



## ANÁLISIS DE CIRCULACIÓN DE CRECIDAS MEDIANTE EL PROGRAMA SHEE. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO HUERVA, ESPAÑA

*Flood flow analysis using SHEE software. Application to Huerva river basin, Spain*

Jesús Mateo Lázaro y José Ángel Sánchez Navarro

Universidad de Zaragoza; Pedro Cerbuna, 12, 50.009 Zaragoza, España. E-mail: [jesusmateo@eid.es](mailto:jesusmateo@eid.es)

**Abstract:** The SHEE package (simulation of hydrological extraordinary episodes) provides a set of features that combine to build, manipulate, analyze and compare the hydrological processes involved in generating flood basins. The application makes use of existing sources of data available in Spain that are of interest for hydrology among which, digital terrain models, coverage of rainfall and curve number among others. Has been selected as river basin pilot the Huerva river basin, where there have been episodes of severe flooding. A very striking feature of this basin is the geometry consisting of two distinct sub-arranged in parallel, a markedly more distant than the other exit point of the basin in Zaragoza. An study of generation and routing of the flood along the main channel and the results clearly reflect the influence of this geometrical configuration. Another study of storms with similar characteristics located in each of the sub-basins, the results are compared by finding marked differences between each case.

**Key words:** Flash-floods, hydrometeorology, distributed modelling, river network, hydrological processes.

**Resumen:** La aplicación SHEE (simulación hidrológica de episodios extraordinarios) proporciona un conjunto de funcionalidades que se combinan entre sí para construir, manipular, analizar y comparar los procesos hidrológicos que intervienen en las cuencas generando crecidas. La aplicación hace uso de las fuentes de datos más actuales disponibles en España que son de interés para la hidrología entre las que destacan, modelos digitales del terreno, coberturas de lluvias, y número de curva entre otras. Se ha seleccionado la cuenca del río Huerva como cuenca piloto, en la cual se han producido episodios de crecida muy severos. Una característica muy llamativa de esta cuenca es su geometría compuesta por dos subcuencas bien diferenciadas dispuestas en paralelo, una marcadamente más lejana que la otra del punto de salida de la cuenca en Zaragoza. Se realiza un estudio de generación y circulación de la crecida a lo largo del cauce principal cuyos resultados reflejan con claridad la influencia de esta configuración geométrica. Se realiza otro estudio de tormentas de similares características localizadas en cada una de las subcuencas, y se comparan los resultados, constatando diferencias muy marcadas entre cada caso.

**Palabras clave:** Inundaciones repentinas, hidrometeorología, modelos distribuidos, redes de drenaje, procesos hidrológicos.

Mateo Lázaro, J., Sánchez Navarro, J.A. (2012): Análisis de circulación de crecidas mediante el programa SHEE. Aplicación a la cuenca del río Huerva, España. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 24 (3-4): 187-195.

En esta publicación se analiza la formación y evolución de crecidas en una cuenca hidrológica. Se utiliza la cuenca del río Huerva por presentar una marcada división en dos subcuencas, lo cual permite distinguir y comparar entre las

crecidas que se originan en partes distintas de la cuenca. También hay que señalar que se ha escogido esta cuenca porque se tiene constancia, a través de distintos registros históricos, de la ocurrencia de riadas.

Las inundaciones representan el riesgo natural más destructivo en la cuenca Mediterránea y en la última década del siglo XX, en España han causado pérdidas valoradas en 12.000 millones de euros según un estudio del Consorcio de Compensación de Seguros y del Instituto Geológico y Minero de España (2004). No sólo provocan pérdidas humanas, sino que destruyen cultivo, infraestructuras y a menudo provocan serios deterioros ambientales.

Las inundaciones repentinas se relacionan con eventos extremos y poco frecuentes de precipitaciones intensas, y ocurren generalmente en pequeñas cuencas hidrográficas no aforadas, las cuales son reconocidas como las más vulnerables a las inundaciones repentinas producidas por tormentas (Ruín *et al.*, 2008).

Éstas inundaciones son el resultado de la combinación de condiciones meteorológicas e hidrológicas, y su conocimiento resulta fundamental, tanto en estudios interpretativos de eventos, como en el desarrollo de modelos predictivos (Creutin y Borga, 2003; Anquetin *et al.*, 2010; Collier, 2007). La respuesta de una cuenca a una determinada entrada de precipitación depende de los procesos dominantes que influyen en la génesis de escorrentía dentro de la cuenca, de acuerdo con el estado de influencia dominante y con el tipo de evento hidrometeorológico (Hirschboeck *et al.*, 2000; Merz y Blöschl, 2003; Parajka, 2010). Además, la respuesta de la cuenca puede cambiar de unos eventos a otros como consecuencia de la diferente distribución espacio-temporal del fenómeno hidrometeorológico dentro de la cuenca (Saulnier y Le Lay, 2009; Borga *et al.*, 2007).

La influencia de la variabilidad de las precipitaciones en la respuesta hidrológica de las cuencas ha sido un tema recurrente en la investigación hidrológica en los últimos 40 años (e.g., Dawdy y Bergmann, 1969; Wilson *et al.*, 1979; Woods y Sivapalan, 1999). Varios estudios con modelos distribuidos han considerado los impactos de la variabilidad espacial de las precipitaciones en la simulación de hidrogramas (e.g., Wood *et al.*, 1988; Krajewski *et al.*, 1991; Naden, 1992; Beven y Wood, 1993; Obled *et al.*, 1994; Ogden y Julien, 1994; Blöschl y Sivapalan, 1995; Bell y Moore, 2000; Moulin *et al.*, 2008; Sangati *et al.*, 2009; Saulnier y Le Lay, 2009).

