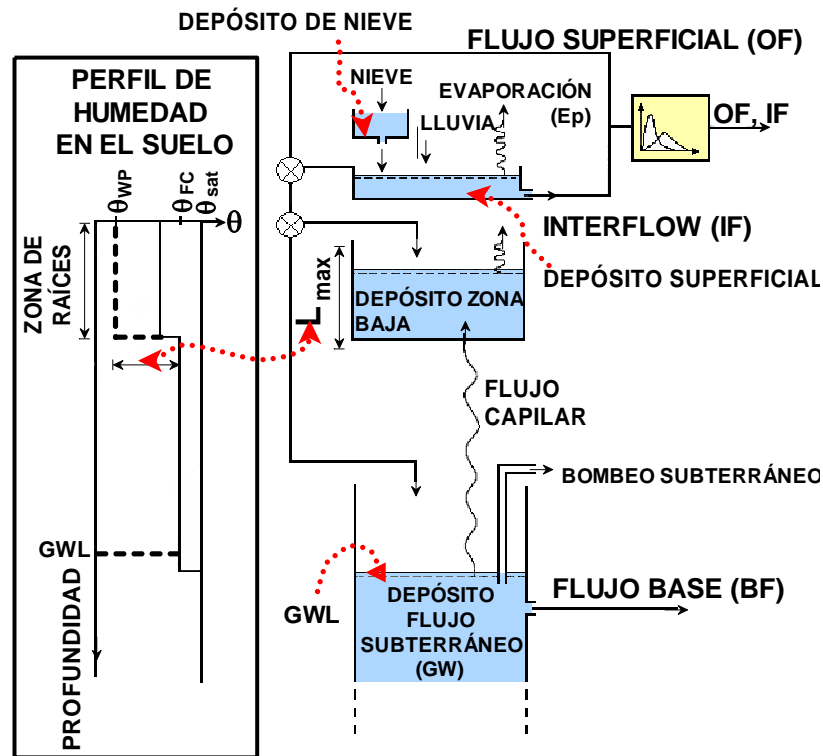


Figura 2. Diagrama de la estructura del modelo NAM (en base a DHI, 2000; Vázquez y Feyen, 2008).

La estructura del modelo NAM es muy simple y como tal los datos básicos que se necesitan para desarrollar el modelo numérico de una cuenca se limitan a series temporales de precipitación, ET_p , y escorrentía, así como a la superficie de la cuenca modelada. La serie temporal de escorrentía es necesaria para la calibración y evaluación del modelo. En vista de que NAM es un modelo conceptual (Vázquez y col., 2002; Vázquez y Feyen, 2008) es indispensable efectuar una calibración de los parámetros principales a fin de conseguir una bondad de ajuste aceptable con respecto a los datos observados del sistema (cuenca) que se modela. Además si se considera que NAM es un modelo agregado, es suficiente con efectuar un ensayo “split-sample” (Refsgaard, 1997; Vázquez, 2003) en el cual el intervalo para el que se dispone de observaciones se divide de manera simple en dos sub-intervalos tanto para la calibración como para la evaluación del modelo desarrollado.

3. MÉTODOS

3.1. Desarrollo del modelo de la microcuenca y determinación inicial de los valores de los parámetros

Como se anticipó, la estructura de NAM es muy simple y como tal la definición del modelo es sencilla. Para la construcción del modelo se tomaron en consideración las series temporales disponibles (lluvia y variables meteorológicas). La ET_p se estimó empleando las series temporales meteorológicas mediante el método 56 de la FAO (Food and Agriculture Organisation) que considera la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia (ET_0 ; pasto o hierba, por ejemplo) y coeficientes de cultivo para determinar la evapotranspiración potencial de cultivo (ET_c). La ET_0 se estima mediante la ecuación de Penman-Monteith. La descripción detallada del método se puede

encontrar en Allen y col. (1998). Los parámetros del método para los cuales no se contaba con valores medidos en campo se estimaron de la literatura especializada (Allen y col., 1998; Vázquez y Feyen, 2003).

