

# **Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL**

**W. Buytaert <sup>2</sup>, R. Célleri <sup>1</sup>, B. De Bièvre <sup>1,2</sup>, J. Deckers <sup>2</sup>, G. Wyseure <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), Universidad de Cuenca, Cda. Universitaria, Av. 12 de Abril s/n y Av. Loja, Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup> Laboratory for Soil and Water Management (LSWM), Katholieke Universiteit Leuven, Vital Decosterstraat 102, B-3000 Leuven, Belgium

**Palabras claves:** páramos, modelización hidrológica, andosols, cuencas de montaña.

## **Resumen**

El páramo es caracterizado por tener un clima frío y húmedo. Sus suelos volcánicos (Andosols) tienen una capacidad de retención de agua muy alta que amortigua la escorrentía, produciendo un patrón de caudales de las cuencas bastante uniforme, por lo que sirven como proveedores de agua para las depresiones andinas densamente pobladas.

Durante décadas el páramo fue un área utilizada para pastoreo. En años recientes, principalmente debido a la presión poblacional, las comunidades iniciaron el desarrollo del páramo con actividades agrícolas y existen algunas evidencias de que esta interferencia humana alteró la hidrología en algunas microcuencas.

Para entender mejor cómo el cambio del uso de tierras afecta a la hidrología de estas cuencas, el régimen hidrológico fue analizado usando TOPMODEL.

TOPMODEL fue aplicado en una microcuenca de páramo representativa de 2.65 km<sup>2</sup> de superficie. El modelo fue calibrado usando 15 meses de datos, obteniéndose un valor de 0.77 para el coeficiente de Nash y Sutcliffe, indicando que el modelo es capaz de simular relativamente bien la hidrología de la cuenca y que sus parámetros representan bastante bien la capacidad de amortiguamiento del suelo. Al cambiar los parámetros del modelo se puede, en principio, predecir el impacto de los cultivos sobre el patrón de escorrentía.

Se encontró que las mayores fuentes de incertidumbre del modelo son atribuidas a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, a la dificultad de estimar la evapotranspiración y al desconocimiento de la contribución del rocío hacia la precipitación total.

