

ALBERTO OLIVARES GUILLEM\*

## MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA PSEUDO-DISTRIBUIDA DEL BARRANC DEL CARRAIXET: APLICACIÓN AL EPISODIO DE OCTUBRE DE 2000

### RESUMEN

El objetivo del presente artículo es elaborar un modelo hidrológico por subcuencas operativo en tiempo real en el caso de que se presenten eventos tormentosos sobre la cuenca del barranc del Carraixet basado en los hietogramas registrados. El primer paso ha sido la determinación de los umbrales de escorrentía ( $P_0$ ) mediante el empleo de un SIG ráster. Se ha realizado un estudio de los parámetros físicos de la cuenca derivados del MDT elaborado. La metodología aplicada ha sido la del *Soil Conservation Service (SCS)* del *US Department of Agriculture* con algunas adaptaciones para el Mediterráneo español. A partir de este estudio se ha realizado una modelización del episodio registrado por el SAIH-Júcar entre los días 21 y 26 de octubre de 2000. La generación del hidrograma simulado para dicho episodio se ha obtenido mediante un modelo hidrometeorológico pseudo-distribuido del paquete de software del *U.S. Army Corps HEC-HMS*, tomando como hidrograma unitario de referencia el sintético adimensional del *SCS*.

**PALABRAS CLAVE:** Modelo hidrológico pseudo-distribuido, SIG ráster, SAIH, MDT, subcuencas, campo espacial de precipitaciones, simulación.

### ABSTRACT

HYDROLOGIC MODEL HALF-DISTRIBUTED OF THE CARRAIXET CATCHMENT APPLICATED TO THE OCTOBER 2000 EVENT

The aim of the present article is to make an operative model of watershed hydrology in real time in case stormy events appear in the Carraixet catchment basing on the registered graphic rainfall. The first step has been the determination of the thresholds of runoff ( $P_0$ ) by means of the employment of a raster GIS. There has been realized a study determining the basin land parameters using a DEM. The applied methodology has been the Soil Conservation Service (SCS) of the US Department of Agriculture with some adjustments for the Mediterranean Spanish land. From this study there has been realized a modeling of the event registered by the SAIH-Júcar between October 21st and 26th, 2000. The generation of the hydrograph simulated for the mentioned event has been obtained by means of a hydro-meteorological model half-distributed using the software package from the U.S. Army Corps HEC-HMS, taking like unit hydrograph of reference the SCS synthetic not dimensional.

**KEY WORDS:** Hydrologic model half-distributed, raster GIS, SAIH, DEM, subbasins, spatial rainfall distribution, simulation.

---

\* Departament de Geografia. Universitat de València.

Fecha de recepción: enero 2004. Fecha de aceptación: septiembre 2005

## INTRODUCCIÓN

Una de las facetas clásicas de la hidrología ha sido la simulación hidrológica del funcionamiento de una cuenca. La modelización *a priori* de crecidas ha sido y es una herramienta clave empleada en la planificación, diseño y gestión de estrategias y toma de decisiones en situaciones de eventos de crecida en tiempo real. Además esto ayudará posteriormente a analizar detenidamente el episodio tormentoso y valorar las causas de la génesis de la crecida y su magnitud espacial. Una buena simulación hidrológica ha de ser *compleja en su concepción*, tal como es el proceso de génesis de la escorrentía, pero *simple en su ejecución* y tendrá en cuenta factores cuya consideración determinarán su acierto. Factores como la naturaleza de los fenómenos hidrológicos locales, la abundancia (distribución espacial), calidad o disponibilidad (distribución temporal) de los datos a los que se tenga acceso en tiempo real no deben ser pasados por alto. La toma de decisiones acertadas mediante el uso de modelos hidrológicos-hidráulicos en tiempo real le dará rentabilidad a la inversión realizada.

Todo modelo hidrológico que pretenda ser empleado en tiempo real debe ser *sencillo* y *robusto* en su manejo; entendida la robustez como la capacidad del modelo de proporcionar resultados fiables en gran número de situaciones, con alternativas posibles y siendo mínimo y poco probable un error general del sistema. Por otro lado, su *tiempo de ejecución ha de ser breve* si su finalidad es la predicción, además de contar con una capacidad de calibración de los datos adaptándose a los mismos y a las condiciones existentes en un evento. El resultado final no sólo dependerá del modelo o submodelos elegidos (GARROTE, 2002) sino de los datos de entrada (lluvias) y de las distintas hipótesis en la introducción de los parámetros.

## TIPOLOGÍAS DE MODELOS HIDROLÓGICOS SEGÚN SU CONCEPCIÓN ESPACIAL

Los modelos hidrometeorológicos simulan el proceso precipitación-escorrentía habitualmente mediante modelos determinísticos con distinto grado de complejidad. Los datos requeridos son fundamentalmente pluviométricos lo que supone una gran ventaja dada la mayor densidad y longitud de las series de la red pluviométrica respecto a la foronómica. Los modelos hidrometeorológicos utilizados habitualmente por los SAIH<sup>1</sup> (Júcar, Ebro, Segura...) se basan en datos de entrada de precipitaciones y niveles proporcionados por el sistema en tiempo real con un intervalo de actualización variable (cinco-minutal, quinceminutal...). Considerando la *variable espacial* los modelos pueden ser *agregados*, promediando las variables respecto al espacio de modo global y constante, o *distribuidos* dando valores a cada punto del espacio para una resolución dada dentro de una malla o *grid* (ABBOTT y REFSGAARD, 1996). Por último están los modelos *pseudo-distribuidos* de carácter intermedio. La elección de un tipo u otro de modelo dependerá de los objetivos del estudio, de la disponibilidad de datos y de los medios disponibles.

