

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA DIARIA EN CUENCAS CON DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE URUGUAY

Santiago Narbondo, Magdalena Crisci y Christian Chreties

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - Facultad de Ingeniería - Universidad de la República – Uruguay.  
E-mail: snarbondo@fing.edu.uy, mcrisci@fing.edu.uy, chreties@fing.edu.uy

## Introducción y objetivo

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.

A su vez 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.

En el presente trabajo se evalúa el desempeño del modelo hidrológico GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier, Perrin, C. et al., 2003) en diferentes cuencas representativas del Uruguay. Asimismo, se analizan y se asocian los 2 parámetros más importantes del modelo a las características físicas de las cuencas.

## Área de estudio

Se seleccionaron 13 cuencas distribuidas en todo el país y con diferentes características (Figura 1), con el objetivo de obtener una buena representación del comportamiento de las cuencas de Uruguay. Dentro la selección se eligió aquellas que contaran con más de una estación hidrométrica en la progresiva del cauce principal y que tuvieran una cantidad admisible de pluviómetros funcionando en un periodo común. Se incluyeron para la implementación del modelo cuencas desde 300 km<sup>2</sup> a 4500 km<sup>2</sup> con el fin de comprobar su performance en todos los rangos de caudal.

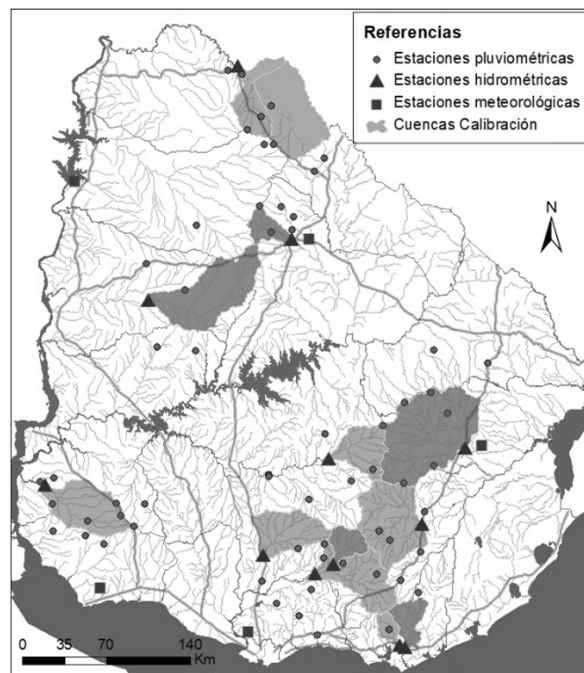


Figura 1.- Cuencas seleccionadas para la implementación y calibración del modelo.

## Modelo GR4J

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) propuesto y mejorado por Perrin, C. et al. (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 una parte del escurrimiento a través de un hidrograma unitario simple, y otra parte, a través otro hidrograma unitario que se almacena en un reservorio no lineal, para luego formar con ambas la escorrentía total (Figura 2).

El modelo es de estructura muy sencilla, determina en primer lugar la precipitación neta ( $P_n$ ) o la evaporación neta ( $E_n$ ), dependiendo de si la precipitación ( $P$ ) es mayor a la evapotranspiración potencial ( $E$ ) o viceversa.

En caso de que  $P_n$  o  $E_n$  sea mayor a 0, una fracción de la misma ( $P_s$  o  $E_s$  respectivamente) aporta al reservorio de producción (capa sub-superficial del suelo), la cual es función del contenido de agua en el suelo ( $S$ ). Siendo  $x_1$  (mm) un parámetro del modelo que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (es decir, del reservorio de producción). Una vez calculado  $P_s$  o  $E_s$ , el contenido de agua en el suelo es actualizado. Luego, se estima la percolación hacia la zona saturada del suelo y se actualiza nuevamente el contenido de agua en el mismo.

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

El 10% de  $Pr$ , 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  $x_4$  (días) y la capacidad de almacenamiento del reservorio no lineal constituye otro parámetro,  $x_3$  (mm).

Además, el modelo representa un intercambio de agua subterránea o con otras cuencas, a través de una función dependiente de un cuarto parámetro  $x_2$  adimensional.