La sensibilidad de la generación de escorrentía asociada a las condiciones de humedad antecedente es también una cuestión que ha sido tratada por numerosos investigadores (Hino *et al.*, 1988; Loague, 1992; Karnieli *et al.*, 1993; Cerdá, 1997; Ceballos y Schnabel, 1998; Fitzjohn *et al.*, 1998; Castillo *et al.*, 2003; Vivoni *et al.*, 2007). La humedad del suelo representa una gran influencia en el comportamiento hidrológico de una cuenca, en particular para inundaciones repentinas en las zonas mediterráneas (Sturdevant-Rees *et al.*, 2001; Cosandey *et al.*, 2005; Ravazzani *et al.*, 2007; Borga *et al.*, 2007; Norbiato *et al.*, 2008; Manus *et al.*, 2009; Brocca *et al.*, 2009). La escasez de recursos hídricos en regiones semiáridas suele ir acompañado de breves períodos de precipitaciones muy intensas que pueden generar inundaciones potencialmente catastróficas (Martín-Rosales *et al.*, 2007).

Cuando el flujo recorre un cauce, se produce una variación entre el hidrograma de entrada y el de salida, dando



Fig. 1.- Situación de la cuenca del río Huerva.

como resultado una atenuación del pico de la crecida. A este fenómeno se le conoce como circulación, tránsito, propagación o laminación (*routing*), y es otro de los procesos que influyen decisivamente en la variabilidad de las crecidas.

El estudio se realiza mediante simulaciones con las que se puede ver la evolución de la crecida, los cambios que experimenta de unos puntos a otros, cómo actúan los procesos de laminación, qué sectores de la cuenca son los que tienen mayor potencial de aporte en el momento principal de la crecida, etc.

Las crecidas del Huerva han sido espectaculares en ciertos momentos de la historia. En el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas del Ministerio del Interior (2008), existen referencias de algunos episodios registrados en esta cuenca, por ejemplo, en Mayo de 1917 el Huerva registró una crecida de 137 m<sup>3</sup>/s, medición tomada en el aforo del embalse de Mezalocha. En el mes de Mayo de 1921 el Huerva sufrió una de sus mayores crecidas en el siglo XX; su caudal fue de 660 m<sup>3</sup>/s, y en Zaragoza el río rebasó el encauzamiento inundando el paseo de la Mina.

Recientemente, en 2003, hubo una espectacular crecida que ocasionó numerosos daños en María, Cadrete y Cuarte debido a la ocupación urbanística de la llanura de inundación del río y, en algunas zonas (Cadrete, Cuarte), incluso se intercepta la zona de flujo preferente.

Estos hechos históricos reafirman el interés de este estudio, aplicable a cuencas medianas y pequeñas en las que se producen fenómenos de inundaciones. En la tabla 1 se dan las principales características hidromorfológicas de la cuenca del río Huerva.



Fig. 2.- Cuenca río Huerva. Crecida del 8 de mayo de 2003 a la salida del parque de Muel.



Fig. 3.- Cuenca río Huerva. Crecida del 8 de mayo de 2003. Estación de aforo de Zaragoza.

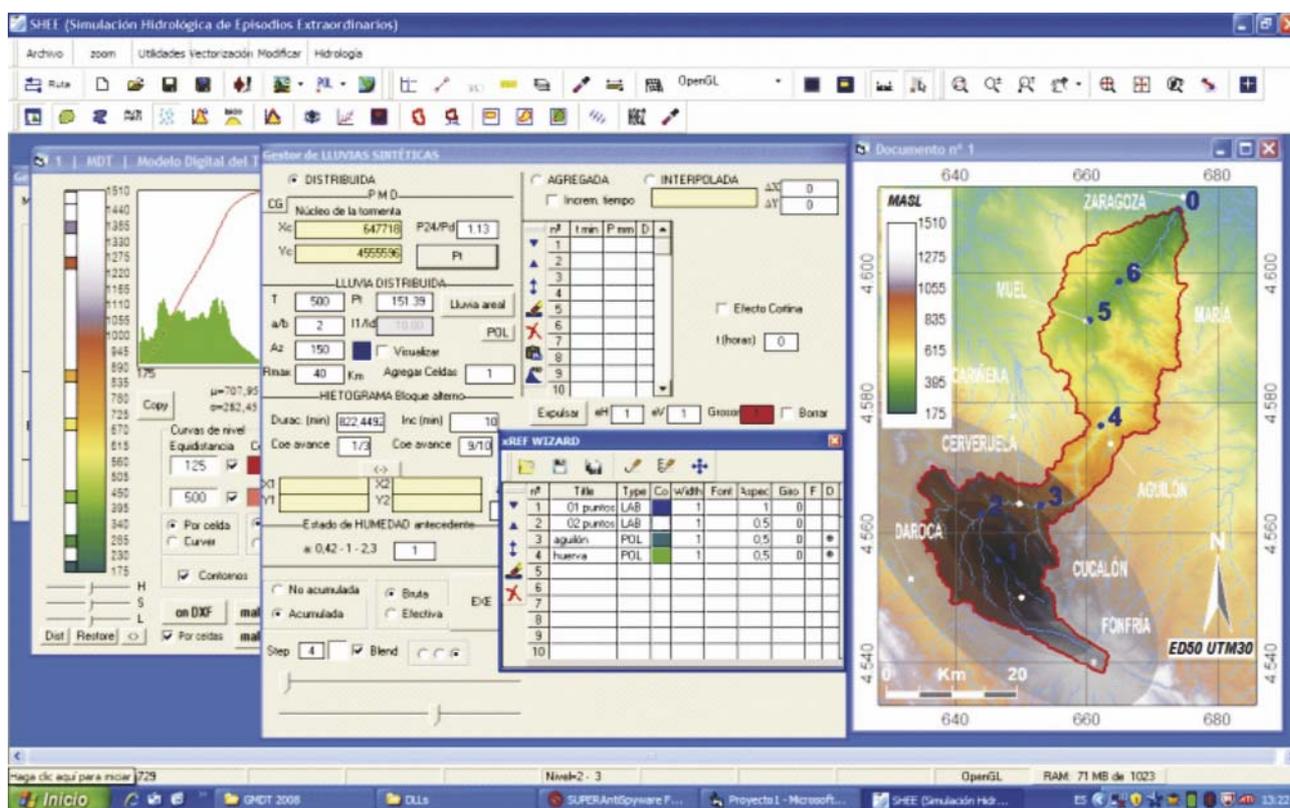


Fig. 4.- Interfaz del programa SHEE. Utiliza modelos digitales del terreno y modelos hidrológicos, de lluvia, humedad del suelo y circulación por la red de drenaje.