La modelización de crecidas mediante *modelos hidrológicos agregados* a gran escala tiene unos resultados limitados para cuencas hidrográficas mediterráneas al reproducir con dificultad los tiempos característicos del hidrograma (FRANCÉS, 2002), pues la variabilidad espacial de la precipitación y de la infiltración, pese a su indudable impacto en la

---

<sup>1</sup> SAIH: Sistema Automático de Información Hidrológica.

génesis de la escorrentía, se pierde en todos los modelos al promediarla con la cuenca (BEVEN, 2001).

En los *modelos distribuidos* su operatividad viene dada por la superposición de capas temáticas (VÉLEZ, 2001). Ya no se trabaja a escala de cuenca o subcuenca sino de celda con una única cuenca que se compone de un *grid* o malla de celdas que se convierte por tanto en la unidad de simulación. Poseen la ventaja de ser más consistentes al aplicarles distintos episodios tormentosos a una misma cuenca, ya que permiten la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros de los diferentes submodelos que lo componen. Sin embargo, en estos modelos surgen problemas debido al mayor volumen de información utilizada pues el número de parámetros o celdas crece proporcionalmente con el tamaño de la cuenca. En episodios de mayor duración la modelización distribuida de los parámetros físicos de la cuenca y de sus cauces permite reproducir satisfactoriamente múltiples picos del hidrograma y sobre todo los momentos de picos (FRANCÉS y CASADO, 1995).

#### METODOLOGÍA: HIDROGRAMA UNITARIO DEL SCS Y MODELO DE PROPAGACIÓN Y TRANSPORTE DE MUSKINGUM

##### *Modelo de infiltración del Soil Conservation Service (SCS)*

La determinación de los umbrales de escorrentía ( $P_0$ ) en una cuenca es un primer paso, pero importante, del conocimiento de la lluvia neta y, por tanto, del coeficiente de escorrentía de la cuenca<sup>2</sup> (C). Si se pretende modelar las crecidas de una cuenca habrá que centrarse en analizar en profundidad los fenómenos de producción (dependerá de la precipitación y de la infiltración) y traslación de la escorrentía (dependerá de la topografía) y despreciar otros fenómenos importantes en otros períodos del año como la evapotranspiración (PASCUAL AGUILAR, 2001). En ambiente mediterráneo tanto la intensidad de precipitación (CAMARASA, 1991), las pérdidas hídricas (SEGURA y CAMARASA, 1996), como la erosión (YAIR, 1990) son muy relevantes y la variabilidad de sistemas naturales es muy alta. Los primeros estudios durante los años setenta y ochenta en el Mediterráneo (YAIR y LAVÉE, 1985) destacan de entrada la complejidad que conlleva la variabilidad espacial incluso a pequeña escala, y más cuando está asociada a fenómenos convectivos. Lo mismo podemos decir de los suelos pues las avenidas están muy ligadas a una serie de factores que producen variaciones en la cantidad de mm/h necesarios para generar flujo superficial (MATEU, 1989).

No toda la lluvia que genera una tormenta contribuye a la formación del caudal que se pretende obtener en un estudio hidrológico, parte es retenida en superficie, almacenada en depresiones o reinfiltrada; es lo que se denominan abstracciones hidrológicas. En ambientes mediterráneos el funcionamiento de modelos de generación de escorrentía está caracterizado por la existencia de zonas de generación (*sources* o fuentes) y zonas de reinfiltración (*sinks* o depósitos). Esquema en mosaico que justifica la escasa efectividad de los modelos hidrológicos agregados a gran escala y que conduce a un funcionamiento hortoniano pero discontinuo en el espacio. Por encima de determinados umbrales de

<sup>2</sup> Coeficiente de escorrentía de la cuenca (C) se define como la proporción de la intensidad de lluvia (I) que genera escorrentía superficial.

lluvia se llega a saturación en algunas zonas distribuidas según la cobertura vegetal o el espesor del suelo.

Se ha escogido para simular las pérdidas hídricas y convertir la tormenta bruta en tormenta neta o afectiva, la cual provoca la escorrentía, el modelo de infiltración del *Soil Conservation Service (SCS)*<sup>3</sup> por su mayor operatividad. El modelo del SCS es el más extendido y experimentado de los modelos empíricos, su principal ventaja radica en su gran adaptabilidad a la modelación distribuida y su simplicidad al dar un procedimiento estandarizado para la asignación de los parámetros a partir de las características del terreno.

El SCS asume la existencia de un umbral de escorrentía ( $P_0$ ), por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía. Este valor actúa como una interceptación inicial antes de evaluar que parte de ésta escurre superficialmente ( $E$ ) y que parte es retenida ( $R$ ). La relación descrita, queda en función de un único parámetro  $P_0$ , que debe ser estimado correctamente pues la escorrentía depende en exclusiva de él y cuyo valor en relación con el CN el SCS propuso que fuera estimado a través de la relación empírica (1).

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50.8 \quad (1)$$

En este modelo la capacidad de abstracción de un suelo y por lo tanto de generación de escorrentía depende de los mismos factores que afectan a la infiltración. Entre estos factores el método del SCS distingue cuatro (FERRER POLO, 1993):

1. *Tipo de suelo*: Según su potencial de generación de escorrentía o lo que es lo mismo su capacidad de infiltración. Distinguiendo 4 tipos de sustrato litológico de mayor a menor permeabilidad (A, B, C y D).
2. *Tipo de uso del terreno*: Dependiendo de que introduzcan modificaciones a la capacidad de infiltración intrínseca del terreno por sellado o impermeabilización, como el caso de las zonas pavimentadas, o la mejoren como los suelos forestales y agrarios.
3. *Pendiente del terreno y características topográficas*: Distingue entre terrenos llanos, por debajo del 3% de desnivel, y terrenos en pendiente por encima del 3%.
4. *Contenido inicial de humedad*: Normalmente el umbral de escorrentía ( $P_0$  y el CN equivalente) obtenido siguiendo la metodología anterior es ponderado por un coeficiente corrector (TÉMEZ, 1978) y cuyo valor para el óvalo litoral valenciano está en torno a 3,2. Pues predomina la condición seca del suelo al arrastrar varios años de escasa precipitación (1998, 1999 y parte de 2000). La función de este coeficiente corrector es la de ajustar al caso español unos valores de  $P_0$  experimentados en pequeñas cuencas agrícolas norteamericanas de sustrato húmedo para todo tipo de crecidas y con un ritmo de precipitación de mayor extensión y duración, pero de menor intensidad. En particular en el litoral mediterráneo los episodios extraordinarios de avenida se caracterizan por todo lo contrario.