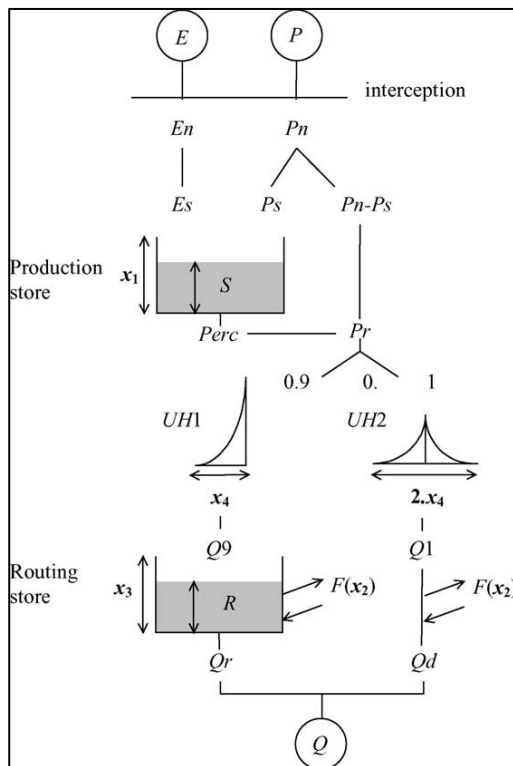


Figura 2.- Esquema del modelo GR4J (Perrin, C. et al., 2003).

## Calibración

El modelo fue implementado y calibrado individualmente en 13 cuencas de Uruguay. En primer lugar se realizó una calibración de los parámetros del modelo con el objetivo de encontrar el paquete de parámetros que mejor ajuste la serie modelada a la medida para cada una de las cuencas. Para esto el ajuste tuvo como objetivo maximizar el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), mientras se minimice la diferencia de volumen en porcentaje entre medido y simulado ( $\Delta V$ ). La calibración se realizó en forma manual, utilizando para cada cuenca el período común con datos confiables de precipitación y de caudal. Cabe destacar que dicho período abarcó entre 2 y 5 años, dependiendo la cuenca.

Una vez calibrado el modelo en las diferentes cuencas, se procedió a buscar una relación entre los parámetros del mismo y las características físicas de cada cuenca, con el objetivo de regionalizar los parámetros más importantes. Lo primero que surge de esta búsqueda es la asociación del parámetro  $x_1$  del modelo (que indica la capacidad máxima del primer reservorio) con el agua disponible media de los suelos de la cuenca. Por otro

lado, se encontró una relación entre el tiempo base del hidrograma unitario (parámetro  $x_4$ ) y el tiempo de concentración de la cuenca, pudiendo estimar  $x_4$  como una función del tiempo de concentración calculado en días.

De esta manera se tienen dos escenarios de calibración, uno en el cual se calibran los 4 parámetros en forma independiente y otro en el cual 2 de los parámetros se determinan a partir de las características de la cuenca, calibrando los 2 restantes.

## Resultados

Se presentan los indicadores de calibración para el segundo escenario de calibración (Tabla 1), es decir para los parámetros  $x_1$  y  $x_4$  obtenidos a partir de las características físicas de la cuenca.

Tabla 1.- Indicadores de la modelación por cuencas.

Cuenca	NS	Dif Vol (%)
Casupá	0.69	19.25
Cebollatí	0.82	1.93
Cuareim	0.46	5.70
Dayman	0.68	2.28
Maldonado	0.77	19.06
Olimar	0.75	6.69
San Carlos	0.83	5.97
San Salvador	0.70	10.80
Santa Lucía	0.76	7.28
Santa Lucía Chico	0.59	5.32
Tacuarembó Chico	0.84	4.12
Tacuarembó	0.65	24.63
Yi	0.68	16.48

Se observa en la Tabla 1 que en todos los casos se obtienen resultados muy satisfactorios, con valores de NS mayores a 0.65 (excepto para Santa Lucía Chico y Cuareim). En cuanto a la diferencia de volumen de escorrentía se observa que no difiere en más de 20% la serie simulada con la modelada salvo en el caso de la cuenca del Río Tacuarí.

## Discusión

Se tiene un modelo simple, de 4 parámetros, de los cuales 2 pueden ser estimados a partir de las características físicas de la cuenca. Se plantea entonces la posibilidad de obtener un paquete de parámetros regional con el cual se logre estimar el caudal en cuencas no aforadas. Para ello es necesario fijar o estimar los parámetros  $x_2$  y  $x_3$ , de forma tal que los resultados de la calibración sean admisibles, es decir que el desempeño del modelo no pierda calidad al fijar dichos parámetros. La estrategia a seguir es hallar un rango de valores de los parámetros  $x_2$  y  $x_3$  para los cuales los resultados del modelo sean admisibles y se lo pueda utilizar para cuencas no aforadas.

## Referencias

- Molfino, J.H. y Califra, A. (2001). *Agua disponible de las tierras del Uruguay*. División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay
- Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) (2011). *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas*. Montevideo, Uruguay
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation". *Journal of Hydrology*, 279(1), 275-289.
- 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.