Área km <sup>2</sup>	LCP km	S <sub>1</sub> %	S <sub>2</sub> %	Tc H	CN (II)	Po mm	P <sub>D</sub> mm	P <sub>1h</sub> mm	Q <sub>P</sub> m <sup>3</sup> /s
1.041	115,55	1,02	11,38	14,96	70,6	21,18	125	52,21	1.230

Área Área de la cuenca.  
 LCP Longitud del cauce principal.  
 S<sub>1</sub> Pendiente del cauce principal.  
 S<sub>2</sub> Pendiente media de la línea de corriente.  
 Tc Tiempo de concentración (Kirpich).  
 CN Número de curva del SCS.  
 Po Umbral de escorrentía.  
 P<sub>D</sub> Precipitación horaria de 500 años.  
 P<sub>1h</sub> Precipitación horaria de 500 años.  
 Q<sub>P</sub> Caudal punta con el método racional (500 años).

Tabla 1.- Características hidrológicas de la cuenca de Arás.

Para realizar este trabajo ha sido utilizado el programa informático SHEE (simulación hidrológica de episodios extraordinarios), realizado en el departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza (Mateo-Lázaro, 2011; Mateo-Lázaro y Sánchez-Navarro, 2011). En esencia, el programa es una adaptación de los modelos hidrológicos tradicionales a las nuevas tecnologías y fuentes de datos.

## Metodología

Un método hidrometeorológico completo precisa de la combinación de varios modelos, que en el caso general son: modelo geométrico de la cuenca; modelo de lluvia que distribuye ésta en el espacio y en el tiempo; modelo de transformación lluvia-escorrentía que pretende diferenciar (o separar) entre pérdidas y escorrentía (a las pérdidas también se les llama abstracciones, detracciones, retenciones y déficit de escorrentía); y modelos de circulación de flujo (también llamados de tránsito, propagación, laminación, escurrimiento y descarga).

En la figura 5 se muestra esquemáticamente la definición geométrica de una cuenca, su delimitación y la estructura de su red de drenaje caracterizadas mediante un modelo digital de elevaciones (MDE). También se señalan los distintos modelos que el programa aplica a cada componente (celda y tramo de red).

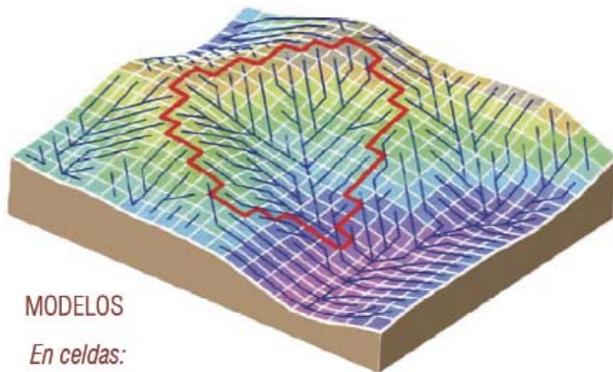
Para aplicar la metodología, el programa hace uso de diversas fuentes de datos disponibles en la actualidad, entre las que cabe destacar:

- Los MDT. Para este trabajo se parte de un modelo tipo GRID o RASTER de paso de malla 20 m, obtenido para la producción de ortofotos del SIGPAC<sup>1</sup>, que resulta adecuado para propósitos hidrológicos.
- En relación con lluvias se dispone de la Cobertura de Máximas Lluvias diarias del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 1999), que proviene de Tesis Doctorales (Ferrer Polo, 1996) y que contiene los datos de partida para la simulación de lluvias.
- En el modelo de transformación lluvia-escorrentía se tiene la cobertura de número de curva (CN) que es el modelo más utilizado en la actualidad y que en España se dispone de una cobertura formada con criterios homogéneos para todo el territorio peninsular. Ha sido publicada por el Ministerio de Medio Ambiente y también proviene de una Tesis doctoral reciente (Ferrer-Julιά *et al.*, 1995, 1997, 2003, 2004).

Para realizar el estudio se define un episodio estándar, para toda la cuenca o en una parte de ella según el caso. Los episodios estándar tienen estas características:

- Patrón de lluvia:
  - Lluvia de referencia: 500 años.
  - Duración: La precipitación diaria ocurre en un periodo de unas 14 horas.
  - Forma: Elíptica con relación de ejes 2/1 (a/b).
  - Núcleo de la tormenta: en el centro de la cuenca.
  - Orientación: Eje mayor paralelo al eje de cuenca.

- Coeficiente de avance de tormenta: 1/3.
  - Evolución del coeficiente de avance: estático.
  - Condiciones hidrológicas: Estado de humedad antecedente estándar (AMC tipo II).
- Modelo: circulación de flujo. Calibración mediante número de Manning y tiempo de respuesta ( $T_{LAG}$ ).  
En los episodios estándar se toman eventos de 14 horas



### MODELOS

#### En celdas:

- Lluvia (Rainfall): Modelo distribuido.
- Pérdidas (Abstractions): modelo número de curva.

#### En red de drenaje:

- Circulación (Routing): Modelo Muskingum-Cunge.

