

# AVANCES EN EL DESARROLLO DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN CONTINUA.

Eliana Jorquera<sup>a</sup>, Juan F. Weber<sup>a</sup>, Santiago M. Reyna<sup>b</sup>

a: Laboratorio de Hidráulica – Departamento de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba – Universidad Tecnológica Nacional. Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. e.jorquera@civil.frc.utn.edu.ar.

b: Prof. Titular Plenario Obras Hidráulicas e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba

## Introducción

Durante muchos años la modelación hidrológica fue planteada en forma agregada debido a las limitaciones computacionales o debido a que la cantidad de datos disponibles no era suficiente para poder aplicar un modelo distribuido espacialmente (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes y la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos, junto con las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica han permitido el amplio desarrollo de este campo. En el presente trabajo se utilizó con un software para modelación hidrológica distribuida de código abierto desarrollado por la Universidad de Colorado denominado TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo orientado a la simulación de eventos que puede representar los procesos de: retención superficial, interceptación vegetal, infiltración y escurrimiento superficial (England et al., 2007). Se seleccionó este modelo por tener una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales y por estar escrito en forma modular de modo que se pueden incorporar nuevos procesos. El lenguaje de programación es C. Se incorporó a TREX el proceso de evaporación que antes no simulaba y se adicionó un nuevo método de cálculo de infiltración, denominando a esta versión modificada C-TREX.

## Materiales y métodos

Se adicionó la simulación de la evaporación desde el agua retenida en las pequeñas depresiones en la ladera, en la vegetación o bien desde los cauces. El modelo lee un valor de evaporación potencial y a partir de éste y de la disponibilidad de agua en el sistema calcula la evaporación real, lo cual permite recuperar la capacidad de retención superficial del agua entre dos episodios lluviosos. Para compatibilizar los pasos de tiempo habituales de los datos de evaporación potencial (diario) y de cálculo de TREX, se agregó la interpolación temporal horaria de la evaporación potencial considerando tres patrones de variación en función de las horas de insolación en el día. Los patrones propuestos fueron: escalonado, lineal y sinusoidal. Luego en función de la evaporación potencial y de la disponibilidad de agua ( $h_{disp}$ ) el valor de la evaporación real será:

- $EVp \leq h_{disp} \rightarrow EVr = EVp$
- $EVp < h_{disp}$  y  $h_{disp} \geq 0 \rightarrow EVr = h_{disp}$

Posteriormente, se trabajó con el módulo de infiltración. La versión original de TREX calcula este término por medio de la ecuación de Green y Ampt (GA). Este método, estima la cantidad de agua que infiltra en el suelo y el exceso de agua que queda disponible para la escorrentía. Sin embargo no estima la redistribución y el movimiento del agua en el interior del suelo al cesar la infiltración. La extensión del método de GA con redistribución de humedad modificado (MGAR) propuesta por Gowdish (2007) plantea la posibilidad de simulación

de procesos de infiltración en el suelo considerando múltiples estados de encharcamiento consecutivos correspondientes a diferentes periodos de lluvia.

Se define hiato de lluvia al período en que cesa la precipitación o es menor a la conductividad hidráulica saturada. El modelo asume que durante el hiato de lluvia el perfil rectangular de humedad se alargará debido al flujo no saturado causado por fuerzas capilares y de gravedad, mientras que el contenido de humedad decrecerá desde el valor de saturación  $\Theta_s$  hasta un nuevo contenido de humedad en la superficie  $\Theta_0$  (Figura 1).

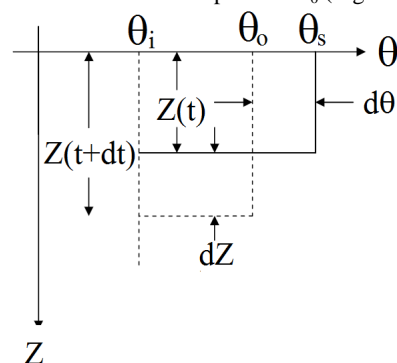


Figura 1.- Redistribución del perfil de humedad durante el hiato de la lluvia (tomado de Godwish 2007)

