

Mejora de la estimación de caudales fluviales en Uruguay

Santiago Narbondo, Magdalena Crisci y Christian Chreties.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - Facultad de Ingeniería - Universidad de la Republica - Uruguay

E-mail: snarbondo@fing.edu.uy

RESUMEN:

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental para la gestión sustentable de los recursos hídricos, ya que permite analizar la disponibilidad del recurso en cuencas no aforadas y bajo diferentes escenarios potenciales. Por otra parte, constituye una herramienta de singular importancia en la comprensión del funcionamiento del ecosistema fluvial en su conjunto, integrándola con otros modelos: hidrodinámicos, sedimentológicos y de funcionamiento ecológico. En el presente trabajo se analiza la performance en la estimación de caudal diario de dos modelos hidrológicos concentrados de simulación continua en cuencas representativas del Uruguay. Se implementó el modelo propuesto por Geetha et al. (2008), basado en la adaptación continua del método del Numero de Curva (USDA, 2010) y el modelo GRJ4 - Génie Rural à 4 paramètres Journalier (Perrin, 2003), basado en la cuantificación de la humedad del suelo. Ambos fueron implementados en cuencas de diferentes características geomorfológicas y edafológicas del país, con el objetivo de obtener una buena representación del comportamiento de las mismas en todo el territorio. Además, se implementaron algunas modificaciones en el modelo propuesto por Geetha et al. (2008), con el objetivo de incorporar en el mismo parámetros y variables hidrológicas conocidas en nuestro país. Los resultados obtenidos mostraron, para ambos modelos, una buena representación de los caudales diarios registrados en las cuencas analizadas. Asimismo, las modificaciones propuestas mejoran los indicadores de las funciones objetivo utilizadas para ambos modelos.

INTRODUCCION

Si bien Uruguay tiene el privilegio de contar con una abundante oferta hídrica, la creciente intensificación del uso del agua por un lado y el aumento de la demanda atmosférica y de la variabilidad climática (asociados al cambio climático) por otro, evidencian la escasez del recurso, la cual se manifiesta principalmente en períodos de déficit hídrico. Por otro lado la acción antrópica sobre los recursos naturales vinculados a los cursos de agua se ha desarrollado prácticamente sin planificación previa, generando como consecuencia diferentes conflictos y problemáticas específicas. Esto pone de manifiesto la necesidad de generar herramientas para la gestión sustentable de los recursos hídricos en el país. Para ello es fundamental el desarrollo de herramientas de modelación hidrológica, a partir de las cuales sea posible producir información cercana a la realidad en cuencas no aforadas y analizar la disponibilidad del recurso hídrico bajo diferentes escenarios potenciales. A nivel nacional existen numerosos antecedentes en materia de modelos de balance hídrico de paso mensual y en modelos de eventos extremos, ampliamente extendidos para el diseño de obras hidráulicas (MVOTMA, 2011),

disponiendo de un modelo de paso mensual regionalizado para todo el país basado en el modelo de Témez (Témez, 1977). Asimismo, en cuanto a la modelación de eventos, se tiene gran experiencia en la aplicación del método del Número de Curva (USDA; 2010), obteniendo una muy buena representación de los hidrogramas de crecida para eventos extremos en cuencas del Uruguay, apoyado en una clasificación de los suelos de nuestro país asociada a la propuesta por el USDA (Molfino, 2001). Sin embargo, en lo que respecta a modelos hidrológicos de simulación continua, es muy poca la experiencia reciente, disponiendo hoy en día de los datos y del desarrollo académico y tecnológico adecuados para avanzar en este campo.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo consiste en implementar y analizar el desempeño de dos modelos hidrológicos continuos de paso diario en diferentes cuencas de Uruguay, incorporando además en su estructura, parámetros representativos de las características físicas e hidrológicas conocidas en todas las cuencas del país.

SUBCUENCAS SELECCIONADAS

Se seleccionó, como primer paso, un conjunto de 4 subcuencas con diferentes características geomorfológicas y edafológicas, para las cuales se dispone de datos diarios de precipitación (con una buena distribución espacial) y de caudal. Cabe mencionar que una de las cuencas elegidas tiene una superficie considerablemente menor que el resto, lo que permitirá analizar la performance de los modelos en distintas escalas espaciales y durante periodos de estiaje.

A continuación, se presenta la localización geográfica de las subcuencas seleccionadas (Figura 1), así como una breve descripción de las mismas. Luego, en la Tabla 1, se resumen las principales características físicas e hidrológicas de dichas cuencas. Para representar la topografía, las direcciones del flujo y la red de drenaje de la cuenca fue utilizada como información de base el modelo digital del terreno de SRTM (90m) corregido por el Consorcio para Información Espacial del CGIAR (Jarvis, et al., 2008). Para representar las características hidrológicas del suelo fue utilizado el mapa de suelos CONEAT a escala 1:40.000 (Molfino, 2009), disponible para todo Uruguay. Los valores de agua disponible (AD), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y porosidad eficaz de los suelos CONEAT son estimados en función de contenidos porcentuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica presentes en cada unidad de suelo (Molfino, 2009, Fernández, 1979 y Silva et al., 1988.). En base a esto, se pondera por área para obtener un valor representativo de las características hidrológicas del suelo en cada cuenca