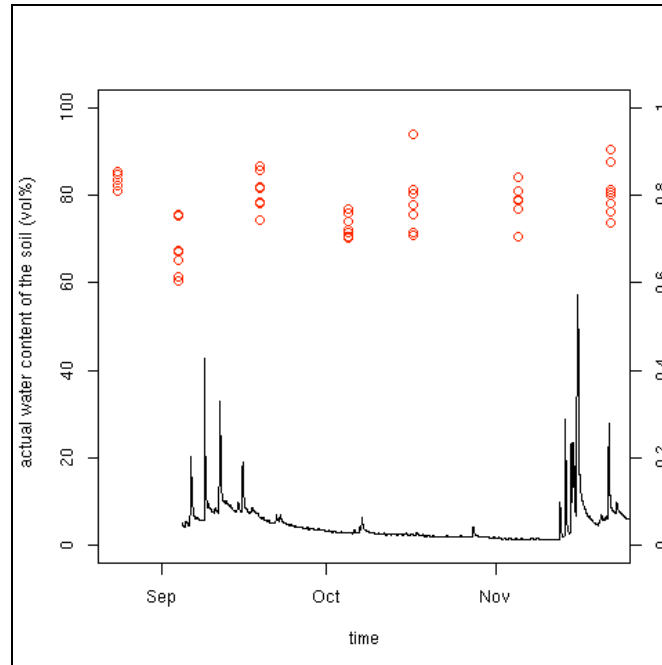
## 1. Introducción

El abastecimiento de agua se está convirtiendo en un asunto de gran importancia económica y social en muchas partes del mundo. La región andina del sur del Ecuador, llamada Austro, no es particularmente una región seca, pero dado que la precipitación puede ser muy variable en espacio y tiempo, las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua flexibles que puedan manejar períodos largos sin precipitación, actualmente son de gran importancia. Además, así como la demanda de agua se incrementa, también la confianza en el abastecimiento de agua está tomando mayor atención en áreas muy pobladas e industriales. El abastecimiento de agua depende completamente de las aguas superficiales que descienden del páramo, ya que prácticamente no existen aguas subterráneas. Esta fuente no solamente regula bien el agua a través de las estaciones, sino que también ofrece agua de buena calidad. El páramo se describe comúnmente como la región alto andina que inicia aproximadamente a los 3300 m s.n.m. dependiendo de la ubicación geográfica (Hofstede, 1995; Dercon, 1998) y es caracterizada por tener un clima frío y húmedo. La vegetación consiste sobre todo en especies de pasto bajo y pequeños bosquetes de árboles de quinoa (Luteyn et al., 1992) los que son escasos. Mientras en cuencas montañosas tropicales el agua se almacena en la densa capa de vegetación (Marin et al., 2000), esta capa no existe en las cuencas de páramo. Sin embargo, esta falta de capacidad de amortiguamiento es largamente sobrepasada en el páramo por la capacidad de retención de agua de sus suelos con cenizas volcánicas que retienen hasta un 80% de volumen de agua en capacidad de campo, el doble que la capacidad de retención de suelos “comunes” (Buytaert et al., 2002; Poulénard et al., 2001), lo cual resulta en un patrón de escorrentía regulado. Esto se aprecia en la Figura 1, donde los círculos representan el contenido actual de agua del suelo y la línea continua el caudal. Aún luego de un período seco de dos meses (lo cual es raro en el páramo), el contenido de agua del suelo permanece elevado y el caudal de salida de la cuenca no se reduce significativamente, lo cual indica la gran capacidad de amortiguamiento de la cuenca.

La influencia de los cambios de vegetación en la hidrología de una región se describen en la literatura (Bosh and Hewlett, 1982; Rowe et al., 1994), pero la influencia de los cambios en las propiedades del suelo sobre la hidrología es mucho menos conocido. Cambios recientes en el uso de tierras en el páramo han provocado la siembra de cultivos y alteración de los suelos del páramo. Como estos suelos son muy vulnerables a perder irreversiblemente su capacidad de retención de agua (Poulénard et al., 2001; Buytaert et al., 2002) se han levantado

inquietudes con respecto a las consecuencias de estos cambios de uso de tierras sobre la capacidad de retención de agua del páramo.

*Figura 1: Relación entre el contenido de humedad del suelo y el caudal*



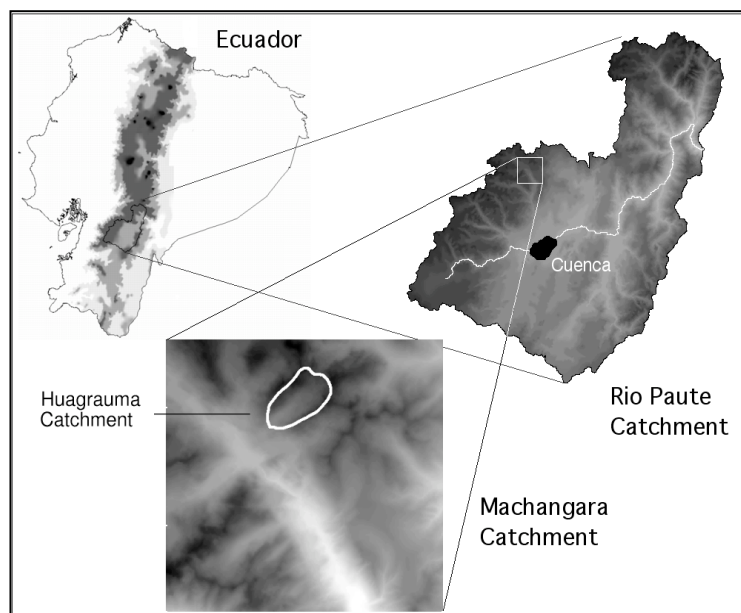
Pocas investigaciones han estudiado la influencia de diferentes usos de tierras en las propiedades hidrológicas de suelos volcánicos del páramo ecuatoriano (Poulenard et al., 2001; Buytaert et al., 2002). Además, es muy difícil extrapolar los resultados de estas investigaciones realizadas a escala micro a la escala de la cuenca sin realizar una validación. Para extrapolar los resultados de estas investigaciones hacia un escala de (micro) cuenca, en el presente estudio se ha utilizado una aproximación por modelización, en la cual se ha utilizado el modelo lluvia – escorrentía TOPMODEL (Beven, 1995). La intención no es la de desarrollar un modelo predictivo confiable de la escorrentía de la cuenca, sino la de obtener un mejor conocimiento sobre los procesos físicos de la hidrología de cuencas utilizando procedimientos de sensibilidad y optimización del modelo. Ya que este es un proceso continuo, se han formulado varias recomendaciones para futuras investigaciones.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Datos de campo