Durante el hiato de lluvia, partiendo de la ecuación de continuidad que describe la redistribución de humedad (Figura 1) y la ley de Darcy para un medio poroso no saturado se obtiene la ecuación base del cálculo de la redistribución de humedad del método GAR propuesta por Ogden y Saghafian (1997, citado por Muñoz-Carpena y Godwish, 2005),

$$\frac{d}{dt} \theta_o = \frac{1}{z} \left[ i - K_i - \left( \frac{K_s G(\theta_i, \theta_o)}{z} + K(\theta_o) \right) \right] \quad [1]$$

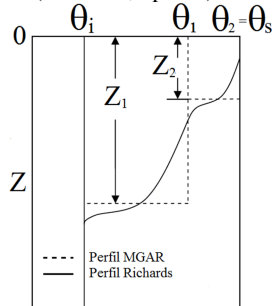
con  $K_i = K(\theta_i)$ , y donde  $G(\theta_i, \theta_o)$  representa la integral de impulso capilar a través del frente saturado. Existen varias expresiones analíticas de  $G$  dependientes de la expresión de la función de retención de humedad y conductividad no saturada del suelo elegida. Los autores del método GAR proponen la utilización de la expresión de Brooks y Corey, siendo

$$G(\theta_i, \theta_o) = S_{av} \left[ \frac{(\theta_o)^{3+1/\lambda} - (\theta_i)^{3+1/\lambda}}{1 - (\theta_i)^{3+1/\lambda}} \right] \quad [2]$$

Donde  $S_{av}$  es la altura de succión,  $\Theta$  la saturación relativa del suelo para un contenido genérico de humedad ( $\theta$ ) y  $\lambda$  el índice de distribución de poros.

La solución explícita conjunta de las ecuaciones 1 y 2 permiten el cálculo de la redistribución de la humedad durante el hiato de lluvia. Estas ecuaciones se derivan de los mismos principios que la ecuación de GA. Si durante la redistribución se produce encharcamiento MGAR propone introducir un segundo perfil rectangular de humedad donde se produce la infiltración. Esta nueva infiltración se calcula por GA en la parte superior del perfil (Figura 2). A medida que el agua encharcada se

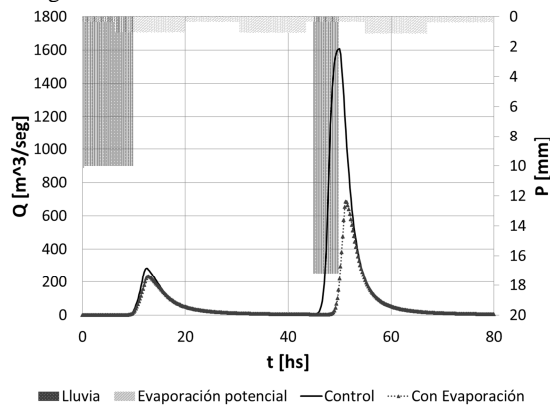
infiltra y el segundo perfil saturado va penetrando en el suelo Godwish (2007) propone que puedan coexistir ambos frentes de mojado hasta que ambos alcancen la misma profundidad. Si se produce un nuevo hiato de lluvia ambos frentes se distribuyen y si comienza a llover en el frente superior existirá infiltración. El número y duración de los frentes dependerá del tipo de suelo, la frecuencia de eventos lluviosos y la longitud de los períodos de redistribución. Este método fue validado por sus autores aplicándolo a distintos tipos de suelos y distintas configuraciones de lluvia y comparadas con la solución numérica de la ecuación de Richards arrojando muy buenos resultados (Godwish, op. cit.).



**Figura 2.-** Elongación del perfil de humedad según GAR (tomado de Muñoz-Carpena y Godwish, 2005)

## Resultados

Para evaluar el comportamiento del módulo de evaporación se aplicó el modelo TREX y C-TREX a una cuenca cuadrada de 67,4 Km<sup>2</sup>. A los efectos de observar el fenómeno de evaporación se prescindió de la infiltración. La evaporación potencial media diaria fue de 9 mm/día y el método de interpolación seleccionado fue escalonado. La configuración de la lluvia se observa en la Figura 3 en el eje de ordenadas secundario junto con la evaporación potencial. Debido a la magnitud de evaporación potencial seleccionada se destaca el decaimiento del pico del hidrograma al tener en cuenta este fenómeno.