<sup>3</sup> El SCS (EE.UU., 1972) se basa en que las gotas caídas al principio de un aguacero serán absorbidas y retenidas por el suelo hasta un punto ( $P_0$ ) en el cual se iniciará la escorrentía. Conforme el suelo se va saturando de agua permitirá la escorrentía de un porcentaje cada vez mayor de lluvia, que tenderá al 100%. Todo esto se concreta en dos parámetros que son los que definen el modelo, la pérdida inicial (o umbral de escorrentía  $P_0$  en mm) y el número de curva (CN) de carácter adimensional que describe las características de la cuenca y toma valores que van de 100 a 0 de menor a mayor permeabilidad.

Cuadro 1. Umbrales de escorrentía ( $P_0$ ) y número de curva (CN) medios estimados para cada sub-cuenca del barranc del Carraixet.

Subcuenca	Area (m <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	P <sub>0</sub> Mín.	P <sub>0</sub> Máx.	Difer.	P <sub>0</sub> Medio	Desv. St.
Bco. Olocau Bajo	21388800	21,39	2	31	29	18,3	6,5646
Bco. de Nàquera	36409600	36,41	2	23	21	26,3	6,9077
Bco. Pedralvilla	27443200	27,44	2	31	29	26,5	6,3863
Bco. de Cerezo	29145600	29,15	2	31	29	27,8	7,1706
Bco. Carraixet Alto	28134400	28,13	1	22	20	16,2	3,4910
Bco. Carraixet Medio	28896000	28,90	2	42	40	15,1	6,1806
Bco. Carraixet Bajo	18444800	18,44	2	42	40	16,2	11,3085
Bco. Olocau Alto	44294400	44,29	2	31	29	27,4	7,6462
Bco. de Zafra	14521600	14,52	2	31	29	15,4	4,8330
<b>TOTAL</b>	<b>248678400</b>	<b>248,68</b>					

Subcuenca	P <sub>0</sub> Mayorit.	P <sub>0</sub> Minorit.	Mediana	CN	P <sub>0</sub> * (3,2)	CN * (3,2)
Bco. Olocau Bajo	14	4	14	73	<b>58,7</b>	<b>46</b>
Bco. de Nàquera	23	15	14	66	<b>84,1</b>	<b>38</b>
Bco. Pedralvilla	14	17	22	66	<b>84,9</b>	<b>37</b>
Bco. de Cerezo	14	3	14	65	<b>89,0</b>	<b>36</b>
Bco. Carraixet Alto	14	17	14	76	<b>51,9</b>	<b>49</b>
Bco. Carraixet Medio	14	34	14	77	<b>48,4</b>	<b>51</b>
Bco. Carraixet Bajo	19	17	19	76	<b>51,9</b>	<b>49</b>
Bco. Olocau Alto	14	17	14	65	<b>87,7</b>	<b>37</b>
Bco. de Zafra	14	19	14	77	<b>49,4</b>	<b>51</b>

\* P<sub>0</sub> y CN multiplicado por el factor corrector de Témex (3,2) para ámbito mediterráneo (condición seca)

Por último, para el cálculo tanto del  $P_0$  como CN efectivo en una cuenca de superficie total  $A$ , se divide ésta en las diferentes subáreas  $A_i$  correspondientes a combinaciones de tipo y usos del suelo distinto y se obtiene un  $CN_i$  para cada caso. El número de curva medio total (CN) resultará de la ponderación de los números obtenidos anteriormente según la fracción de la superficie ocupada por cada caso (2). A continuación (cuadro 1) se detallan los resultados por subcuencas (modelo HEC-HMS) tanto de  $P_0$  como de CN para el barranc del Carraixet mediante el empleo de un SIG ráster y álgebra de mapas.

$$CN = \frac{1}{A} \sum_{i=1,n} A_i \cdot CN_i \tag{2}$$

*El modelo de transferencia lluvia-escorrentía: El hidrograma unitario del SCS*

Existen diversas maneras clásicas de estimar el hidrograma de descarga de un determinado aguacero sobre una cuenca, como los métodos empíricos, modelos del hidrograma unitario o el modelo conceptual de la onda cinemática que representan con base física el proceso y los mecanismos que gobiernan el movimiento del exceso de precipitación en una cuenca. En este estudio se empleará el método del hidrograma unitario, que se define como aquél provocado por una lluvia de duración e intensidad dadas, uniforme

Cuadro 2. Tiempos característicos del hidrograma ( $T_c$ ,  $T_{lag}$ ,  $Q_p$ ,  $T_p$ ) calculados para las subcuencas del barranc del Carraixet a partir del MDT de la cuenca.

Subcuenca	Area (km <sup>2</sup> )	Perim. (m)	Cota sup. (m)	Cota inf. (m)	Pend. (m/m)
Bco. Olocau Bajo	21,21	31040	295	150,00	0,0140
Bco. de Nàquera	36,36	55600	788	60,00	0,0360
Bco. Pedralvilla	27,34	42960	810	150,00	0,0410
Bco. de Cerezo	29,04	40380	800	90,06	0,0490
Bco. Carraixet Alto	28,01	33660	280	90,00	0,0190
Bco. Carraixet Medio	28,74	38700	250	60,00	0,0200
Bco. Carraixet Bajo	18,47	28300	120	30,00	0,0100
Bco. Olocau Alto	44,30	63140	818	191,36	0,0270
Bco. de Zafra	14,38	32960	760	191,43	0,0450
<b>TOTAL</b>	<b>247,83</b>		<b>818</b>	<b>30</b>	<b>0,0179</b>