Tabla 1. Rangos de variación de los valores de los parámetros incluidos en el presente análisis.

Descripción	Acrónimo	Unidad de medida	Límites del rango de variación	
			Bajo	Alto
Contenido máximo de agua en el depósito superficial	U_{\max}	[mm]	10	20
Contenido máximo de agua en el depósito de zona de raíces	L_{\max}	[mm]	50	300
Coficiente de escorrentía sobre el suelo	C_{QOF}	[--]	0	1
Constante de tiempo para el flujo subsuperficial	C_{KIF}	[hr]	500	1000
Constantes de tiempo para el tránsito de la escorrentía sobre el suelo (ambas constantes adoptan simultáneamente el mismo valor)	C_{K1}, C_{K2}	[hr]	3	48
Umbral en la zona de raíces para la escorrentía sobre el suelo	T_{OF}	[--]	0	0,99
Umbral en la zona de raíces para el flujo subsuperficial	T_{IF}	[--]	0	1
Umbral en la zona de raíces para la recarga subterránea	T_G	[--]	0	0,99
Constante de tiempo para el tránsito de flujo subterráneo	C_{KBF}	[hr]	500	5000

Para la calibración y evaluación del modelo se empleó el ensayo “split-sample”. Así, y en función de la disponibilidad de información para la presente modelación, los intervalos de calibración y evaluación se definieron respectivamente como [1 de marzo de 2007 - 29 de febrero de 2008] y [1 de marzo de 2008 - 30 de noviembre de 2008]. El período de simulación correspondiente a la calibración se precedió por un período de calentamiento (“warming up”) de cinco meses, mediante el cual se buscó atenuar el efecto de las condiciones iniciales asumidas al inicio de la simulación de calentamiento. Aunque en algún instante de este estudio se analizaran solamente las predicciones para el período de evaluación, las simulaciones se corrieron de manera continua a lo largo de los periodos anteriores (calentamiento y calibración) a fin de asegurar la continuidad de los flujos simulados.

Los procesos principales que se suceden en la microcuenca de estudio se basan en una relación simple lluvia-escorrentía por lo que no se emplearon los módulos de derretimiento de nieve o de riego, etc., que también son parte de la estructura de NAM de DHI (DHI, 2000; Figura 2). Los parámetros que se incluyeron en el presente análisis son los básicos que normalmente se modifican en un proceso de calibración y que se escogieron en función de experiencias anteriores de modelación con NAM (Célleri y col., 2003; Vázquez y Feyen, 2008). Los límites de los rangos de variación de estos parámetros (Tabla 1) se definieron en base a la literatura (entre otros, DHI, 2000; Célleri y col., 2003; Vázquez y Feyen, 2008). El significado y el acrónimo de los mismos así como los rangos de variación de sus valores se listan en la Tabla 1. Estos nueve parámetros son los más básicos a la hora de ajustar el modelo a las condiciones de lluvia-escorrentía de la cuenca en estudio (DHI, 2000; Célleri y col., 2003; Vázquez y Feyen, 2008).

El paso de tiempo de las salidas de la modelación (es decir el período de estrés) se definió como diario, en base a la escala temporal de las observaciones y a los objetivos de la presente modelación.

3.2. Descripción de la metodología GLUE

El protocolo de modelación determinista/estocástico que se ha aplicado en esta investigación, se basa en la metodología conocida como “Generalised Likelihood Uncertainty Estimator (GLUE)” (Binley y

col., 1991; Beven, 1993; Vázquez y col., 2009) para determinar sensibilidades de los parámetros principales y estimar límites de predicción (de los modelos numéricos). Como parte del procedimiento GLUE y en el ámbito de un proceso de simulaciones Monte Carlo, se muestrean varios juegos de parámetros de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad, asumidas a priori. A continuación, se procede a correr las simulaciones correspondientes a los conjuntos de parámetros muestreados y se evalúan las predicciones respectivas versus las observaciones existentes. A todas las simulaciones (y sus juegos de parámetros asociados) que exceden un umbral dado de bondad de ajuste (entre la predicción y las observaciones respectivas), se les asigna un peso de confiabilidad positivo, es decir, se les cataloga como “aceptables” y como tal se les retiene para consideración adicional. Las funciones de distribución tanto de los valores de los parámetros como de las variables predichas se pueden calcular para un nivel de confianza dado en base a estos juegos de parámetros “aceptables”.