**Figura 3.-** Comparación de hidrogramas con y sin evaporación

Posteriormente para comparar los modelos de infiltración GA y MGAR siguiendo a Godwish (2007) se aplicaron a distintos tipos de suelos de acuerdo a la clasificación de la USDA un evento compuesto por episodios lluviosos e hiatos de lluvia. En Tabla 1 y Tabla 2 se sintetizan algunos de los parámetros de infiltración y la distribución e intensidad de lluvia utilizados.

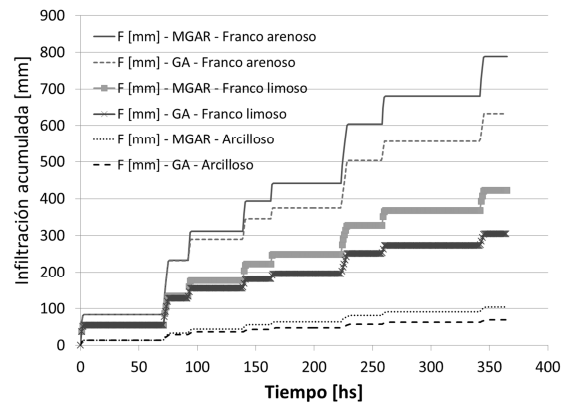
**Tabla 1.-** Parámetros en función del tipo de suelo

N°	Textura USDA	Parámetros GA y MGAR					Intensidad Lluvia	
		Ks [mm/h]	Sav [mm]	θs	θwp	θr	A [mm/h]	B [mm/h]
3	Franco arenoso	21.80	215.30	0.412	0.095	0.041	70	80
5	Franco limoso	6.80	329.60	0.486	0.133	0.015	40	50
11	Arcilla	0.60	622.50	0.385	0.272	0.090	10	20

**Tabla 2.-** Distribución de los episodios lluviosos en el evento

Episodio	t <sub>i</sub> [h]	i [mm/h]				
		t = t <sub>i</sub>	t = t <sub>i</sub> +1	t = t <sub>i</sub> +2	t = t <sub>i</sub> +3	t = t <sub>i</sub> +4
1	0	A	A	0.00	0.00	0.00
2	71	A	B	A	A	0.00
3	92	A	A	0.00	0.00	0.00
4	139	B	A	0.00	0.00	0.00
5	163	A	0.00	0.00	0.00	0.00
6	223	A	A	B	B	A
7	258	B	B	0.00	0.00	0.00
8	342	A	B	B	0.00	0.00

En la Figura 4 se muestra la infiltración acumulada por calculada por el método GA y MGAR para estos tres tipos de suelo.



**Figura 4.-** Infiltración acumulada para tres tipos de suelo calculada por los métodos GA y MGAR.

Se puede ver que para el primer episodio lluvioso la infiltración acumulada calculada por ambos métodos coincide, mientras que al producirse sucesivamente hiatos de lluvia y lluvia, el método MGAR permite recuperar al suelo su capacidad de infiltración y esto se acentúa a mayor conductividad hidráulica del suelo.

## Conclusiones

Se destaca el desempeño del método de infiltración MGAR que permite considerar la recuperación de la capacidad de infiltración del suelo con una base física pero sin la necesidad de incorporar gran cantidad de parámetros o de ecuaciones. La incorporación de éstos módulos a C-TREX permite la simulación de nuevos procesos que antes no podían ser representados. Como continuación de esta línea de trabajo se incorporarán módulos de evapotranspiración, de percolación y un modelo para el flujo subterráneo.

## Bibliografía

- England, J., Velleux, M., Julien, P. (2007). "Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed". *Journal of Hydrology*, 347(1):229-241.
- Muñoz-Carpena, R., Gowdsh, L. (2005) "Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos" *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol.VII*.
- Gowdsh, L. (2007) *An improved Green-Ampt soil infiltration and redistribution method and its application to 1-dimensional and quasi 3-dimensional (point source) flow domains. Dissertation.* University of Florida, Gainesville Florida.
- Vieux, B. E. (2004): "Distributed hydrologic modeling using GIS". *Water Science and Technology Library*. Vol. 48.