Una microcuenca de 2.58 km<sup>2</sup> fue seleccionada en la cuenca del río Machángara ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca al sur del Ecuador (figura 2). La cuenca ha sido monitoreada durante un año con 3 pluviógrafos electrónicos. Los caudales fueron medidos cada 30 minutos usando un vertedero con sección triangular y un sensor para medir el nivel del agua. Un modelo digital de elevación con celdas de 20x20 m fue generado a partir de curvas de nivel. Valores de evapotranspiración fueron determinados con base a datos meteorológicos medidos en el páramo.

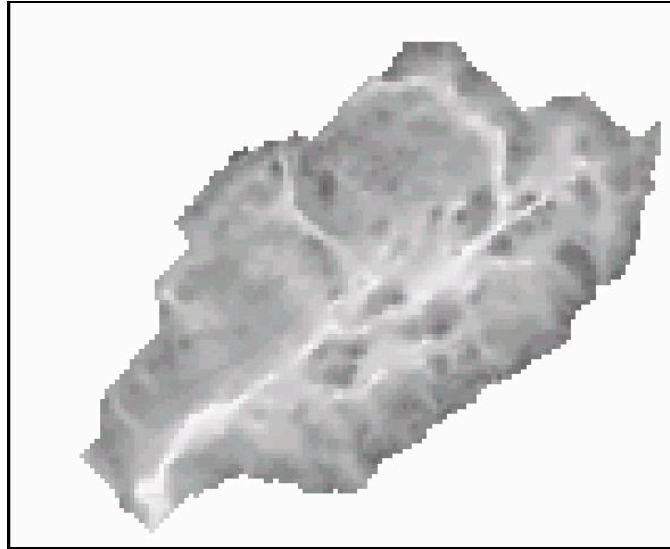
Figura 2: La cuenca Huagrauma.



### 2.2. TOPMODEL

TOPMODEL (Beven, 1995) es una herramienta de modelización semi-distribuida y basada en procesos físicos que se fundamenta en el concepto del índice topográfico  $\ln(a/\tan b)$ , donde  $a$  es el área de drenaje hacia este punto de la cuenca y  $b$  la pendiente del terreno. Es una indicación de la susceptibilidad de ciertos puntos de la cuenca a saturarse completamente (figura 3) y por ello puede ser visto como un índice de similitud hidrológica. Los colores más claros de la figura representan una elevada susceptibilidad a saturarse.