La metodología GLUE permite la integración de información adicional en el análisis principal mediante una aproximación de tipo Bayesiano para la actualización de los pesos de confiabilidad y de los límites de predicción. La aproximación de tipo Bayesiano (Beven, 1993), que se define como:

$$L_p(\Omega_i | \underline{O}) = \frac{L_o(\Omega_i) \cdot L_Q(\Omega_i | \underline{O})}{c_{GL}} \quad (1)$$

Ecuación (1) permite la combinación de información preliminar con pesos de confiabilidad basados en nuevas observaciones para producir valores posteriores de pesos de confiabilidad. En la ecuación (1), $L_o(\Omega_i)$ es la distribución preliminar de pesos de confiabilidad del juego de parámetros i (Ω_i); $L_Q(\Omega_i | \underline{O})$ es el peso de confiabilidad del juego de parámetros i (Ω_i), dadas las nuevas observaciones (\underline{O}) y estimado en el nuevo período de observaciones; $L_p(\Omega_i | \underline{O})$ es la distribución posterior de pesos de confiabilidad del juego de parámetros i ; y c_{GL} es una constante de escala para asegurar que la suma de los pesos de confiabilidad posteriores sea igual a la unidad.

3.3. El proceso para estimar límites de predicción

Con respecto al proceso de muestreo de parámetros, se adoptaron distribuciones uniformes para todos los parámetros incluidos en el análisis, reflejando de esta forma el desconocimiento de distribuciones más apropiadas. Un total de 30000 juegos de parámetros se muestrearon. Un peso de confiabilidad se asignó a cada una de las simulaciones (y por ende a cada uno de los juegos de parámetros) luego de comparar las respectivas predicciones con las observaciones disponibles. Los juegos “aceptables” de parámetros se definieron en base a un umbral de bondad de ajuste en el período de calibración [1 de marzo de 2007 – 29 de febrero de 2008] que se definió subjetivamente igual a 0,5. Las simulaciones (y por ende los respectivos juegos de parámetros) cuyos pesos de confiabilidad resultaron superiores al umbral indicado se consideraron como “aceptables” y como tal fueron retenidas para consideración posterior.

El valor añadido de la información adicional al momento de redefinir los límites de predicción se inspeccionó mediante el empleo de la relación Bayesiana indicada en la ecuación (1). En este sentido NAM se ejecutó una segunda vez a lo largo del período de evaluación (y de forma continua a lo largo de los períodos anteriores de calentamiento y calibración), considerando tan sólo los juegos de parámetros “aceptables” que fueron definidos en base a la corrida anterior de NAM durante el proceso de calibración.

Para caracterizar la bondad de ajuste de NAM simulando la hidrología de la cuenca de estudio, se empleo una medida de confiabilidad proporcional al Coeficiente de Eficiencia (EF_2 ; Nash y Sutcliffe, 1970; Vázquez, 2003):

$$L_Q(\Omega_i | \underline{O}) \propto EF_2 \quad (2)$$

donde, $L_Q(\Omega_i | Q)$ es la medida del peso de confiabilidad del juego de parámetros i (Ω_i), dadas las nuevas observaciones (Q). EF_2 se define como (Vázquez, 2003):