**Fig. 5.-** Definición esquemática de una cuenca hipotética mediante un modelo digital de elevaciones (MDE) y los distintos modelos hidrológicos aplicados en las simulaciones de episodios.

de duración de lluvia atendiendo principalmente a los siguientes criterios:

- En la investigación realizada se toman las curvas de intensidad-duración-frecuencia de la precipitación que provienen de otros estudios y Tesis doctorales, según las cuales, para distribuir toda la precipitación que puede ocurrir en un día, es necesario extender el episodio a 14 horas.
- Las precipitaciones intensas de corta duración producen efectos significativos en cuencas pequeñas. En cuencas medianas y grandes, el efecto de laminación es más acusado.
- Si bien las precipitaciones intensas habituales en la zona mediterránea tienen duraciones más cortas, esto ocurre en cuencas pequeñas. Puesto que un frente de lluvia se desplaza por el espacio y en el tiempo durante un gran número de horas, al considerar una gran extensión como es la cuenca del río Huerva (1.000 km<sup>2</sup>), el episodio más intenso no se da simultáneamente en toda la cuenca por lo que la duración total de dicho episodio es mayor que la duración del mismo en una fracción más pequeña de la cuenca o en subcuencas pequeñas.
- Dado el carácter excepcional de los episodios considerados en el artículo (periodo de retorno de 500 años), sus cualidades no tienen, necesariamente, que ser semejantes a las de los episodios frecuentes (e.g. duración de la lluvia).

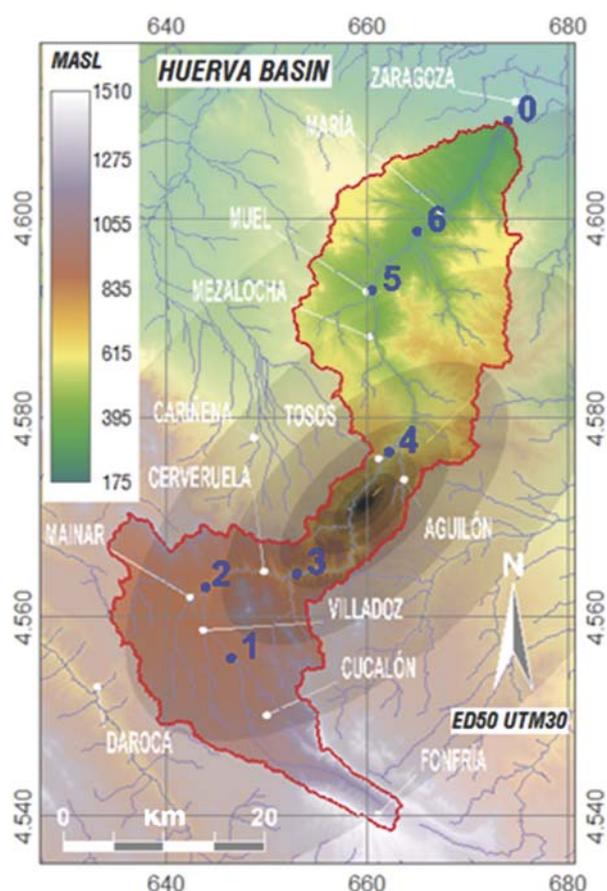
<sup>1</sup> Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas del Ministerio de Medio Ambiente español.

Se estudian dos aspectos principales, cómo se generan y distribuye la crecida por la cuenca y, cuando la tormenta se localiza en una zona restringida de la cuenca, qué ocurre en las diferentes partes de la cuenca, incluso en aquellas donde no ha llovido.

### Circulación de la crecida por la cuenca

El programa utilizado permite conocer la evolución de la crecida en cualquier punto de la cuenca o identificar el caudal punta en un punto cercano a la cabecera y seguir su evolución a lo largo del flujo.

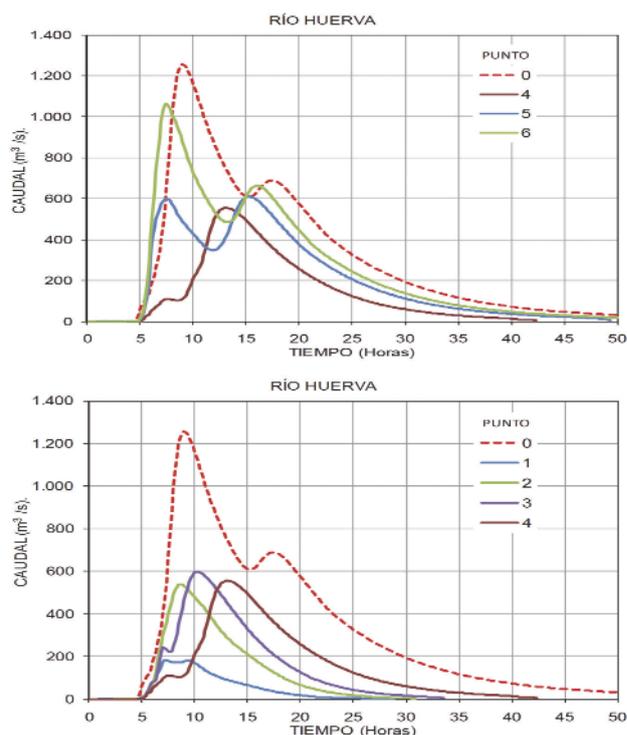
En la figura 6 se representa la cuenca completa del río Huerva junto con el mapa de isoyetas del episodio completo representadas mediante técnicas de fusión (*blend*) de color.



**Fig. 6.-** Modelo digital del terreno utilizado donde se resalta la cuenca del río Huerva y la red de cauces con área superior a 5 km<sup>2</sup>. También se representa el mapa de isoyetas del episodio completo de patrón elíptico con el núcleo de la tormenta en el centro de la cuenca.