Subcuenca	Area (km <sup>2</sup> )	Long. (m)	Tc* (Hr)	Tlag 5' (Hr)	Tp 5' (Hr)	Qp 5' (m3/s)
Bco. Olocau Bajo	21,21	10393,18	4,0	1,5	1,5	29,36
Bco. de Nàquera	36,36	20191,56	5,5	2,1	2,1	36,57
Bco. Pedralvilla	27,34	15904,74	4,5	1,7	1,7	33,67
Bco. de Cerezo	29,04	14358,35	4,0	1,5	1,5	39,90
Bco. Carraixet Alto	28,01	9873,18	3,6	1,4	1,4	42,64
Bco. Carraixet Medio	28,74	9723,18	3,6	1,3	1,4	44,67
Bco. Carraixet Bajo	18,47	8576,98	3,7	1,4	1,4	27,70
Bco. Olocau Alto	44,30	22857,63	6,4	2,4	2,4	38,46
Bco. de Zafra	14,38	12759,94	3,7	1,4	1,4	21,23
<b>TOTAL</b>	<b>247,83</b>	<b>43959,71</b>	<b>11,4</b>	<b>4,3</b>	<b>4,3</b>	<b>121,79</b>

\* Todos los tiempos característicos del hidrograma están calculados para intervalos de pulso de precipitación D de duración cincominutal debido a la naturaleza de los datos del SAIH-Júcar Tc = Tiempo de concentración

en el espacio y en el tiempo. Obtenido éste se puede calcular el hidrograma resultante de una tormenta cualquiera de la que se conozca el hietograma neto (MARCO y REYES, 1981).

El hidrograma unitario (SHERMAN, 1932) es un modelo de respuesta lineal simple de la cuenca ante una lluvia neta que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia (WARD y ROBINSON, 2000). Empleamos el hidrograma unitario del SCS<sup>4</sup>, que surge del estudio de diversas cuencas por el Servicio de Conservación del Suelo de los EEUU. Esto dio lugar a la estimación de un unitario tipo (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). El hidrograma final resultante será la suma de las componentes de cada uno de los unitarios de subcuenca, alterados por el proceso de traslación y laminación en cauces.

Sin embargo, es más habitual emplear como único parámetro en el unitario del SCS el tiempo de desfase a la punta ( $T_{dp}$  o  $T_{lag}$ ), que es el tiempo existente entre el centro de gravedad del hietograma neto o precipitación efectiva y el tiempo en que se produce el máximo valor de caudal o punta del hidrograma. Esto permite definir los hidrogramas unitarios de duración D horas sencillamente aplicando la definición del tiempo de desfase a la punta. Es aconsejable utilizar formulaciones obtenidas en cuencas de mayor tamaño, referente numerosas veces al tiempo de concentración ( $T_c$ ) del recorrido máximo y aplicar las relaciones existentes entre ambos tiempos característicos para cada una de las

<sup>4</sup> El hidrograma unitario del Soil Conservation Service está dentro del grupo de los unitarios sintéticos ajustado a datos según cuencas aforadas. Se basa en un hidrograma adimensional consistente en un hidrograma unitario en el cual tanto el caudal como el tiempo se expresan como un cociente respecto al caudal punta unitario ( $Q_p$ ), que es el coeficiente por el que se multiplica el hidrograma adimensional del SCS, y tiempo de pico ( $T_p$ ).

subcuencas del modelo a partir de la información del MDT de la cuenca (figura 1 y cuadro 2). Se considera, por tanto, más ajustado a la realidad del caso mediterráneo la formulación siguiente basada en el tiempo de concentración de Témez (3):

$$T_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \quad (3)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración de la cuenca en horas

$L$  = Longitud del cauce principal en km

$J$  = Pendiente media del cauce en m/m.

La pendiente ( $P$ ) se calcula como (4):

$$P = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad (4)$$

El caudal punta unitario ( $Q_p$ ) y tiempo de punta ( $T_p$ ) (5):

$$Q_p = \frac{A}{4,8 \cdot T_c} \quad T_p = \frac{D}{2} + T_{lag} \quad (5)$$

Finalmente, cabe destacar que el intervalo de agregación  $D$  elegido (5 minutos) debe ser el mismo que el de la precipitación, para que se pueda aplicar el modelo del hidrograma unitario y poder aplicar los principios que fundamentó Sherman en 1932. De todo lo cual se deduce la siguiente fórmula para la determinación del tiempo de desfase a la punta ( $T_{lag}$ ) como se muestra a continuación (6):

$$T_{lag} = \frac{3}{8} T_c - \frac{1}{8} D \quad \boxed{D = 1/12 \text{ hora}} \quad (6)$$

Donde:

$D$  = Duración del pulso de lluvia empleado en la determinación del hidrograma unitario en horas.

*El modelo de propagación y transporte de hidrogramas en cauces: Método de Muskingum*

Una vez obtenidos los hidrogramas por simulación mediante el *HEC-HMS* en las subcuencas en que se produce transferencia de lluvia-escorrentía es esencial modelar el des-

plazamiento o propagación de la avenida a través de las subcuencas situadas aguas abajo. Para ello se emplean modelos de traslación y laminación, dando como entrada el hidrograma de aguas arriba. Por tanto, se puede proceder a la obtención del hidrograma resultante de la unión de varias subcuencas mediante simples sumas de caudales a lo largo del tiempo. La traslación habitualmente puede dividirse en un primer movimiento sobre las laderas y pequeños cauces y en un segundo movimiento a través de los cauces principales. Las metodologías y modelos de análisis de la propagación estudian el movimiento de la onda de avenida a través de un sistema fluvial, que va modificando su forma suavizándola (laminación) y velocidad de la onda o tiempo en el que se produce la punta (retraso) debido a los efectos de almacenamiento y fricción (BEVEN y KIRKBY, 1993).