$$EF_2 = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

donde, P_i es la predicción i en función del juego de parámetros Ω_i ; O_i es la observación i ; n es el número total de observaciones disponibles en el período considerado; y EF_2 es el Coeficiente de Eficiencia. El rango de variación del índice EF_2 es $-\infty < EF_2 < 1.0$, con una variación que tiene sentido entre 0 y 1 y con un valor óptimo de 1. Aunque este índice es menos sensitivo a la simulación de valores picos que otros índices comúnmente empleados en la literatura científica y técnica, calculados en base al cuadrado de los errores de modelación, tales como el Coeficiente de Correlación (“ R^2 ” o “ r^2 ”; Legates y McCabe, 1999), se ve todavía afectado por esta sobre-sensibilidad (Vázquez y col., 2002). A pesar de ello, este índice se ha seleccionado para este análisis ya que brinda una medida combinada de los errores sistemáticos y los aleatorios (Vázquez y col., 2002; Vázquez y col., 2008), es fácil de calcular, y permite la comparación de resultados con otra literatura científica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto al análisis GLUE, se registraron tan sólo dos simulaciones que fallaron debido a inestabilidades numéricas. Un análisis visual breve de los resultados de las simulaciones exitosas reveló pocos casos con desviaciones sistemáticas en relación a las observaciones (Figura 3). De todas formas, estas simulaciones con desviaciones sistemáticas no pueden considerarse como “aceptables” y son rechazadas por el proceso GLUE. 21499 simulaciones “aceptables” (de un total de 30000 simulaciones) se obtuvieron para el período de calibración. Luego de la actualización de las distribuciones de parámetros mediante el proceso Bayesiano indicado en la ecuación (1), el número de simulaciones (y por ende de juegos de parámetros) “aceptables” disminuyó hasta 13717.

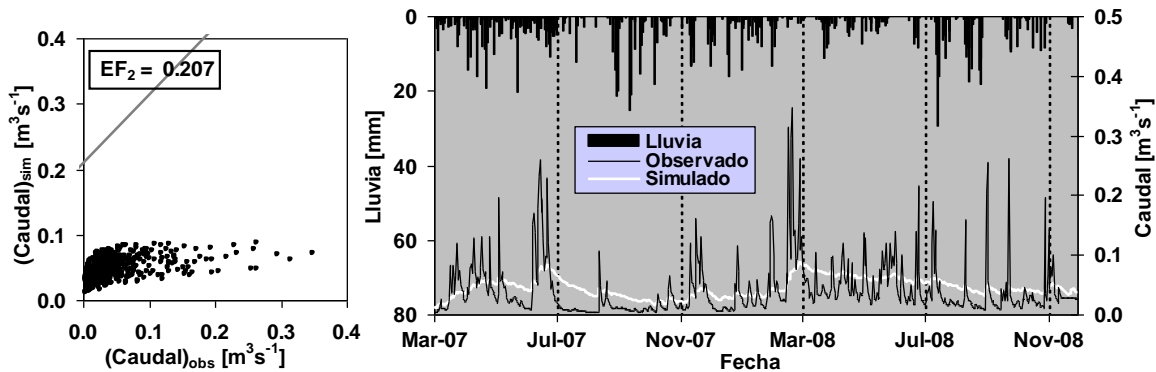


Figura 3. Ejemplo de una simulación que sistemáticamente se desvía de los caudales medios y valores picos. Observe que el peso de confiabilidad es bastante menor al umbral adoptado para diferenciar simulaciones (y por ende juegos de parámetros) “aceptables”.

Los diagramas de dispersión (“dotty plots”; Beven, 1993) obtenidos en función de las simulaciones “aceptables” en el período de calibración [1 de marzo de 2007 - 29 de febrero de 2008], se muestran en la Figura 4. Cabe mencionar que cada punto en cada uno de los diagramas ilustrados representa una simulación y por ende uno de los juegos de parámetros muestreados el contexto del

análisis de simulaciones Monte Carlo. El rango de cada uno de los diagramas corresponde al rango de variación adoptado en este estudio para cada parámetro. Los diagramas muestran que se registraron pesos de confiabilidad bastante elevados en el orden de 0,9 (el valor óptimo de EF_2 es 1). Los