En la figura 7 se representan los hidrogramas del evento estándar en varios puntos distribuidos en el cauce principal de la cuenca del río Huerva, con lo cual se puede ver la evolución de la crecida:

- En el punto 1, situado en la zona de cabecera con un área de cuenca de 111 km<sup>2</sup>, la crecida alcanza 181 m<sup>3</sup>/s.
- En el punto 2, con un área de cuenca de 303 km<sup>2</sup>, se al-



**Fig. 7.-** Hidrogramas asociados a lluvia de 500 años en el río Huerva.

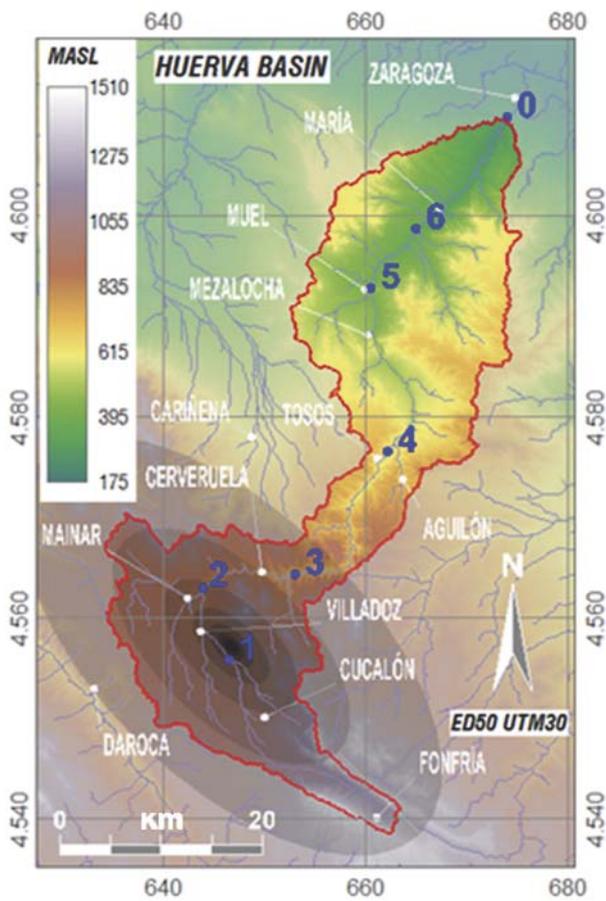
canzan 540 m<sup>3</sup>/s con las aportaciones por la margen izquierda de los arroyos del Orcajo en Villadoz, y de Villarroya y Villalpando en Mainar, que drenan el Campo de Romanos.

- En el punto 3, aguas abajo de Cerveruela, la cuenca tiene 412 km<sup>2</sup>, y el caudal punta se incrementa poco, 597 m<sup>3</sup>/s.
- En el punto 4, en Tosos, se ha cruzado la rama aragonesa de la Ibérica en un tramo de cauce de 22 km de longitud donde la cuenca se estrecha considerablemente. En este punto, el área de cuenca apenas se ha incrementado hasta 522 km<sup>2</sup>, y resulta llamativo que el caudal punta es menor que en el punto anterior, 554 m<sup>3</sup>/s. En este tramo se ha producido un acusado efecto de laminación debido a la gran longitud recorrida y a la falta de aportaciones significativas.
- En el punto 5, en Muel, la crecida que viene desde Fonfría tiene una punta de 608 m<sup>3</sup>/s, pero 8 horas antes ha pasado otra crecida de 600 m<sup>3</sup>/s que se ha generado en la porción de cuenca que se abre desde Tosos hasta Muel. En este punto la cuenca tiene una superficie acumulada de 715 km<sup>2</sup>.
- En el punto 6, en Botorrita, el área de cuenca tiene 878 km<sup>2</sup>. En este punto, la primera crecida (la generada desde Tosos) llega a 1.065 m<sup>3</sup>/s, en tanto que la segunda crecida llega 8,5 horas más tarde con un pico de 663 m<sup>3</sup>/s. Esta última crecida se va laminando, aunque el caudal punta crece porque es alimentado por el caudal de recesión de la primera crecida.
- En el punto de desagüe de la cuenca en Zaragoza (punto 0), el área total es de 1.040 km<sup>2</sup>, y los caudales punta

son de 1.254 m<sup>3</sup>/s y de 689 m<sup>3</sup>/s en cada crecida, y llevan un desfase de casi 9 horas.

**Tormentas localizadas**

En este apartado se estudia cómo evoluciona una crecida ocasionada por una tormenta localizada en una porción de la cuenca (Figuras 8 a 11). Para ello se realizan dos simulaciones en el río Huerva, una en cada subcuenca. Ambas lluvias han sido definidas con un patrón elíptico de diámetros 25/50 km (b/a) y con un periodo de retorno de 500 años.

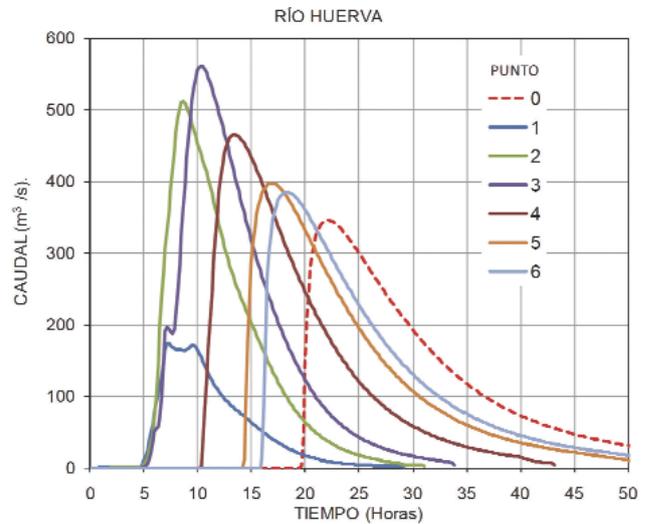


**Fig. 8.-** Simulación de lluvia localizada en la zona alta de la cuenca del río Huerva. Se representa el mapa de isoyetas del episodio completo. El evento queda restringido a la zona alta de la cuenca con el núcleo de la tormenta en el centro y el patrón elíptico orientado al noroeste.