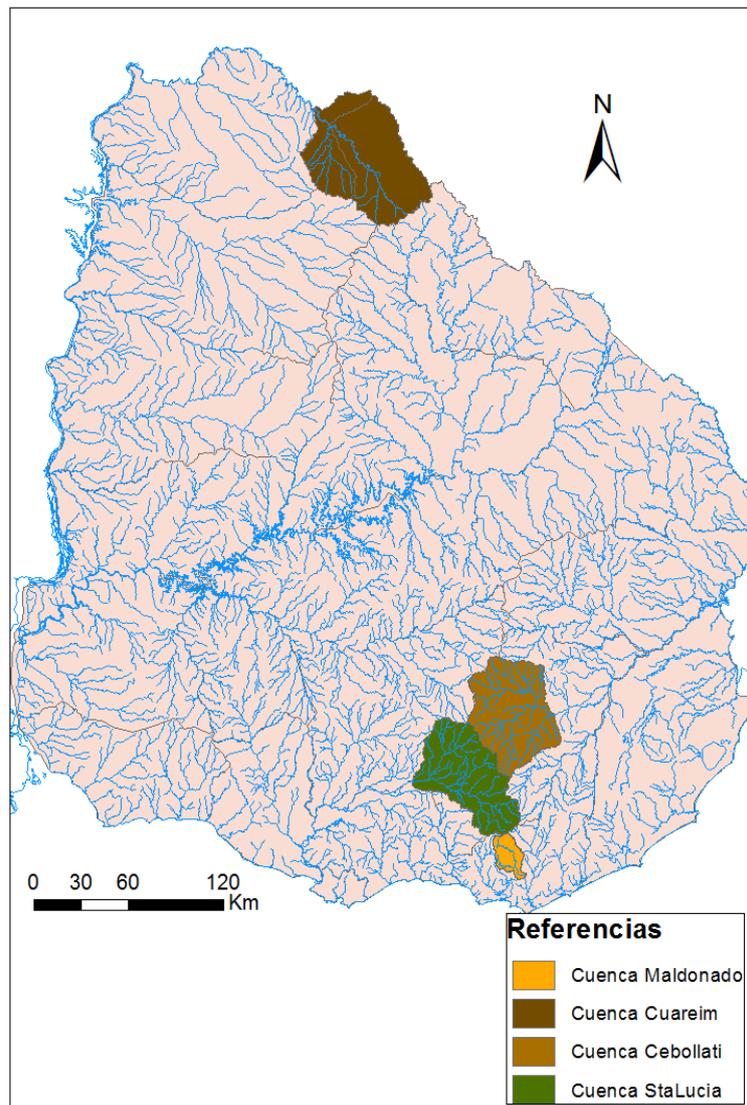


Figura 1.- Ubicación de las cuencas seleccionadas.

- La cuenca del río Santa Lucía, con una superficie de 2753 km² aporta a la represa de Paso Severino, la cual abastece de agua potable al 60% de la población de todo el país. Los suelos de dicha cuenca presentan una capacidad media de almacenamiento y un uso correspondiente a ganadería lechera y cárnica principalmente.
- La cuenca del arroyo Maldonado tiene una superficie de 366 km². Los suelos de la cuenca presentan una capacidad de almacenamiento media y una cobertura predominantemente agrícola-ganadera.
- La cuenca del río Cebollati ocupa una superficie de 2884 km². Los suelos de la cuenca presentan, en términos medios, una capacidad de almacenamiento de agua media a baja y una cobertura predominantemente agrícola-ganadera donde la tierra es sometida a un sistema de rotación arroz-pasturas, aunque en los últimos años se ha producido un avance importante de la forestación además de otros cultivos.
- La cuenca del río Cuareim, compartida con Brasil, tiene una superficie de 4568 km². Los suelos de la cuenca son de escasa profundidad y se desarrollan sobre roca basáltica, presentando serias limitaciones

de arraigamiento de las pasturas en la cuenca alta. El uso del suelo de la cuenca s fundamentalmente ganadero (en la cuenca alta) con una fuerte presencia del cultivo de arroz aguas abajo del punto de cierre.

Tabla 1.- Parámetros físicos e hidrológicos de las cuencas seleccionadas.

	Cebollati	Santa Lucia	Maldonado	Cuareim
Area (km2)	2884.0	2753.6	366.4	4568.0
Pendiente media cuenca (%)	6.2	6.0	8.4	4.4
L hidráulica cauce (km)	103.7	101.5	48.1	138.0
S cauce (%)	0.1	0.3	0.8	0.2
Tc (hs)	32.7	21.9	8.7	33.3
Capacidad de campo (mm)	153.7	171.7	142.9	71.6
Punto marchitez permanente (mm)	77.8	91.1	70.8	34.5
Agua disponible (mm)	75.9	80.6	72.2	37.1
Porosidad eficaz (mm)	123.6	124.9	120.9	62.0

DESCRIPCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Como fue mencionado anteriormente, se implementaron 2 modelos hidrológicos concentrados de paso diario. Ambos modelos se implementaron y calibraron en cada cuenca en forma independiente, buscando siempre que los valores de los parámetros y su variación (entre cuencas) estén atribuidas a variaciones físicas propias de las cuencas. La simplicidad de la formulación e implementación y el número acotado de parámetros (debido fundamentalmente a que se trata de modelos hidrológicos de tipo concentrado), los hacen ser flexibles en cuanto a la posible incorporación de modificaciones.

A continuación se realiza una breve descripción de los modelos hidrológicos implementados.

Modelo propuesto por Geetha et al. (2008)

El modelo propuesto por Geetha et al. (2008), basado en el método del Numero de Curva (USDA, 2010) incorpora adecuadamente la modelación de la capa subsuperficial y de la capa subterránea del suelo, sumado a que está basado en un modelo de eventos extremos con buen desempeño en cuencas de Uruguay. Este modelo considera 3 tipos de escurrimiento: superficial (SRO), sub-superficial (THR) y flujo base (BF); y 2 reservorios de agua en el suelo: almacenamiento de humedad del suelo (SMS) y almacenamiento de agua subterránea (GWS). De esta manera el escurrimiento total queda definido por la suma de los tres anteriores (Figura 2).

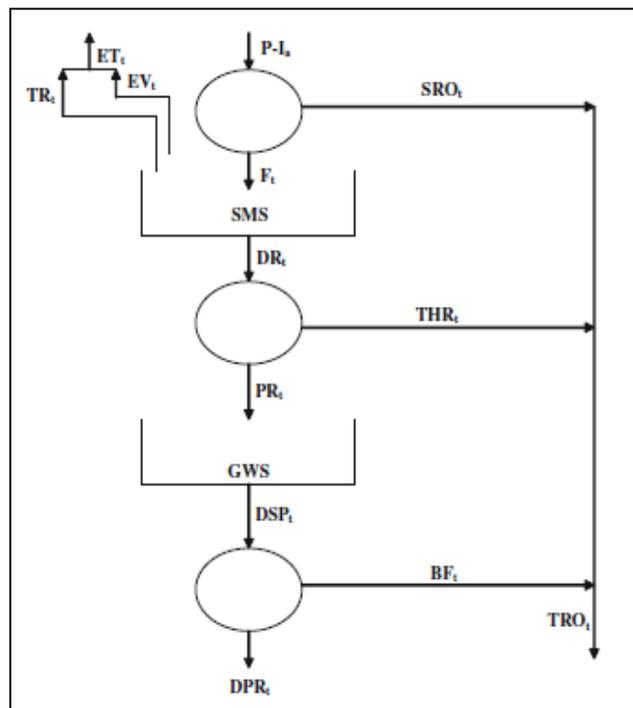


Figura 2.- Esquema del modelo propuesto por Geetha et al. (2008)

A continuación se describen las ecuaciones correspondientes a cada paso.