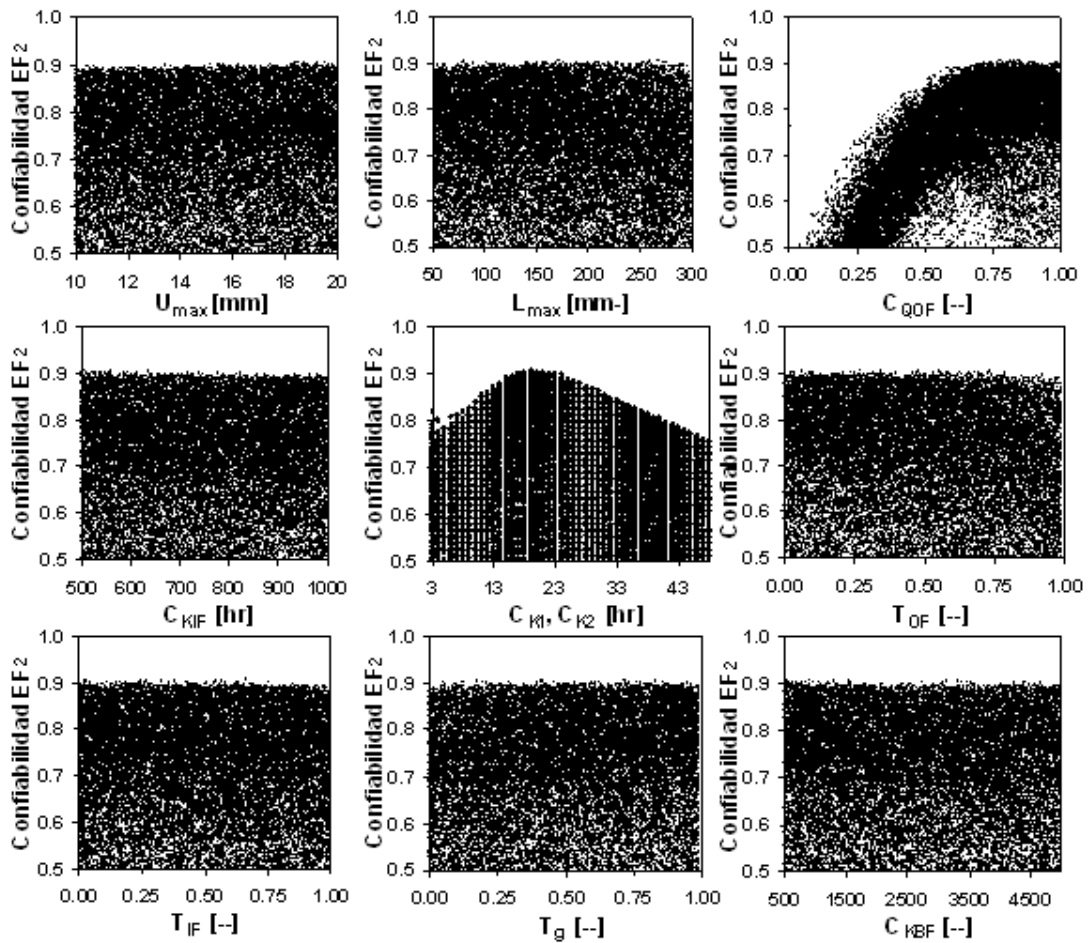


Figura 4. Diagramas de dispersión de los juegos “aceptables” de parámetros. Las simulaciones se corrieron para el período de calibración, pero observando un período de calentamiento de cinco meses.