*Figura 3: Mapa de Indices Topográficos*



Este índice topográfico es calculado con el modelo digital de elevación. La distribución espacial del índice topográfico es combinada con la asunción de que la distribución de transmisividad pendiente abajo con la profundidad puede ser descrita como una función exponencial del déficit de almacenamiento.

$$T=T_0*\exp(-S/m)$$

El modelo asume una homogeneidad espacial de las propiedades del suelo en la cuenca y un comportamiento hidrológico similar de los puntos que tienen el mismo valor del índice topográfico. Los suelos de la cuenca son Andosols (FAO) con poca profundidad mas o menos homogénea de 0.5 m, cubriendo roca madre metamórfica. Muestran una gran homogeneidad en características hidrofísicas (permeabilidad y capacidad de retención de agua). Experimentos de campo indican que la conductividad saturada de los suelos de páramo es generalmente alta (alrededor de 20mm/h). Sin embargo, al ya no estar saturado el suelo el movimiento del agua en el suelo se vuelve muy lento y cae rápidamente a cero para un pF igual a 1 (antes de llegar a capacidad de campo).

TOPMODEL usa el mapa de índices topográficos de la cuenca, una descripción de la red de drenaje y 5 parámetros que pueden ser optimizados utilizando simulaciones Monte Carlo (tabla 1).

Tabla 1: *Parámetros del TOPMODEL*

Parámetro	Descripción
m:	Parámetro del modelo
Chvel:	Velocidad del tránsito en el canal
T0:	Transmisitividad lateral
SRmax:	déficit de almacenamiento máximo
SRinit:	déficit de almacenamiento inicial

Las simulaciones Monte Carlo (Beven, 2002) generan una gran cantidad de conjuntos de parámetros escogidos aleatoriamente dentro de un rango de parámetros determinados con anterioridad a partir de límites impuestos. Entonces el modelo se corre con cada juego de parámetros y su eficiencia es calculada. Este método exige mucho tiempo de formulación ya que son necesarias miles de simulaciones, pero tiene la ventaja de que puede revelar múltiples juegos de parámetros óptimos que no pueden ser detectados usando la clásica optimización de parámetros.