- Cálculo de la escorrentía superficial directa

En primer lugar se calcula la escorrentía superficial a partir del método del NC:

$$RO_t = \frac{Pe_t^2}{Pe_t + S_t}$$

$$\text{Con } Pe_t = P_t - Ia_t$$

El cálculo de Ia se realiza en función de la cantidad de días de simulación:

$$Ia_t = \lambda S_t \quad \text{para los primeros 5 días}$$

$$Ia_t = \lambda_1 S_t \left(\frac{P_t}{P_t + S_t} \right)^\alpha \quad \text{para los días siguientes}$$

Siendo: RO_t la escorrentía superficial del tiempo t

Pe_t la precipitación efectiva del tiempo t

Ia_t la abstracción inicial del tiempo t

λ el coeficiente de abstracción inicial (igual a 0.2)

S_t la capacidad de almacenamiento del suelo en el tiempo t

λ_1 y α parámetros del modelo

Una vez calculada la escorrentía superficial, la misma se transita utilizando el principio de embalse lineal, obteniendo la escorrentía superficial a la salida de la cuenca (SRO) como:

$$SRO_t = b1 \times RO_t + b2 \times RO_{t-1} + b3 \times q_{t-1}$$

Siendo: SRO_t y SRO_{t-1} el caudal superficial a la salida de la cuenca en los tiempos t y $t-1$ respectivamente

$b1, b2$ y $b3$ Coeficientes dependientes de K , el coeficiente de almacenamiento de la cuenca, correspondiente a un parámetro del modelo.

- Cálculo de la infiltración de agua en el suelo:

$$F_t = P_t - I_{a_t} - RO_t$$

Siendo: F_t la infiltración en el tiempo t

- Cálculo de la evapotranspiración:

$$ET_t = EV_t + TR_t$$

$$\text{Con } EV_t = PANC \times EVP_t \text{ y } TR_t = C1 \times (Sabs - S_t - \theta_W)$$

Siendo: ET_t la evapotranspiración en el tiempo t

EV_t la evaporación en el tiempo t

TR_t la transpiración en el tiempo t

PANC el coeficiente de tanque

EVP_t la evapotranspiración potencial en el tiempo t, obtenida a partir de datos de campo.

Sabs la capacidad máxima de almacenamiento del suelo

C1 un parámetro del modelo

θ_W el punto de marchitez permanente del suelo

- Cálculo del drenaje hacia la zona saturada y zona subterránea:

$$DR_t = C2 \times (Sabs - S_t - \theta_f)$$

Siendo: DR_t la tasa de drenaje en el tiempo t

C2 un parámetro del modelo

θ_f la capacidad de campo del suelo

- Cálculo de la escorrentía sub-superficial:

$$THR_t = C3 \times DR_t$$

Siendo: THR_t la escorrentía sub-superficial a la salida de la cuenca en el tiempo t

C3 un parámetro del modelo

- Cálculo del flujo hacia la zona saturada:

$$PRT_t = (1 - C3) \times DR_t$$

Siendo: PRT_t el flujo hacia la zona saturada en el tiempo t

- Cálculo del flujo base:

$$BF_t = BCOEF \times PR_t^E$$

Siendo: BF_t el flujo base de salida de la cuenca en el tiempo t

BCOEF y E parámetros del modelo

- Pérdida por percolación profunda:

$$DPR_t = (1 - BCOEF) \times PR_t^E$$

Siendo: DPR_t la percolación profunda en el tiempo t

Una vez calculados los 3 tipos de escorrentía considerados, se calcula la escorrentía total de salida de la cuenca como la suma de las mismas:

$$TRO_t = SRO_t + THR_t + BF_t$$

Luego, al final de cada día se realiza el balance en la capa sub-superficial del suelo para obtener la capacidad de almacenamiento del suelo, a ser utilizada en el día siguiente:

$$S_{t+1} = S_t - F_t + ET_t + DR_t$$

Tabla 2.- Parámetros calibrables del modelo Geetha et al. (2008).

Parámetro	Descripción
λ_1	Coeficiente para el cálculo de la abstracción inicial
α	Exponente para el cálculo de la abstracción inicial
C1	Coeficiente transpiración
C2	Coeficiente drenaje
C3	Coeficiente de ruteo de flujo subsuperficial
BCOEF	Coeficiente de ruteo del flujo subterráneo
E	Exponente de ruteo del flujo subterráneo
K	Coeficiente de almacenamiento de la cuenca

Para este modelo, además de considerar su formulación original, se propusieron dos modificaciones. La primera modificación (Modificación 1) consistió en limitar la transpiración al valor de agua disponible en el suelo, siendo que la formulación original permite transpirar además el agua gravífica. La segunda modificación (Modificación 2) consistió en sustituir el cálculo de la evapotranspiración propuesta por el modelo, por los valores de evapotranspiración potencial (ETP) calculada según el método de Penman-Monteith en la estación de INIA más cercana a cada subcuenca.

Modelo GR4J propuesto por Perrin C. et al. (2003)

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) propuesto y mejorado por Perrin, C. et al. (2000, 2003), es un modelo de 4 parámetros, basado en la cuantificación de la humedad del suelo. El mismo toma como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial para luego modelar el almacenamiento en el suelo teniendo en cuenta dos reservorios. El modelo transita la escorrentía a través de un hidrograma unitario simple, y la escorrentía sub-superficial o flujo lento, a través otro hidrograma unitario que se almacena en un reservorio no lineal, para luego formar ambas partes de la escorrentía total (Figura 3).

$$\text{Perc} = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right)^4 \right]^{1/4} \right\}$$

$$S = S - \text{Perc}$$

Finalmente, la escorrentía total (P_r) se calcula como: $P_r = S - \text{Perc}$, la cual es transitada hasta la salida de la cuenca, de acuerdo a lo siguiente:

- El 10% de P_r , correspondiente a la escorrentía directa, se transita a través de un hidrograma unitario simple.
- El 90% restante, correspondiente a la escorrentía subsuperficial o flujo lento, se transita a través de un hidrograma unitario y un posterior reservorio no lineal.