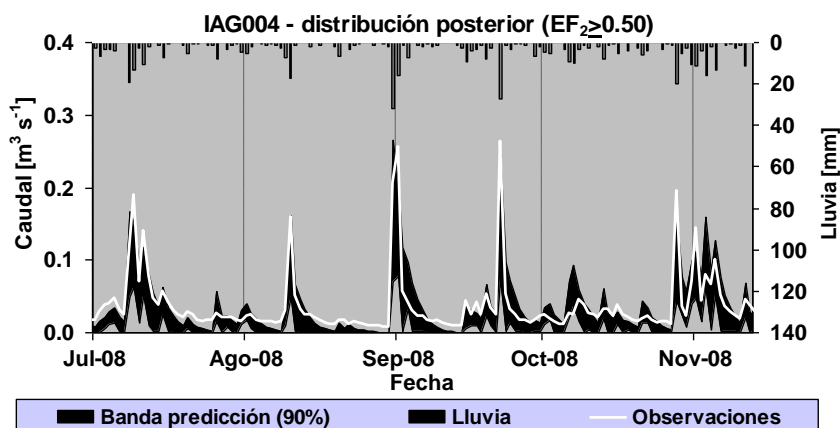


Figura 5. Límites de predicción para parte del período de evaluación, condicionados en la simulación de caudales a la salida de la microcuenca de estudio en el período [1 de marzo de 2008 - 30 de noviembre de 2008], considerando la distribución posterior de los pesos de confiabilidad (luego de la actualización Bayesiana de las distribuciones de pesos de confiabilidad).

diagramas sugieren además que todos los parámetros estudiados, excepto C_{QOF} y C_{K1} (C_{K2}), son insensibles a las predicciones del modelo ya que sus respectivos diagramas muestran una distribución de los pesos de confiabilidad con un extremo superior plano. Esto cuestiona el concepto de obtener un solo juego de parámetros óptimo luego de la calibración de un modelo numérico, a favor del concepto de “equifinalidad” (Beven, 1993) que implica que debido entre otros aspectos a errores en la definición de condiciones de contorno, en la estructura del modelo numérico y en los datos empleados en la modelación se obtienen pesos de confiabilidad similares para (muy) distintos juegos de parámetros. El concepto de “equifinalidad” es una de las premisas de la metodología GLUE (Beven, 1993).

Por otro lado, el diagrama correspondiente a C_{K1} (C_{K2}) muestra un pico, lo cual sugiere que este parámetro es sensible a la predicción del modelo, ya que existe un sub-rango de variación de los valores del parámetro en donde se registran mejores pesos de confiabilidad. Esta sensibilidad, aunque en menor grado, se aprecia también en el caso de C_{QOF} , en vista de que el diagrama correspondiente muestra una zona en particular, dentro del rango de variación del parámetro, en la que se tiende a obtener las mejores predicciones del modelo (es decir, mejores pesos de confiabilidad).

La Figura 5 muestra los límites de predicción para parte del período de evaluación, condicionados a la simulación del caudal de salida de la microcuenca de estudio y luego de la actualización de las distribuciones de parámetros y de los pesos de confiabilidad, mediante la ecuación tipo Bayesiana (1). La figura muestra que en general las predicciones del modelo son bastante aceptables, aunque en algunos casos, las observaciones se salen del intervalo de predicción, particularmente para algunos flujos base, sugiriendo que el modelo tuvo ciertos problemas para simular adecuadamente flujos bajos en el período de simulación y que la metodología GLUE no pudo compensar. En este sentido se debe trabajar a futuro en mejorar la presente modelación a fin de incorporar mayores observaciones posteriores al período analizado e inspeccionar en mayor detalle la calidad de las estimaciones de ET_p . De todas formas los resultados obtenidos son halagadores y como tal la posibilidad de emplear NAM para la modelación de otras cuencas y subcuencas altoandinas de interés sigue muy latente a pesar de la “equifinalidad” que también se observa en el presente caso a pesar de que se ha empleado un modelo conceptual agregado simple.

La metodología GLUE se ha empleado en este estudio, en particular por su simplicidad y transparencia, a pesar de que este método no utiliza estrictamente una identificación Bayesiana de modelos (Mantovan y Todini, 2006), proceso que demanda la adopción de un modelo de errores (y como tal de suposiciones fuertes sobre la naturaleza de los errores), lo cual es prácticamente imposible en aplicaciones reales (Beven y col., 2007). La metodología GLUE es muy transparente y como tal es factible debatir sobre las suposiciones adoptadas (Vázquez y col., 2009). En el presente estudio no se ha adoptado modelo alguno de errores.

5. CONCLUSIONES

La modelación hidrológica de una microcuenca altoandina ubicada al sur oeste de Cuenca se ha llevado a cabo en el contexto de un protocolo de modelación determinista/estocástico que consideró la metodología conocida como GLUE, basada en simulaciones Monte Carlo y en el uso (en el contexto de la modelación) de nuevas evidencias a través de un proceso tipo Bayes. El código hidrológico empleado es conceptual y agregado (NAM; DHI, 2000).