Para cualquier modelo de canal abierto es necesario una información de partida tanto de la cuenca como de los hidrogramas simulados aguas arriba mediante un modelo hidrológico. Se resume en una descripción física del cauce: ancho, pendiente longitudinal (principal fuerza actuante), secciones transversales, rugosidad, velocidad de flujo, forma... No se consideran los efectos de erosión y depósito. En el caso del barranc del Carraixet se ha utilizado el modelo de laminación y retraso de Muskingum<sup>5</sup>, que proporciona unos resultados coherentes con la realidad observada. Este modelo depende de 3 parámetros:

*K*: Con dimensiones de tiempo (horas), tiene el sentido de tiempo de viaje de la onda de crecida a lo largo del tramo. En definitiva *K* es un coeficiente de almacenamiento y en general es difícil de obtener si no se poseen hidrogramas de entradas y salidas en un tramo. El parámetro *K* (seg) resulta del cociente entre la longitud del tramo *L* (m) y la velocidad media del flujo o celeridad de la onda *c* (m/seg).

*X*: Coeficiente adimensional de forma del cauce y determina el grado de laminación del hidrograma a lo largo del tramo. Indica en qué tramo del cauce se produce el control hidráulico y toma valores que oscilan entre 0 (el almacenamiento está directamente relacionado con el caudal de salida) y 0,5 (traslación de la onda sin atenuación en canal). Se ha tomado un valor de 0,25 para los tres primeros tramos de laminación y de 0 para el último tramo de laminación al adentrarse dentro de un llano de inundación sin apenas desnivel donde hay una máxima laminación con posibles desbordamientos.

*Número de pasos (n)*: Número de escalones o embalses lineales considerados. El número de pasos *n* (adimensional) se obtiene sacando el valor medio entre la longitud del tramo (m) dividido entre el intervalo de agregación *D* en segundos por la velocidad media del flujo (m/seg) y el triple de ese valor.

Por tanto el método de Muskingum (US. ARMY, 1981) asume una relación lineal entre el volumen almacenado en el tramo y los caudales entrantes y salientes, mediante los parámetros *K* y *X*. Estos parámetros varían con el caudal pero suelen considerarse constantes tomando el sentido de unos valores medios. Para cada tramo de laminación en

<sup>5</sup> El método de Muskingum se fundamenta en la ecuación de continuidad y hace referencia a que la diferencia entre el caudal que entra en un determinado tramo del barranco y el que sale es igual al almacenamiento que se produce en el tramo por unidad de tiempo. El modelo de Muskingum proporciona un mayor ajuste a la realidad del proceso aplicando tanto un retraso como una laminación al hidrograma entrante. Utiliza una aproximación por diferencias finitas de la ecuación de continuidad (Entrada - Salida = Almacenamiento) para evaluar el hidrograma de salida.



Cuadro 3. Parámetros de Muskingum obtenidos a partir del MDT de la cuenca.

Tramo Traslación - Laminación Laminación	Traslación - Laminación Barranco Olocau Bajo	Traslación - Laminación Barranco Carraixet Alto	Traslación - Laminación Barranco Carraixet Medio	Traslación - Laminación Barranco Carraixet Bajo
Long. Tramo (m)	4346,6	6811,9	4690,7	5250,2
Cota superior (m)	191,11	150,00	90,00	60,00
Cota inferior (m)	150,00	90,00	60,00	30,00
Pendiente (m/m)	0,0095	0,0088	0,0064	0,0057
Veloc. flujo (m/s)	2,5	2	2	1
K (s)	1738,6	3406,0	2345,4	5250,2
<b>K (Hr)</b>	<b>0,4830</b>	<b>0,9461</b>	<b>0,6515</b>	<b>1,4584</b>
<b>X</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0</b>
L/3Atv<	1,93182	3,78439	2,60594	5,83356
<b>n</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>12</b>
<L/Atv	5,79547	11,35317	7,81783	17,50067

cauce (pérdidas) de las distintas subcuencas del barranc del Carraixet se le han aplicado diferentes parámetros de K, X y n obtenidos del MDT. Propagando hidrogramas en los siguientes 4 tramos (cuadro 3).

APLICACIÓN A LA CUENCA DEL BARRANC DEL CARRAIXET: ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS E HIDROLÓGICOS A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

La utilización de un SIG facilita enormemente la realización de una modelación distribuida o pseudo-distribuida de generación de hidrogramas de crecida, Se trata de una unión interdependiente, basada en el acoplamiento de ambos mediante flujos de información, manteniendo su independencia funcional y operativa (ESTRELA, 1996). El SIG suministra los datos espaciales de entrada al modelo y éste opera con la información para obtener un resultado (CLARK, 1999).

Como fácilmente se desprende de las consideraciones anteriores, el SIG que debería formar el núcleo central de los modelos hidrológicos debe permitir manejar información ráster y ficheros vectoriales, como es el caso del *ArcView*. Este SIG incluye el módulo *Spatial Analyst* (desarrollado por *ESRI*) empleado en el presente artículo y ampliamente introducido en la administración local, en las universidades y en planificación ambiental.

En primer lugar se ha definido el esquema modelo de cuenca, éste lo obtenemos a partir de la cartografía digital a escala 1:10.000 de la Comunidad Valenciana. Posteriormente se construye un *TIN* o composición vectorial por medio de triángulos que unen puntos georeferenciados con coordenadas X, Y, Z (cota). A partir del *TIN* se ha elaborado el Modelo Digital del Terreno (MDT o *DEM*) que se puede definir como una matriz de números ordenados que representa la distribución espacial de las elevaciones sobre alguna parte del territorio (BEVEN y MOORE, 1993). El MDT (figura 1) tiene un *grid* o tamaño de celda de 10x10 metros, las diferencias respecto al de 5x5 metros eran mínimas pero el aumento en el número de celdas complicaba en exceso la operatividad del SIG (FELICÍSIMO, 1994).