El tiempo base de ambos hidrogramas unitarios se representa a través de un único parámetro (x_4) y la capacidad de almacenamiento del reservorio no lineal constituye otro parámetro (x_3).

Además, el modelo representa un intercambio de agua subterránea, a través de una función dependiente de un cuarto parámetro x_3 .

Tabla 3.- Parámetros calibrables del modelo GR4J.

Parámetro	Descripción
x1	Capacidad máxima del primer reservorio
x2	Coefficiente de intercambio con el agua subterránea
x3	Capacidad máxima del segundo reservorio
x4	Tiempo base del hidrograma unitario

Para éste modelo cabe aclarar que se decidió, luego de varios testeos realizados, fijar al parámetro de intercambio con otras cuencas en cero, resultando $F(x_1)=F(x_2)=0$. Esto se debe a que no se cuenta con ningún tipo de información ni fundamento que permita darle valores fiables distintos a cero. Además se optó por fijar el parámetro que regula la capacidad del primer reservorio (x_1) igual al valor de agua disponible promedio de la cuenca, esto se hizo siguiendo el mismo razonamiento que para el modelo de Geetha. Estas consideraciones devuelven un modelo con sólo dos parámetros calibrables.

Implementación y calibración de los modelos

Para implementar ambos modelos en las subcuencas seleccionadas, se recopiló la siguiente información necesaria: datos de precipitación diaria registrados en los pluviómetros de influencia de cada subcuenca, en el período 1981-2014, suministrados por INUMET, UTE, INIA y ANA (Brasil), datos climáticos registrados en las estaciones meteorológicas más cercanas a cada subcuenca, en el período 1981-2014, suministrados por INUMET e INIA. Luego, para la etapa de calibración de los parámetros, se recabaron los datos diarios de caudal, en el período 1981-2010, registrados en las estaciones hidrométricas localizadas al cierre de cada subcuenca por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA). Cabe mencionar que tanto a los datos de precipitación como de caudal se les realizó un análisis de calidad, con el objetivo de disponer de series consistidas para la implementación y calibración de los modelos.

Ambos modelos fueron programados en la plataforma MatLab. Esto permitió incorporar fácilmente todas las modificaciones propuestas.

La calibración de ambos modelos se realizó en diferentes períodos comprendidos en el período 1981-2010, en función de la confiabilidad de los datos de caudal. La misma se realizó en forma manual, con el objetivo de encontrar el paquete de parámetros que mejor ajuste la serie modelada a la observada. El ajuste se basó, por una lado, en una comparación observacional entre ambas series; y por otro, en maximizar el coeficiente de correlación (R^2) y el número de Nash-Sutcliffe (NS) y en minimizar la diferencia porcentual entre los volúmenes de escurrimiento totales modelados y observados (ΔV). Luego, una vez obtenidos los parámetros calibrados, se procedió a realizar la validación de los mismos, también en diferentes períodos, en los que los datos observados de caudal fueron considerados confiables.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la calibración de ambos modelos para cada subcuenca. En el caso del modelo propuesto por Geetha, se incluyen tanto los resultados de la formulación original como de las modificaciones propuestas en este trabajo, en forma progresiva.

Tabla 4.- Indicadores obtenidos en la calibración y validación – cuenca del río Cebollatí

Indicador\Modelo	Calibración (Enero-Diciembre 2001)				Validación (Abril-Setiembre2002)			
	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J
R2	0.66	0.82	0.84	0.94	0.71	0.83	0.83	0.95
NS	0.26	0.59	0.65	0.87	0.19	0.53	0.65	0.90
Dif V (%)	-50.09	-32.37	9.60	12.99	-60.58	-42.82	1.25	3.22

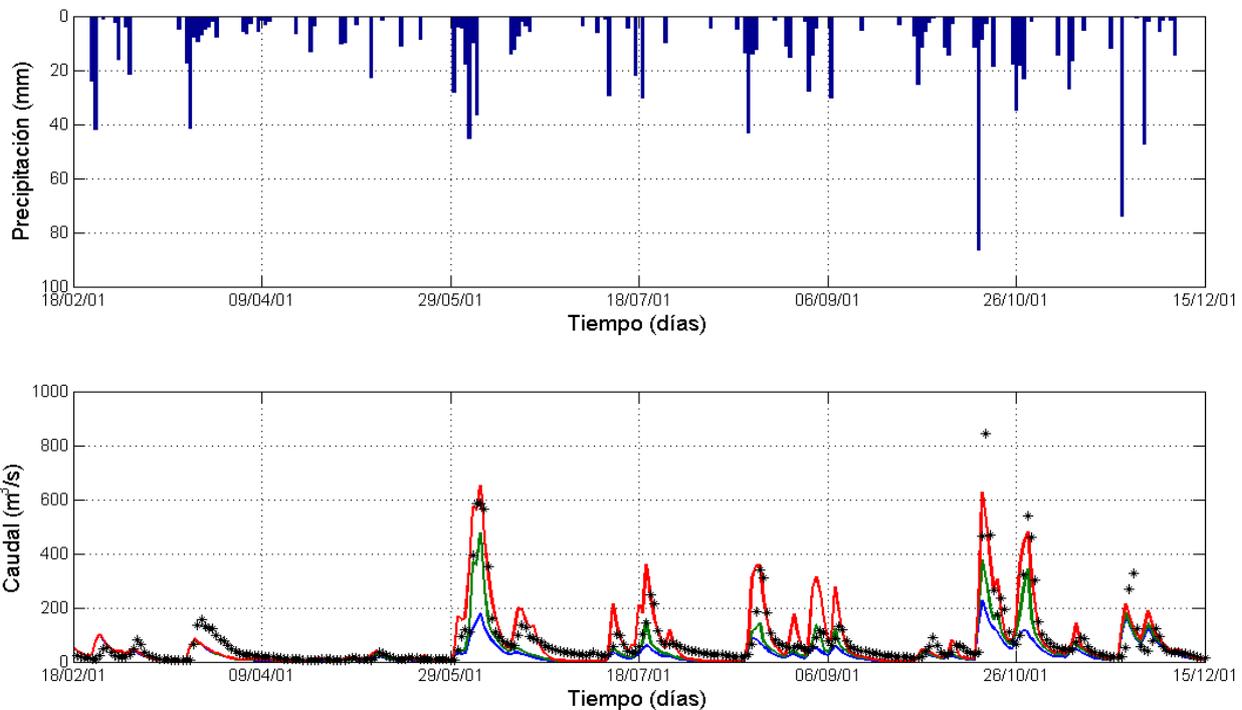


Figura 4.- Comparación de los caudales simulados con los modelos basados en el modelo de Geetha et al (2008) y los caudales observados – cuenca del río Cebollati.