El estudio reveló la presencia de “equifinalidad” ya que no se pudo identificar un juego de parámetros óptimos para el modelo numérico de la microcuenca de estudio. Esto pone en tela de duda la teoría tradicional de que se puede identificar un solo juego de parámetros que optimice la representación del sistema modelado y como tal de los métodos tradicionales (y nuevos) para la optimización automática de modelos numéricos. Esto en particular se contrapone a las suposiciones en el sentido de que es siempre factible identificar un solo juego de parámetros óptimos para un modelo conceptual agregado como el empleado en este estudio.

El estudio reveló además, mediante el examen preliminar en base a los diagramas de dispersión (Figura 4), que la mayoría de los parámetros incluidos en el estudio son insensibles a las predicciones numéricas del modelo. En este sentido, es importante acotar que es necesario en el futuro llevar adelante un estudio más adecuado de la sensibilidad de los parámetros ya que los diagramas de dispersión constituyen simples proyecciones de una superficie multidimensional muy compleja (Vázquez y col., 2009).

Los límites de predicción muestran que en general las predicciones del modelo numérico pueden llegar a ser aceptables (dependiendo del juego de parámetros empleado) y que por lo general se observa una tendencia a una simulación en exceso de los flujos base. De todas formas el comportamiento del código conceptual y agregado NAM es halagador y como tal su aplicación para la modelación de sistemas de mayor tamaño puede ser aconsejable.

Queda por ver si la inclusión de nuevas observaciones y una mejora de la estima de series temporales de ET_p pueden mejorar la calidad de predicciones del modelo desarrollado en el presente estudio. Para ello es muy importante mantener una estrategia de monitoreo hidrológico de la microcuenca de estudio. Es impensable llevar adelante estudios de modelación numérica sin una estrategia paralela de toma de datos. En este sentido, se debería buscar a futuro integrar información adicional de tipo ecológico que permita un mejor diagnóstico de la salud de los ecosistemas altoandinos, en base a principios ecohidrológicos, que busquen como fin primordial contribuir al desarrollo de políticas de gestión adecuadas.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se ha desarrollado en el contexto del Proyecto PIC-08-460 “Cuantificación de los Servicios Hidrológicos de cuencas altoandinas” financiado por la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) del Ecuador. La redacción de este artículo ha sido posible gracias al contrato del autor financiado por la Universidad de Cuenca (Ecuador). El autor agradece la colaboración de los técnicos involucrados en la toma de datos de campo que permitió contar con la información necesaria para la presente modelación.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, G.R., L.S. Pereira, D. Raes, S. Martin, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. *FAO*, Roma, 300 págs.
- Beven, K.J., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Adv. Water Resour.*, 16, 41-51.
- Beven, K.J., P. Smith, J. Freer, 2007. Comment on “Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology” by Pietro Mantovan and Ezio Todini. *J. Hydrol.*, 338 (3-4), 315-318.
- Binley, A.M., K.J. Beven, A. Calver, L.G. Watts, 1991. Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions. *Water Resour. Res.*, 27(6), 1253-1261.
- Braud, I., P. Fernandez, F. Bouraoui, 1999. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. *J. Hydrol.*, 216(3-4), 155-171.
- Braud, I., A.I.J. Vich, J. Zuluaga, 2001. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *J. Hydrol.*, 254(1-4), 124-144.
- Buytaert, W., 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. *Tesis Ph.D.*, *K.U.Leuven*, Bélgica, 228 págs.