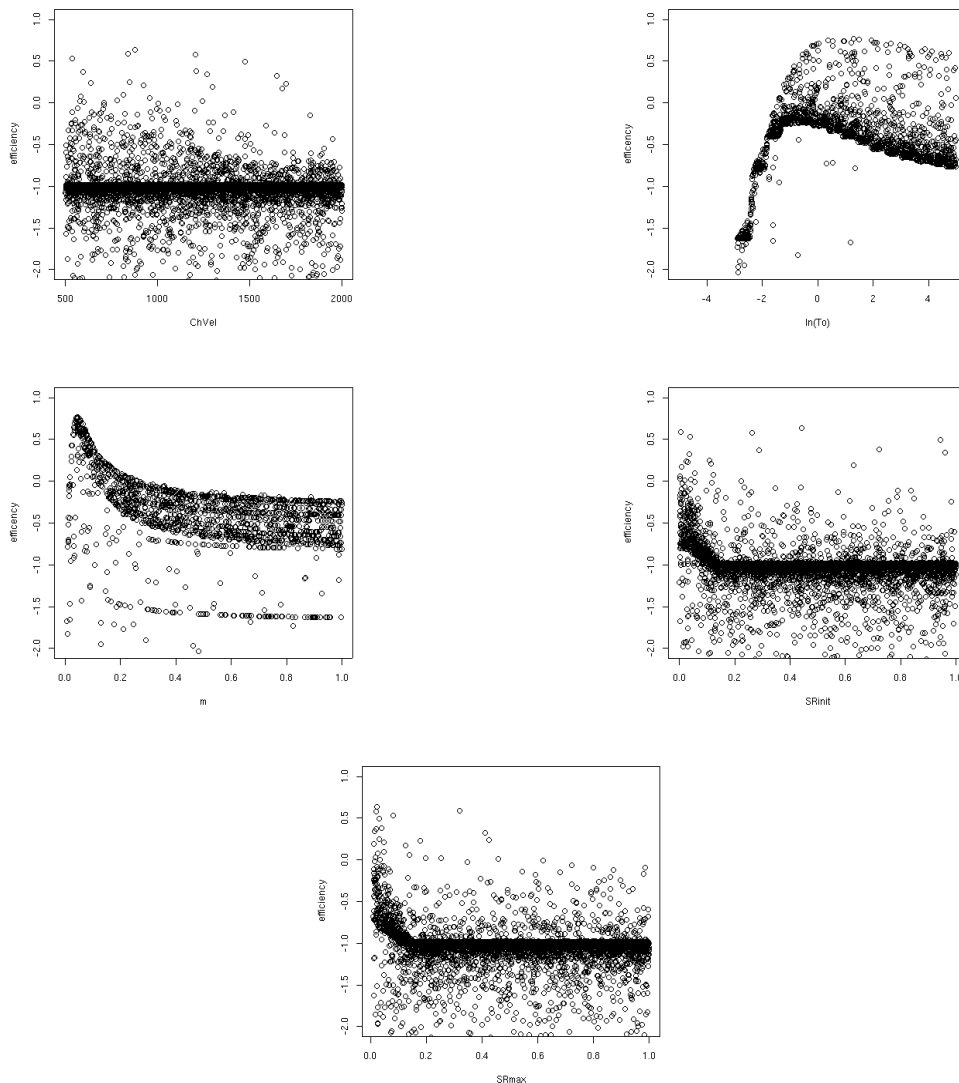
### **3. Resultados y discusión**

La simulación hidrológica, sensibilidad de parámetros y optimización Monte Carlo fueron ejecutados para períodos consecutivos de 52 días. El juego de parámetros óptimos fue escogido de acuerdo al valor más alto del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (Beven, 2002). Luego de ello, los diferentes parámetros óptimos fueron analizados de acuerdo a su significado físico y a su dependencia del tiempo. Además, el análisis fue realizado con los datos de lluvia de cada uno de los 3 pluviógrafos independientemente, para evaluar la influencia de irregularidades de los datos de lluvia sobre la eficiencia del modelo. El valor más alto de la eficiencia de Nash y Sutcliffe que puedo ser obtenido es de 0.77, el cual representa una simulación satisfactoria.

#### ***Sensibilidad de los parámetros***

SRmax y SRinit (tabla 1) son los parámetros menos sensibles ya que ellos no revelan ningún valor óptimo sobre el rango de posibles valores (figura 4).

Figura 4: Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL



El parámetro más sensible,  $m$ , representa la sensibilidad de la conductividad del suelo al contenido de agua. Un valor pequeño de  $m$  indica que la conductividad cae muy rápidamente cuando el contenido de humedad del suelo deja el punto de saturación. En general, valores de  $m$  en la literatura están alrededor de 0.02 y 0.05. Los valores encontrados caen dentro de este rango.

El parámetro  $T_0$  está relacionado con la conductividad hidráulica saturada del suelo. Experimentos de campo revelan una conductividad saturada promedio de 14.5 mm/h, variando entre 5 y 35 mm/h. La profundidad del suelo es de unos 0.5 m, así el logaritmo natural de la transmisividad puede ser calculado como:

$$\ln(T_0) = \ln(K_{sat} * d) = -4.93$$

con límites entre  $-5.6$  y  $-4.0$ . El modelo calcula valores de  $-3$  a  $-0.15$ , cayendo fuera del rango de los valores de mediciones de campo. Por lo tanto el modelo indica que los experimentos y mediciones de campo (método de pozo invertido, método de tensiómetro-infiltrómetro, método del núcleo de suelo) subestiman la conductividad hidráulica del suelo. Esto se debe probablemente a que existen caminos preferenciales de flujo en la estructura del suelo causados por macroporos y grietas, posiblemente en mayor medida en la interfase entre el suelo y la roca. Estas estructuras han sido observadas en varias ocasiones durante estudios de campo pero no son tomadas en cuenta en experimentos de conductividad a pequeña escala. Futuras investigaciones serán realizadas sobre este tema.