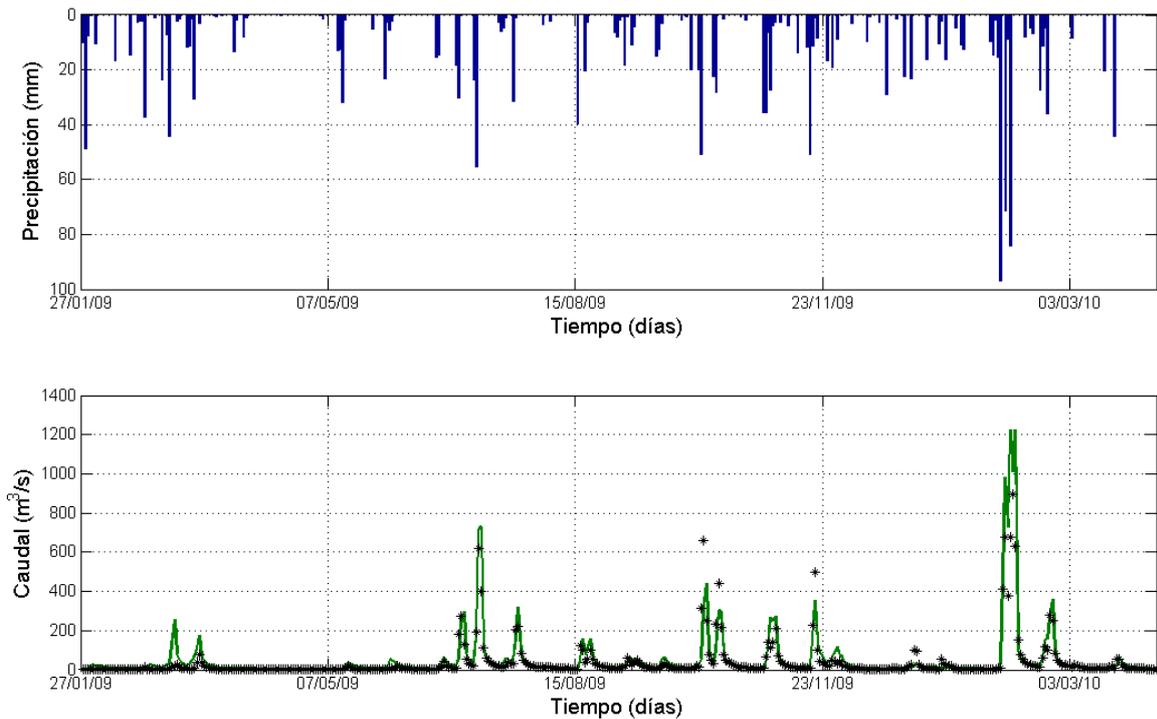


Figura 5.- Comparación de los caudales simulados con el modelo GR4J y los caudales observados – cuenca del río Cebollati.

Tabla 5.- Indicadores obtenidos en la calibración y validación – cuenca del río Santa Lucía

Indicador\Modelo	Calibración (Enero2009-Diciembre 2010)				Validación (Abril-Setiembre 2005)			
	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J
R2	0.79	0.85	0.92	0.92	0.75	0.84	0.91	0.93
NS	0.57	0.70	0.84	0.74	0.24	0.50	0.81	0.86
Dif V (%)	-38.60	-24.88	12.10	17.69	-68.24	-54.77	-17.93	-13.69

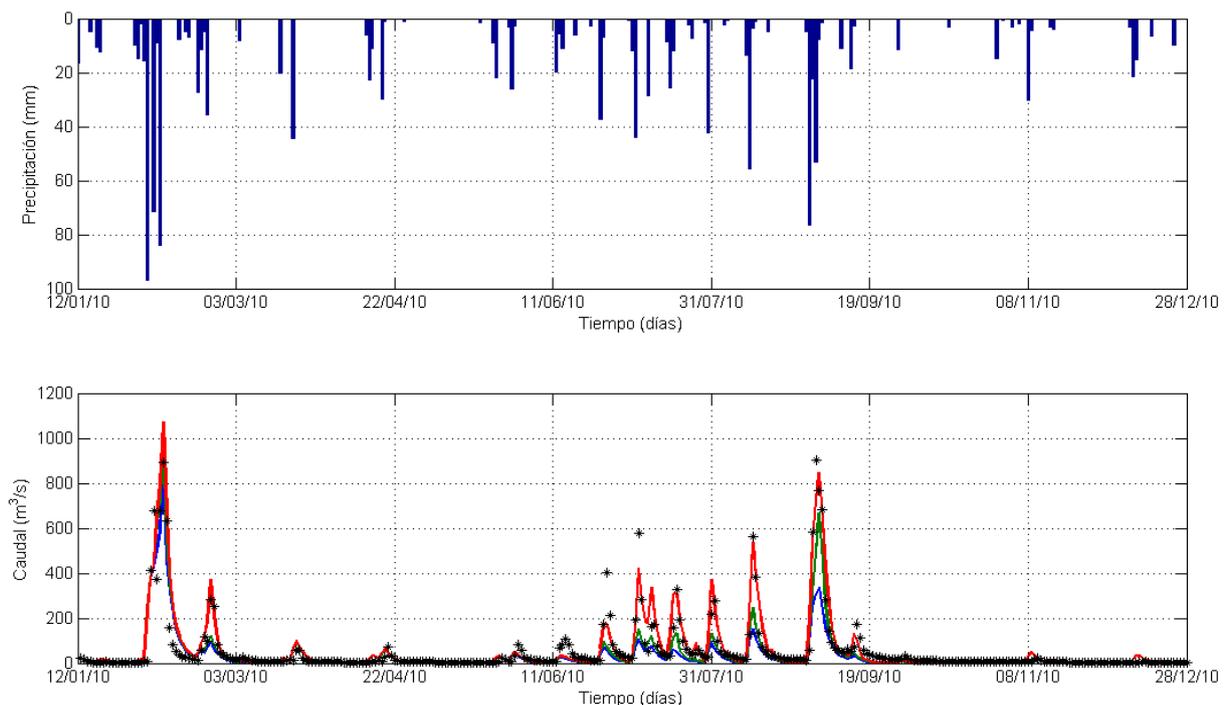


Figura 6.- Comparación de los caudales simulados con los modelos basados en el modelo de Geetha et al (2008) y los caudales observados – cuenca del río Santa Lucia.