Con el MDT se procede a la definición de las características físicas e hidrológicas de la cuenca (GARCÍA GALIANO, 2000). Se define la red de drenaje (LÓPEZ GARCÍA y CAMARASA, 1999), las pendientes y el área de estudio hidrológico a partir de la estructura de la red. Se obtienen las direcciones de drenaje suponiendo que el flujo se produce según la dirección de máxima pendiente (MAIDMENT y DJOKIC, 2000). Posteriormente se definen las celdas drenantes acumuladas que representa el número de celdas de la cuenca que vierten a través de ella. Por último se realiza una delimitación y optimización en 9 subcuencas que compondrán el modelo hidrológico. Para cada subcuenca (basándose en el MDT), se obtiene mediante las funciones del *Spatial Analyst* y empleando *Scripts* específicos para hidrología la red hidrográfica y cauces principales, las pendientes, los recorridos máximos de drenaje, los parámetros de Muskingum de traslación de flujo en cauce y los tiempos característicos del hidrograma ( $T_c$  y  $T_{lag}$ ). Así como el resto de elementos que componen el modelo hidrológico de la cuenca como superficie, pendientes y longitud de cauces en cada subcuenca (DIHMA, 1996) mediante la función *Summarize by Subbasins*.

Posteriormente, se procede a la definición de los parámetros para el cálculo de la capacidad de infiltración y de los umbrales de escorrentía ( $P_0$  y  $CN$ ). Éstos se han obtenido a partir de mapas litológicos y de usos y aprovechamientos del suelo de la Comunidad Valenciana utilizando la información cartográfica digital a escala 1:50.000 de la Conselleria d'Obres Publiques Urbanisme i Transports (COPUT, 1991). Existen estudios de  $P_0$  a partir de teledetección con imágenes del Landsat 5 TM (RUESCAS, 1999) y contrastando la información cartográfica de la COPUT. La generación del mapa de  $P_0$  de la cuenca del barranc del Carraixet se realiza mediante la aplicación de tablas de reclasificación (*Reclass*) y operaciones de superposición (*Overlay*) de las distintas capas temáticas de información. La metodología empleada se basa en el álgebra de mapas mediante SIG ráster, ya que en hidrología el uso del modelo de estructura de datos ráster (también llamada matricial) es, en general, más adecuado que el vectorial pues facilita la aplicación de modelos distribuidos y con ellos resulta más fácil realizar operaciones respecto a celdas vecinas y de superposición de capas.

En primer lugar, mediante la función *Reclass* de *Arc-View GIS* se ha clasificado los usos, litologías y pendientes de nomenclatura de la COPUT a las consideraciones del SCS (figuras 2 y 3). Posteriormente, se ha singularizado cada característica de usos, litología y pendiente según la nomenclatura del SCS asignándole identificadores parciales mediante un valor de número primo (FERRER, RODRÍGUEZ y ESTRELA 1995) con lo que se evita la repetición. Seguidamente, se han cruzado las tres capas temáticas del mismo tamaño de celda (80x80 m) mediante la función producto *Map Calculator* obteniendo una imagen resultado del producto de números primos asignados a cada píxel de cada capa temática. Por último, se debe traducir a un valor de  $P_0$  a partir de las tablas del SCS mediante la función *Reclass*, ya que hay una correspondencia unívoca entre el valor de  $P_0$  de una combinación de variables y su valor producto de números primos.

El mapa de  $P_0$  en condiciones medias (figura 3) muestra una clara dicotomía. Como principales áreas productoras de escorrentía ( $P_0$  por debajo de 20 mm) aparecen las subcuencas ubicadas sobre el piedemonte de Bétera (barranco de Olocau Bajo y barranc del Carraixet en sus tramos alto, medio y bajo) donde la creciente presión urbanística sobre el entorno reduce la capacidad de infiltración de los suelos. Destaca también la subcuenca del barranc de Nàquera donde abundan más los sustratos arcillosos. Por el contrario en las cabeceras de los barrancos contributivos al Carraixet con pinares y matorrales espesos y consolidados, aunque degradados, los umbrales de escorrentía se sitúan por