- Buytaert, W., J. Deckers, G. Dercon, B. De Bièvre, J. Poesen, G. Govers, 2002. Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use Manage.*, 18, 94-100.
- Buytaert, W., B. De Bièvre, G. Wyseure, J. Deckers, 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 8, 108-114.
- Buytaert, W., V. Iñegues, R. Célleri, B. De Bièvre, 2006. The impact of pine plantations on water yield: a case study from the Ecuadorian Andes. *3rd Internacional Symposium on Integrated Water Management, Bochum, Germany*.
- Célleri, R., J. Feyen, 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems. *Mt. Res. Dev.*, 29, 350-355.
- Célleri, R., L. Timbe, R.F. Vázquez, J. Feyen, 2003. Assessment of the relation between the NAM rainfall-runoff model parameters and the physical catchment properties. *HIP-VI UNESCO Technical Documents in Hydrology*, 66, 9-16.
- DHI, 2000. MIKE 11 A Modelling System for Rivers and Channels. User Guide. *Danish Hydraulic Institute, Dinamarca*, 292 págs.
- Fleischbein, K., W. Wilcke, R. Goller, J. Boy, C. Valarezo, W. Zech, K. Knoblich, 2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrol. Process.*, 19 (7), 1355-1371.
- Fleischbein, K., W. Wilcke, C. Valarezo, W. Zech, K. Knoblich, 2006. Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modeling approach. *Hydrol. Process.*, 20, 2491-2507.
- Harden, C.P., C.P. Scruggs, 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, 55(1-4), 5-24.
- Havnø, K., M.N. Madsen, J. Dørge, 1995. MIKE 11 A generalized modeling package. En: Singh, V.J. (Ed.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, EEUU, 809-846.
- Mantovan, P., E. Todini, 2006. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *J. Hydrol.*, 330, 368-381.
- Legates, D.R., G.J. McCabe, 1999. Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrological and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.*, 35(1), 233-241.
- Nash, J.E., J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles *J. Hydrol.*, 10(3), 282-290.
- Patiño, J.F., L.A. Montes, J.D. León, L.C. Hernández, 2006. Efecto de diferentes coberturas forestales sobre el rendimiento hídrico en una microcuenca de la Cordillera Central Colombiana. *XXII Latin-American Congress of Hydraulics. Ciudad Guayana, Venezuela*.
- Perrin, J.L., C. Bouvier, J.L. Janeau, G. Menez, F. Cruz, 2001. Rainfall/runoff processes in a small peri-urban catchment in the Andes mountains. The Rumihurcu Quebrada, Quito (Ecuador). *Hydrol. Process.*, 15(5), 843-854.
- Poulenard, J., P. Podwojewski, J.L. Janeau, J. Collinet, 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45, 185-207.
- Rankinen, K., T. Karvonen, D. Butterfield, 2006. An application of the GLUE methodology for estimating the parameters of the INCA-N model. *Sci. Total Environ.*, 365(1-3), 123-139.
- Refsgaard, J.C., 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.*, 198, 69-97.
- Sánchez, P.E., Jr. S. Santiesteban, 2004. Perú. En: Hofstede, R., P. Segarra, P. Mena. (Eds). *Los páramos del Mundo*. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia, Quito, 159-203.

- Vázquez, R.F., 2003. Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems. *Tesis Ph.D.* ISBN 90-5682-416-3, *K.U.Leuven*, Bélgica, 335 págs.
- Vázquez, R.F., J. Feyen, 2003. Effect of potential evapotranspiration estimates on effective parameters and performance of the MIKE SHE-code applied to a medium-size catchment. *J. Hydrol.*, 270, 309-327.
- Vázquez, R.F., J. Feyen, 2008. Application of distributed hydrologic models. En: Pilar García-Navarro, P., E. Playán (Eds.): Numerical modelling of Hydrodynamics for Water Resources. *Taylor & Francis*, Londres, Reino Unido, 153-174.
- Vázquez, R.F., L. Feyen, J. Feyen, J.C. Refsgaard, 2002. Effect of grid-size on effective parameters and model performance of the MIKE SHE code applied to a medium sized catchment. *Hydrol. Process.*, 16(2), 355-372.
- Vázquez, R.F., K. Beven, J. Feyen, 2009. GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application. *Water Resour. Manag.*, 23(7), 1325-1349.
- Zehetner, F., W.P. Miller, 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*, 65(3), 201-213.