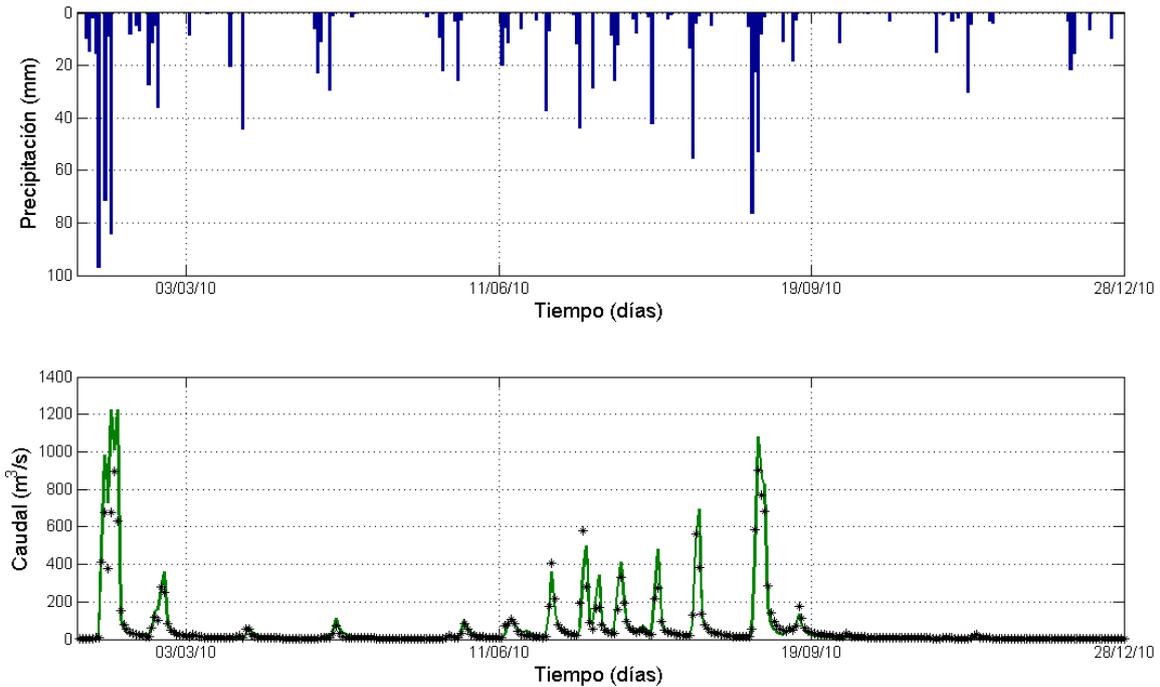


Figura 7.- Comparación de los caudales simulados con el modelo GR4J y los caudales observados – cuenca del río Santa Lucia

Tabla 6.- Indicadores obtenidos en la calibración y validación – cuenca del arroyo Maldonado

Indicador\Modelo	Calibración (Enero2004-Diciembre2005)				Validación (Octubre2007-Marzo2008)			
	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J
R2	0.77	0.82	0.82	0.88	0.80	0.92	0.93	0.96
NS	0.37	0.58	0.65	0.75	0.51	0.79	0.86	0.91
Dif V (%)	-64.22	-52.27	-24.59	-25.32	-42.23	-22.27	-8.06	-11.08

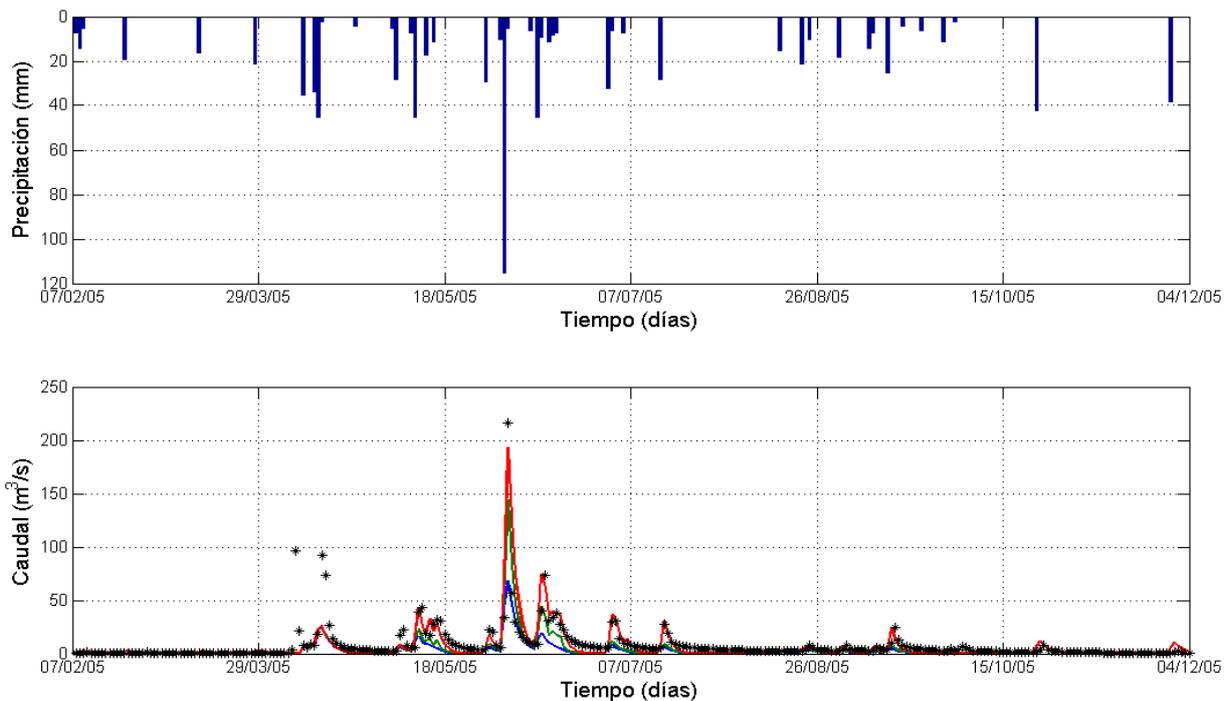


Figura 8.- Comparación de los caudales simulados con los modelos basados en el modelo de Geetha et al (2008) y los caudales observados – cuenca del arroyo Maldonado.