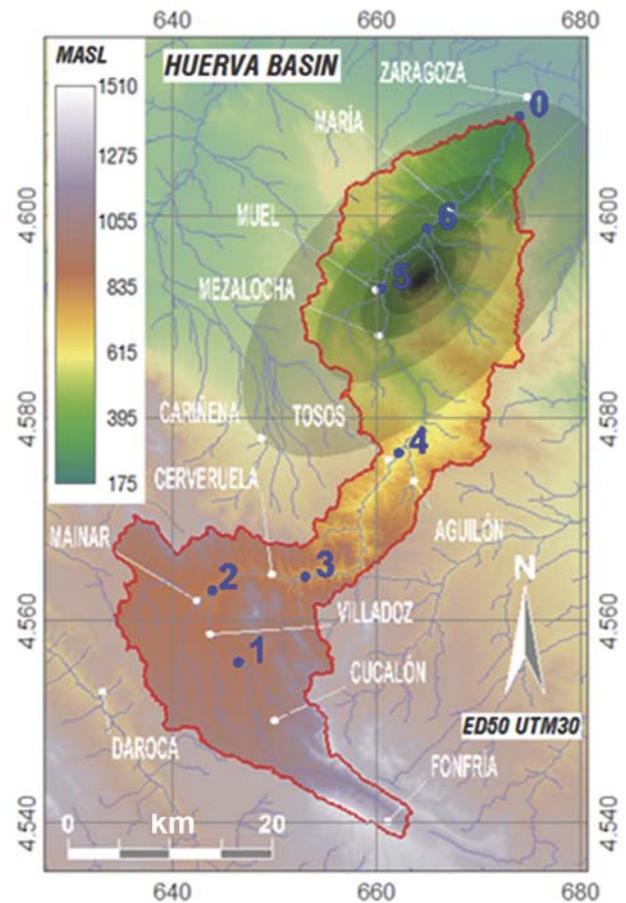
En la simulación de lluvia en la parte alta se observa el crecimiento de caudal en el primer tramo de río localizado dentro de la tormenta (puntos 1 a 3). En el punto 3, situado en el límite de la tormenta, es donde se registra el valor máximo de la crecida, (561 m<sup>3</sup>/s). A partir de aquí, al río ya no le llegan aportaciones y la avenida experimenta una acusada laminación a lo largo de los 67 km de cauce que queda por recorrer hasta Zaragoza donde la punta de la crecida tarda en llegar desde Cerveruela 12 horas y tiene 345 m<sup>3</sup>/s.

En la simulación de lluvia en la parte baja se observa el continuo incremento de caudal originado por las aporta-

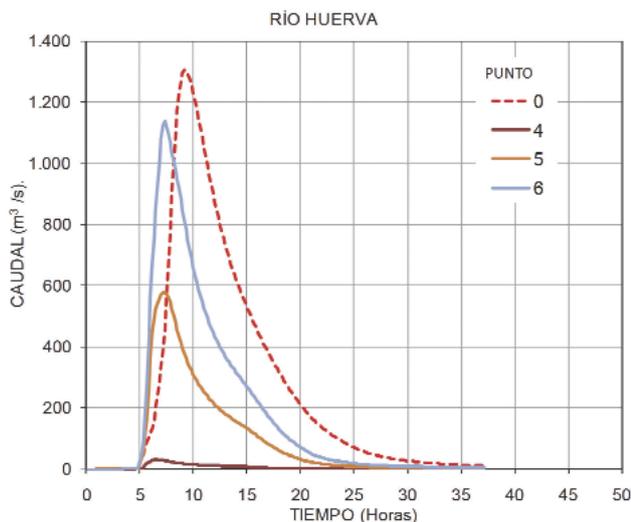
ciones de las cuencas laterales. Desde que se produce la mayor intensidad del aguacero hasta que la punta de 1.303 m<sup>3</sup>/s llega a Zaragoza apenas han transcurrido 4 horas.



**Fig. 9.-** Simulación de lluvia localizada en la zona alta de la cuenca del río Huerva. Hidrogramas obtenidos en diferentes puntos del curso principal. Se observa una laminación progresiva con un descenso del pico de la crecida.



**Fig. 10.-** Simulación de lluvia localizada en la zona baja de la cuenca del río Huerva. Se representa el mapa de isoyetas del episodio completo. El evento queda restringido a la zona baja de la cuenca con el núcleo de la tormenta en el centro y el patrón elíptico orientado al noreste.



**Fig. 11.-** Simulación de lluvia localizada en la zona baja de la cuenca del río Huerva. Hidrogramas obtenidos en diferentes puntos del curso principal. Se observa un crecimiento progresivo tanto del volumen del hidrograma como del pico de la crecida.

En la tabla 2 se presentan algunos datos obtenidos con estas simulaciones donde se observan grandes diferencias en los tiempos de respuesta, en la capacidad de absorción del terreno y, en consecuencia, en el caudal punta de la crecida.

Zona	Lluvia total hm <sup>3</sup>	Lluvia efectiva hm <sup>3</sup>	C. esco-rrentía %	T <sub>LAG</sub> horas	Q <sub>P</sub> m <sup>3</sup> /s
Alta	53	19	36	17	345
Baja	68	38	56	4	1.303

**Tabla 2.-** Características de los eventos simulados. El tiempo de respuesta (T<sub>LAG</sub>) y el caudal punta (Q<sub>P</sub>) están dados para Zaragoza.

## Conclusiones

La aplicación SHEE trata de transmitir al usuario un entorno de trabajo sencillo y flexible, y puede manejar las fuentes de datos de interés hidrológico más actuales, entre las que destacan, modelos digitales del terreno, coberturas de lluvias, y cobertura de número de curva entre otras. De este modo, la aplicación permite configurar múltiples modelos de los diferentes procesos hidrológicos como son la distribución espacial y temporal de la lluvia, el estado previo de humedad del suelo (AMC) y el modo de circulación del agua por la cuenca. Todo ello ha permitido realizar esta investigación sobre la generación de crecidas en una cuenca mediada como es la del río Huerva en España, en la cual se han producido severos episodios.

Del estudio de circulación de crecidas por la cuenca se desprenden varios aspectos relevantes, entre los que destacan:

- Es la parte de cuenca más baja, situada a partir de Tosos, la que genera mayor riesgo potencial en Zaragoza.
- Las crecidas originadas por la parte de la subcuenca

más alta, cuando llegan a Zaragoza han experimentado una laminación considerable, con la consiguiente disminución del caudal punta.