Finalmente, la velocidad del agua en los cauces es muy estable entre todas las diferentes simulaciones. Una velocidad de  $750$  m/h es muy lenta en comparación con las estimaciones de campo. Esto también indica que muy probablemente existe un tipo de “reservorio escondido”, donde el agua es almacenada y que no está ni en la matriz de suelo ni en la red de drenaje, el cual se cree es fuertemente relacionado con las grietas y macroporos.

#### ***Influencia de los parámetros menos sensibles***

Como TOPMODEL es un modelo hidrológico semi-distribuido, la variabilidad espacial es incorporada por medio de las diferentes clases de índice topográfico, pero el tránsito de caudales es manejado como un modelo agregado. Para mejorar el algoritmo de tránsito de caudales, la topografía de la cuenca puede ser dividida en diferentes módulos, cada uno con su propia distancia de viaje hacia la salida. Con el sistema de tránsito más realista la cuenca responde demasiado rápido. Una vez más, esto sugiere un reservorio entre el suelo y la escorrentía superficial, el cual no es tomado en consideración por el modelo.

#### **4. Conclusiones**

El desempeño de TOPMODEL para modelizar pequeñas cuencas montañosas de páramo es satisfactoria. Los parámetros obtenidos son consistentes en el tiempo y tienen un sólido significado físico. Hay muchos argumentos para creer que a parte del almacenamiento en la matriz del suelo y el agua en escorrentía superficial existe un tercer “reservorio” que actúa como un regulador entre las dos fases.



Las mayores fuentes de incertidumbre son la variabilidad de la precipitación y la evapotranspiración. Estas están causando variaciones significantes en la eficiencia del modelo medida con el coeficiente de Nash y Sutcliffe. Por ello futuros estudios de campo serán concretados sobre estos asuntos. Un último factor de incertidumbre es la descripción adecuada del tránsito de caudales de la cuenca.

Se puede concluir que TOPMODEL modela adecuadamente la relación lluvia-escorrentía en el páramo. A través de la implementación del modelo se han generado inquietudes sobre los procesos físicos que se quieren describir con el modelo. Si el modelo todavía no predice bien la variación de caudales esto se debe a la falta de calidad en datos de ingreso (precipitación, evapotranspiración) y a un conocimiento incompleto de parte del modelador sobre los procesos físicos (en este caso flujo subsuperficial rápido). Se deben estudiar con profundidad estos últimos, con el fin de que se les puede incluir en la modelización.

## 5. Referencias

- Beven K. J. 1995. TOPMODEL. En: Sing V. P. (ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water resources Publications. Colorado. pp 627-668.
- Beven K. J. 2002. Rainfall-Runoff Modelling. Wiley, Chichester.
- Bosch J. M., Hewlett J. D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yields and evapotranspiration. Journal of Hydrology 55.
- Buytaert W., Deckers J., Dercon G., De Bievre B., Poesen J., Govers G. 2002. Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. Soil use and management 18.
- Dercon G., Bossuyt B., De Bièvre B., Cisneros F., Deckers J. 1998. Zonificación agroecológica del austro ecuatoriano. U Ediciones Cuenca, Ecuador
- Driessen P., Deckers J., Spaargaren O., Nachtergaele F. (eds.) 2001. Lecture notes on the major soils of the world. FAO, Rome
- Hofstede R. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. PhD thesis. Universiteit van Amsterdam, Amsterdam
- Luteyn J. L. 1992. Páramos: why study them? Academic Press, New York.
- Marin C. T., Bouten I. W., Dekker S., 2000. Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia. Journal of Hydrology 237.

- Neter J., Kutner H. M., Nachtsheim C. J., Wasserman W. 1996. Applied Linear Statistical Models. Irwin, Chicago.
- Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.L., Collinet J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Ando sols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45.
- Rowe L. K., Pearce A. J., O'Loughlin C. L., 1994. Hydrology and related changes after harvesting native forest catchments and establishing *Pinus Radiata* plantations. Part I. Introduction to study. *Hydrological processes* 8. pp. 263-279.