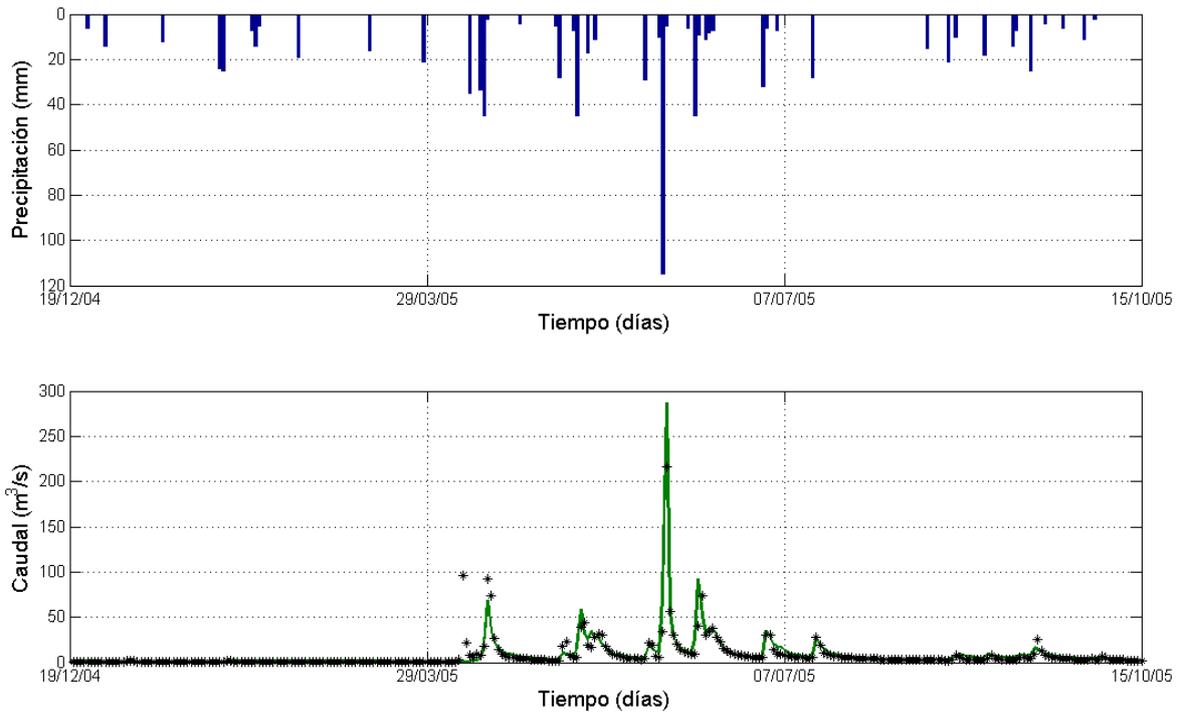


Figura 9.- Comparación de los caudales simulados con el modelo GR4J y los caudales observados – cuenca del arroyo Maldonado

Tabla 7.- Indicadores obtenidos en la calibración y validación– cuenca del río Cuareim

Indicador\Modelo	Calibración (Enero2001-Diciembre2004)				Validación (Mayo-Noviembre 2005)			
	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J	Geetha	Mod1	Mod2	GR4J
R2	0.89	0.89	0.89	0.85	0.85	0.85	0.84	0.85
NS	0.74	0.80	0.79	0.71	0.62	0.64	0.63	0.62
Dif V (%)	-29.08	-12.31	-2.16	-10.93	-40.77	-19.78	-20.36	-40.79