- Como el volumen de esta crecida a la altura de Mezalocha es de 33 hm<sup>3</sup>, y los volúmenes de los embalses de Las Torcas y Mezalocha son, respectivamente, de 6,66 hm<sup>3</sup> y 4 hm<sup>3</sup>, la capacidad de regular crecidas en esta cuenca es solamente para periodos de retorno cortos. Además, la parte de la cuenca con mayor riesgo potencial no es interceptada por los embalses.

En el estudio de tormentas localizadas se corrobora el mayor riesgo potencial que la parte baja de la cuenca produce en Zaragoza, y se concluye lo siguiente:

- Para lluvias del mismo rango, la parte baja de la cuenca tiene capacidad para generar mayor caudal.
- El efecto de laminación de crecidas originadas en la parte alta es bastante notable, en torno al 40%, en tanto que en la parte baja no se da esta característica.
- Para Zaragoza, en eventos localizados en la parte baja, el tiempo de respuesta es notablemente inferior.
- En igualdad de condiciones de humedad previa, la capacidad de absorción de agua de la zona baja es considerablemente menor.

Existe la posibilidad de poner en práctica esta metodología, de forma automática y extensiva, para un elevado número de cuencas como las correspondientes a todo el territorio español, puesto que se dispone de la información básica de partida de todo el territorio, lo que permitiría generar resultados obtenidos con criterios homogéneos para todas las cuencas y posteriormente realizar análisis, investigaciones, comparaciones y clasificar el territorio con criterios homogéneos de riesgo. Esperamos que la innovación metodológica asociada al desarrollo de esta clase de software continúe creciendo dado el potencial beneficio que puede ofrecer a la sociedad en general.

## Agradecimientos

Se expresa gratitud a los Ministerios de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de Fomento y al Instituto Geográfico Nacional por haber facilitado la información básica para poder realizar este trabajo.

También se expresa gratitud a quienes han aportado información o conocimiento, en concreto a Montserrat Ferrer del CEDEX, por su cobertura del número de curva cuando todavía no se había publicado en el Ministerio de Medio Ambiente; a Rafael Clavería de la Diputación General de Aragón por haber facilitado las coberturas de modelos digitales del terreno cuando todavía eran de difícil acceso; a Miguel Ángel García Vera de Confederación Hidrográfica del Ebro por los datos hidrológicos y por su siempre buena disposición; a Blanca y a Merche por su ayuda en aspectos formales; a mis compañeros Enrique, Emilio, José Luis, Francisco, Carlos, Rafael, Luis Ángel, Ana, Pilar, Verónica, Regina, Inma, Cecilia, Vanesa, Arantxa, Esther, Alejandro y José Pedro por estar siempre presentes; a Juan Mandado y Antonio Pérez como amigos y colaboradores desinteresados; y a D. Francisco Javier Martínez Gil como fuente inagotable de conocimiento.

## Referencias

- Anquetin, S., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., Manus, C., (2010): *Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the Gard 2002 flash-flood event*. Journal of Hydrology 394 (1–2), 134–147.
- Bell, V.A., Moore, R.J., (2000): *The sensitivity of catchment runoff models to rainfall data at different spatial scales*. Hydrology and Earth System Sciences 4 (4), 653–667.
- Beven, K.J., Wood, E.F., (1993): *Flow routing and the hydrological response of channel networks*. In: Beven, K.J., Kirkby, M.J. (Eds.), Channel Network Hydrology. John Wiley, Chichester, 99 p.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., (1995): *Scale issues in hydrological modelling: a review*. Hydrological Processes 9, 251–290.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., Sangati, M., (2007): *Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps*. Journal of Hydrometeorology 8 (5), 1049–1067. doi:10.1175/JHM593.1.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Singh, V.P., (2009): *Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff modelling*. J. Hydrol. Eng. 14 (2), 153–165.
- Castillo, V.M., Gomez-Plaza, A., Martinez-Mena, M., (2003): *The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach*. Journal of Hydrology 284, 114–130.
- Ceballos, A., Schnabel, S., (1998): *Hydrological behavior of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain)*. Journal of Hydrology 210, 146–160.
- Cerdá, A., (1997): *Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone*. Journal of Hydrology 198, 209–225.
- Collier, C., (2007): *Flash flood forecasting: what are the limits of predictabilities?* Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 133 (622A), 3–23.
- Consortio de Compensación de Seguros e Instituto Geológico y Minero de España (2004): *Perdidas por terremotos e inundaciones en España durante el periodo 1987-2001 y su estimación para los próximos 30 años (2004-2033)*. Publicado por Consorcio de Compensación de Seguros. Ministerio de Economía y Hacienda.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D., (2005): *The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research*. J. Hydrol. 301, 235–249.
- Creutin, J.D., Borga, M., (2003): *Radar hydrology modifies the monitoring of flashflood hazard*. Hydrological Processes 17, 1453–1456.
- Dawdy, D.R., Bergmann, J.M., (1969): *Effect of rainfall variability on streamflow simulation*. Water Resources Research 5, 958–969.
- Ferrer-Polo, J. (1996): *El modelo de función de distribución SQRT-ETmax en el análisis regional de máximos hidrológicos: aplicación a lluvias diarias*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Ferrer-Juliá, M. (2003): *Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección*. CEDEX (España), Monografía C48.
- Ferrer-Juliá, M., Estrela, T., Sánchez del Corral, A., García-Meléndez, E. (2004): *Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction*. Geoderma, 123: 257-277.
- Ferrer-Juliá, M., Rodríguez, J. y Estrela, T., (1995): *Generación automática del número de curva con sistemas de información automática*. Ingeniería del Agua (España), Vol. 2, n°4, pp 43-58.
- Ferrer-Juliá, M., Ruiz, A., Dimas, M., Estrela, T., (1997): *Aportación de la Teledetección para la determinación del parámetro hidrológico Número de Curva*. Ingeniería del Agua (España), Vol. 5, n°1, pp 35-46.
- Fitzjohn, C., Ternan, J.L., Williams, A.G., (1998): *Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control*. Catena 32, 55–70.
- Hino, M., Odaka, Y., Nadaoka, K., Sato, A., (1988): *Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process – a guide to the problem of runoff-ratio and loss*. Journal of Hydrology 102, 267–284.
- Hirschboeck, K., Ely, L., Maddox, R., (2000): *Hydroclimatology of meteorologic floods*. In: Wohl, E. (Ed.), Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities. Cambridge Univ. Press, New York, pp. 39–72.
- Karnieli, A., Ben-Asher, J., (1993): *A daily runoff simulation in semiarid watersheds based on soil water deficit*. Journal of Hydrology 149, 9–25.
- Krajewski, W.F., Lakshmi, V., Georgakakos, K.P., Subashi, C.J., (1991): *A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model*. Water Resources Research 27 (1), 119–128.
- Loague, K., (1992): *Soil water content at R-5. Part 2. Impact of antecedent conditions on rainfall-runoff simulations*. Journal of Hydrology 139, 253–261.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.-P., Creutin, J.-D., Viallet, P., Gaume, E., (2009): *A modelling approach to assess the hydrological response of small Mediterranean catchments to the variability of soils characteristics in a context of extreme events*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 13, 79–97.
- Martín Rosales, W., Gisbert, J., Pulido-Bosch, A., Vallejos, A., Fernández-Cortés, A., (2007): *Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semiarid area (southeastern Spain)*. Environmental Geology, 52: 985-995.
- Mateo-Lázaro, J. (2011): *Hidrología de crecidas en pequeñas y medianas cuencas. Aplicación con modelos digitales del terreno*. Biblioteca Universitaria. Universidad de Zaragoza (España). 390 p. y CD.
- Mateo-Lázaro, J., Sánchez-Navarro, J.A. (2011): *Programa informático SHEEb. Simulación Hidrológica de Episodios Extraordinarios. Manual, ejecutable y ejemplos*. Centro de Publicaciones. Universidad de Zaragoza (España). ISBN 978-84-92522-36-1. 15 p. y CD.
- Merz, R., Blöschl, G., (2003): *A process typology of regional floods*. Water Resources Research 39 (12), 1340. doi:10.1029/2002WR001952.
- Ministerio de Fomento español (1999): *Máximas Lluvias diarias en la España Peninsular*. (Incluye CD). 1ª reimpresión 2001.
- Ministerio del Interior español. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2008): *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas*.
- Ministerio de Medio Ambiente español. Instituto Nacional de Meteorología (1998): *Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno en España. Un estudio por regiones*. Volumen 0, Introducción y Metodología. Serie monografías. Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 18 p.
- Moulin, L., Gaume, E., Obled, C., (2008): *Uncertainties on mean areal precipitation: assessment and impact on streamflow sim-*