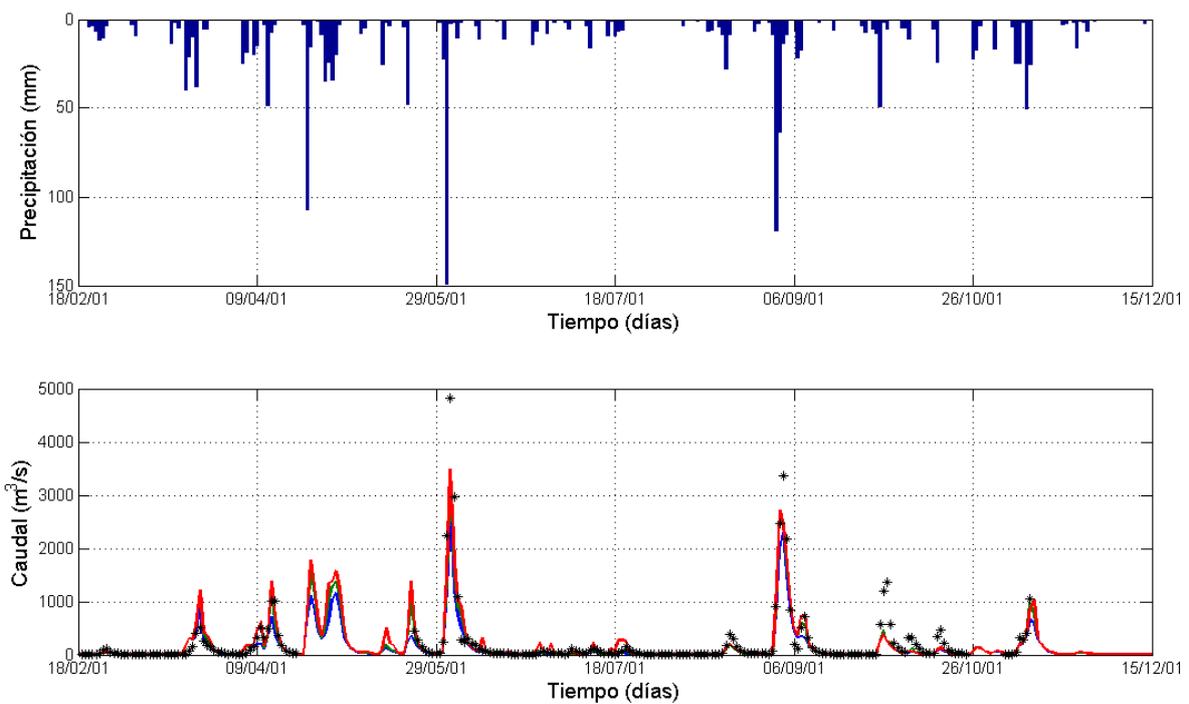


Figura 10.- Comparación de los caudales simulados con los modelos basados en el modelo de Geetha et al (2008) y los caudales observados – cuenca del río Cuareim.

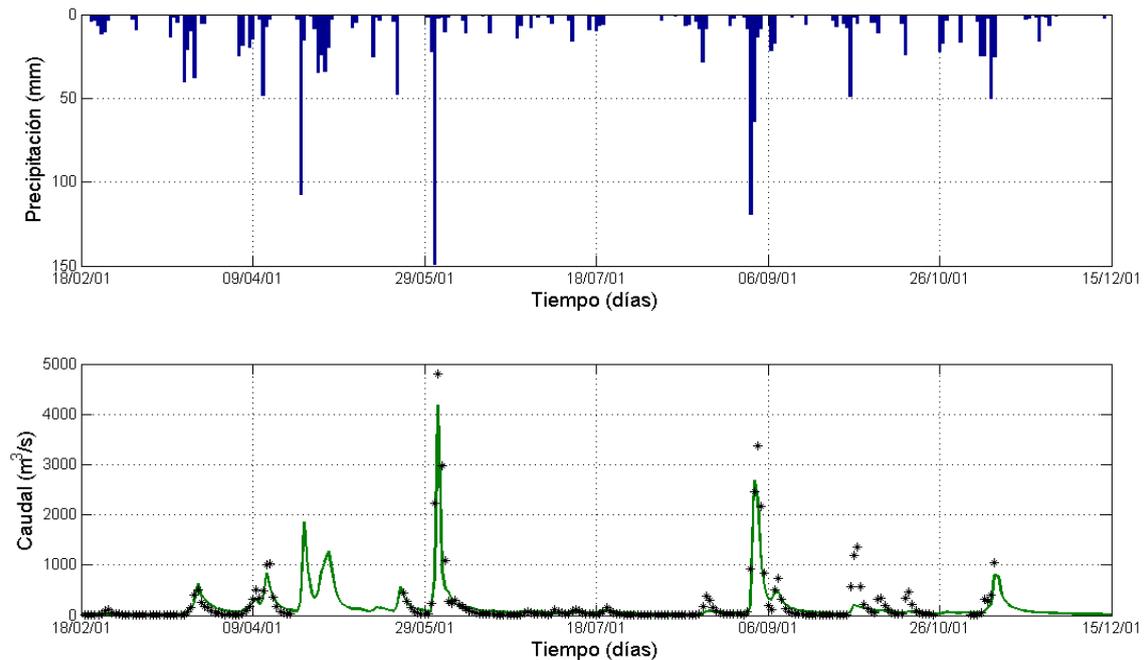


Figura 11.- Comparación de los caudales simulados con el modelo GR4J y los caudales observados – cuenca del río Cuareim.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En ambos modelos fue incorporado, como parámetro, el valor del agua disponible del suelo. Esto es de gran interés a la hora de evaluar la aplicabilidad de dichos modelo en otras cuencas no aforadas del país debido a que, por un lado, dichos parámetros tienen un gran significado físico dentro de los modelos y, por otro, su valor es un dato disponible para todos los suelos del país.

Los resultados obtenidos por ambos modelos indican un buen ajuste entre los caudales modelados y registrados en las suebuenas en los que fueron implementados. Asimismo, para los modelos basados en Geetha et al. (2008), los indicadores calculados indican que el mejor ajuste se obtiene para la versión que incorpora las dos modificaciones propuestas en este trabajo.

Sin embargo, observando los resultados de los modelos de Geetha en la cuenca del arroyo Maldonado, se puede ver que su desempeño disminuye cuando se trata de cuencas pequeñas y más aún para caudales de estiaje. Este problema no parece estar presente en el caso del modelo GR4J, lo que se explica por la diferencia en la estructura de ambos modelos, ya que el primero está basado en un modelo de eventos extremos, mientras que el segundo está basado en la cuantificación de la humedad del suelo, con formulaciones bien distintas para la obtención del escurrimiento directo.

Estos resultados motivan la implementación de ambos modelos en otras cuencas, con el objetivo de analizar, con un mayor número de cuencas, el desempeño de ambos modelos en cuencas de diferente tamaño y para diferentes rangos de caudal (caudales bajos, medios y altos). Este análisis nos permitirá avanzar en el entendimiento de los procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales.

REFERENCIAS

- Fernández, J.C., 1979. Estimaciones de densidad aparente, retención de agua a tensiones de $-1/3$ y -25 bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica y porcentaje de materia orgánica. 2da Reunión Técnica. Montevideo: Facultad de Agronomía, Universidad de la República.
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K., y Pandey, R. P., 2008. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. En: Water resources management, 22(2), pp.165-190.
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K., y Pandey, R. P., 2007. Modifications to SCS-CN method for long-term hydrologic simulation. En: Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(5), pp.475-486.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Molfino, J.H. y Califra, A., 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay. Montevideo: División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.
- Molfino, J.H., 2009. Estimación de Agua Disponible en los grupos CONEAT.
- Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), 2011. Manual de diseño y construcción de pequeñas presas.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1), 275-289.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F. y Durán, A., 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua en los suelos del Uruguay. Montevideo: Facultad de Agronomía. (Boletín de Investigación, 10).
- Temez J.R., 1977. Modelo matemático de transferencia precipitación aportación. ASINEL.
- USDA, 2010. Part 630 Hydrology -National Engineering Handbook (NEH). Natural Resources Conservation Service, U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.