- ulations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 5, 2067–2110.
- Naden, P.S., (1992): *Spatial variability in flood estimation for large catchments: the exploitation of channel network structure*. *Hydrological Sciences Journal* 37, 53–71.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., Anquetin, S., (2008): *Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins*. *J. Hydrol.* 362, 274–290.
- Obled, C., Wendling, J., Beven, K., (1994): *Sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data*. *Journal of Hydrology* 159, 305–333.
- Ogden, F.L., Julien, P.Y., (1994): *Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution*. *Journal of Hydrology* 158, 1–18.
- Parajka, J., Kohnová, S., Bálint G., Barbuc M., Borga M., Claps P., Cheval S., Dumitrescu A., Gaume E., Hlavová K., Merz R., Pfandler M., Stancalie G., Szolgay J., Blöschl G., (2010): *Seasonal characteristics of flood regimes across the alpinecarpathian range*. *Journal of Hydrology* 394 (1–2), 78–89. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.015.
- Ravazzani, G., Mancini, M., Giudici, I., Amadio, P., (2007): *Effects of soil moisture parameterization on a real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds*. *Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007, vol. 313*. IAHS Publ., 407–416.
- Ruin, I., Creutin, J. D., Anquetin, S., and Lutoff, C. (2008): *Human exposure to flash-floods – Relation between flood parameter and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France*. *J. Hydrol.*, 361, 199–213.
- Sangati, M., Borga, M., (2009): *Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modelling*. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 575–584. <<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/575/2009/>>.
- Sangati, M., Borga, M., Rabuffetti, D., Bechini, R., (2009): *Influence of rainfall and soil properties spatial aggregation on extreme flash flood response modelling: an evaluation based on the Sesia river basin, North Western Italy*. *Advances Water Resources* 32 (7), 1090–1106.
- Saulnier, G., Le Lay, M., (2009): *Sensitivity of flash-flood simulations on the volume, the intensity, and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France)*. *Water Resources Research* 45, W10425. doi:10.1029/2008WR006906.
- SCS, (1993): *Hydrology*. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC (Chapter 10).
- Steenhuis, T.S. Winchell, M., Rossing, M., Zollweg, J. y Walter, M.F. (1995): *SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 121, n°3*, 234–238.
- Sturdevant-Rees, P., Smith, J.A., Morrison, J., Baeck, M.L., (2001): *Tropical storms and the flood hydrology of the central Appalachians*. *Water Resour. Res.* 37, 2143–2168.
- Vivoni, E.R., Entekhabi, D., Bras, R.L., Ivanov, V.Y., (2007): *Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model*. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (5), 1683–1701.
- Wilson, C.B., Valdes, J.B., Rodriguez-Iturbe, I., (1979): *Influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff*. *Water Resources Research* 15 (2), 321–328.
- Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K., Band, L., (1988): *Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling*. *Journal of Hydrology* 102, 29–47.
- Woods, R.A., Sivapalan, M., (1999): *A synthesis of space-time variability in storm response: rainfall, runoff generation and routing*. *Water Resources Research* 35 (8), 2469–2485.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 28 DE SEPTIEMBRE DE 2011.

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 15 DE NOVIEMBRE DE 2011.