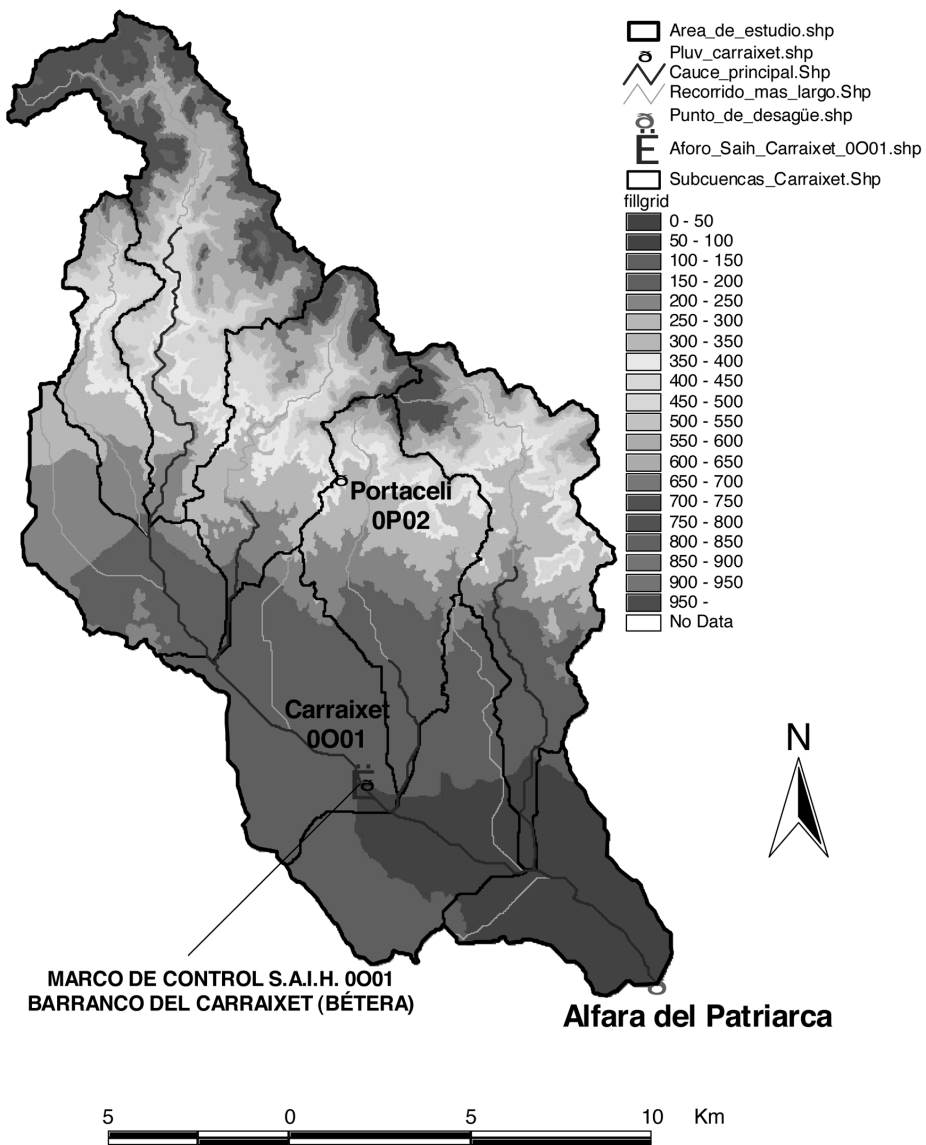


Figura 1. Modelo Digital del Terreno del barranc del Carraixet.

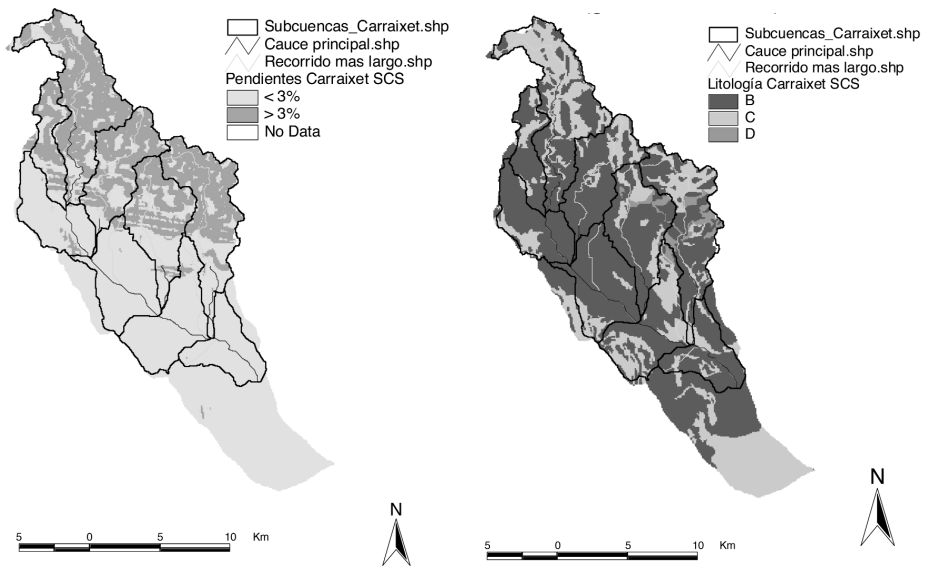


Figura 2. Mapas de pendientes y litologías según la nomenclatura del SCS.

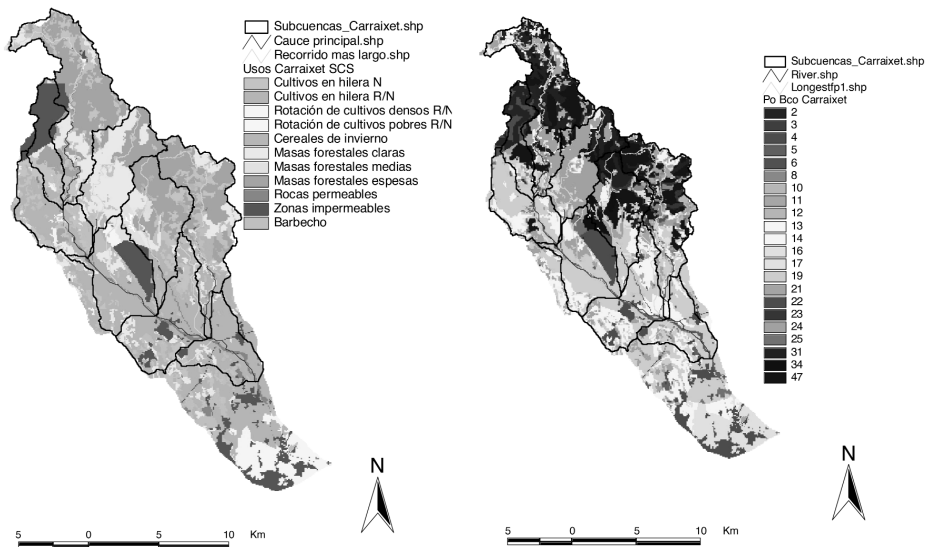


Figura 3. Mapas de usos del suelo según la nomenclatura del SCS y resultante de  $P_0$  en condiciones medias a partir del producto de los mapas anteriores.

encima de los 30 mm (barrancos de Olocau, Cerezo o Sirey y Pedralvilla), incrementándose más aún si es sobre un sustrato de calizas y dolomías en lugar de areniscas y arcillas (el predominante en los rebordes montañosos).

#### DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SITUACIÓN METEOROLÓGICA DURANTE EL EPISODIO DE LLUVIAS INTENSAS DE OCTUBRE DE 2000

En la actualidad se opta preferentemente por un esquema de modelización donde la descripción de los procesos sea menos detallada (modelo pseudo-distribuidos frente a los distribuidos), pero que a cambio permita la utilización de toda la información espacial relativa a la cuenca que se insertará como dato de entrada al modelo. De ahí la importancia de un análisis de toda la información referente al evento de octubre de 2000 y el estudio de las fuentes. Por tanto, conviene plantear un proceso de modelización guiado por la disponibilidad de información, y no por la disponibilidad de un *software* determinado que, posiblemente, necesite algunos datos que no se tiene e ignore otros que si estén a nuestra disposición (GARROTE, 2002). La definición de esta entrada debe incluir no sólo la duración e intensidad del chubasco, sino también su distribución temporal y su valor areal sobre la cuenca del barranc del Carraixet (CAMARASA, 1995).

El episodio acaecido entre el viernes 20 de octubre y el jueves 26 de octubre de 2000 afectó a las principales cuencas valencianas, especialmente en las provincias de Castellón y Valencia. La situación meteorológica se caracterizó por una baja aislada en la troposfera media y alta de larga duración (cinco días) y gran extensión. Este tipo de precipitaciones corresponde con las catalogadas como de ascendencia mixta ya que conjugan los efectos de las precipitaciones ciclónicas, las convectivas y en cierto modo también las orográficas. La conjunción de estos elementos, ajustados al esquema más típico de marco sinóptico favorable a las lluvias intensas en la Comunidad Valenciana (ARMENGOT *et al.*, 2001) con la estacionalidad y su interacción propicia, desencadenaron unas precipitaciones extraordinarias que siguieron un patrón completamente típico de *Gota Fría*.

Este evento tuvo carácter histórico por su magnitud global sobre el territorio valenciano, desbancando claramente a otros episodios históricamente recientes como el de octubre de 1982, noviembre de 1987, septiembre de 1989 o septiembre de 1997. Sin embargo no hubo una sintonía espacio-temporal de las máximas intensidades de precipitación. Ya que las máximas intensidades de precipitación se repartieron tanto temporalmente (durante cuatro días) como espacialmente (sobre el Sénia, Millars, Palància, Poyo, Carraixet, Túria, Magre y Xúquer) debido a una falta de sintonía entra la *Gota Fría* en altura y el frente de precipitaciones.

El total de precipitación areal acumulada sobre el territorio perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) entre las 08:00 horas del 20 de octubre y las 08:00 horas del 26 de octubre ascendió a 143,3 mm, equivalente a un volumen de agua de 6.123 Hm<sup>3</sup>. Estas excepcionales precipitaciones renovaron los recursos superficiales y subterráneos, llenando los pequeños embalses litorales pero apenas los de cabecera. En cuanto a los registros del Instituto Nacional de Meteorología (INM) para dicho episodio entre los días 21 y 25 de octubre de 2000 se registraron los mayores volúmenes totales de precipitación en los rebordes montañosos de la Sierra Calderona y Montes de Portaceli 358 mm (Olocau), 341,1 mm (Serra Ayuntamiento), 325 mm (Bétera - Mas de Arnal) y 365 mm (Gàtova) en la divisoria con el Palancia. Disminuyendo la precipitación total en el llano

litoral 266,5 mm (Moncada - Masía Moroder), 263 mm (Moncada - I.V.I.A.) y 258 mm (Massalfassar).

#### *Distribución espacio-temporal de la precipitación: Fuentes y metodologías*

El cómo se distribuye en el tiempo la precipitación a lo largo de un episodio tormentoso es una de las incógnitas más difíciles de asimilar en un proceso de diseño. La influencia de la distribución temporal es tan importante como la propia magnitud de la lluvia calculada en los apartados anteriores. Como ejemplo, no es lo mismo el caudal producido por una lluvia suave y uniforme de varias horas de duración que el generado por una tormenta muy intensa de escasos minutos aunque los dos fenómenos den la misma cantidad de precipitación acumulada diaria.

Otro dato importante a considerar es la duración total de la tormenta, y es aquí donde debemos mirar a sistemas de datos en tiempo real como los SAIH, los cuales son una pieza clave en el estudio de la estructura interna de la lluvia. En el SAIH-Júcar se dispone de datos de lluvia desde el año 1988, aunque su fiabilidad empieza a tenerse en cuenta a partir del año 1991. Es por tanto un período muy corto, más si cabe cuando no se han producido fenómenos demasiado adversos en lo que se refiere a la cuenca del barranc del Carraixet.

Estas características se pueden observar en un hietograma donde se representan las intensidades de precipitación (medida calculada a partir de totales acumulados) respecto al tiempo en un punto. A partir de los datos puntuales observados se ha de hacer una representación espacial que muestre más claramente la variación de la precipitación total en la cuenca, que deberá ser contrastada con los totales diarios del INM, y de un modo visual la evolución y el desplazamiento de la tormenta y de la intensidad de precipitación registrada por el SAIH en determinados momentos. Una forma habitual de representar la intensidad de precipitación es mediante isoyetas de precipitación que consiste en interpolar líneas de igual intensidad a intervalos fijos sobre un mapa de la cuenca mediante métodos gravitatorios. Se emplean cuando tenemos fuertes gradientes de precipitación por topografía o por células tormentosas, pues la distribución de isoyetas refleja el relieve o la dirección de la tormenta. Esto puede producir una cierta distorsión en la forma de las isoyetas tal como se observa en la figura 4.

#### *Estimación de la lluvia areal mediante polígonos de Thiessen*

Como los valores de precipitación sólo se conocen en puntos concretos es necesario un método que interpole los datos y permita hallar el valor de la misma en cualquier otro punto de la cuenca distinto de los pluviómetros. Para la inserción del valor de precipitación en cada subcuenca del modelo del barranc del Carraixet se ha optado por el método de los polígonos de Thiessen, al ser el que en menor medida altera el dato de precipitación sobre el pluviómetro, que es siempre el más próximo a la realidad del suceso meteorológico.

Este método consiste en trazar una red de polígonos, partiendo de la hipótesis de que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano. Por tanto, la cantidad de precipitación registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los coeficientes de Thiessen se obtienen como tanto por uno del área que cada

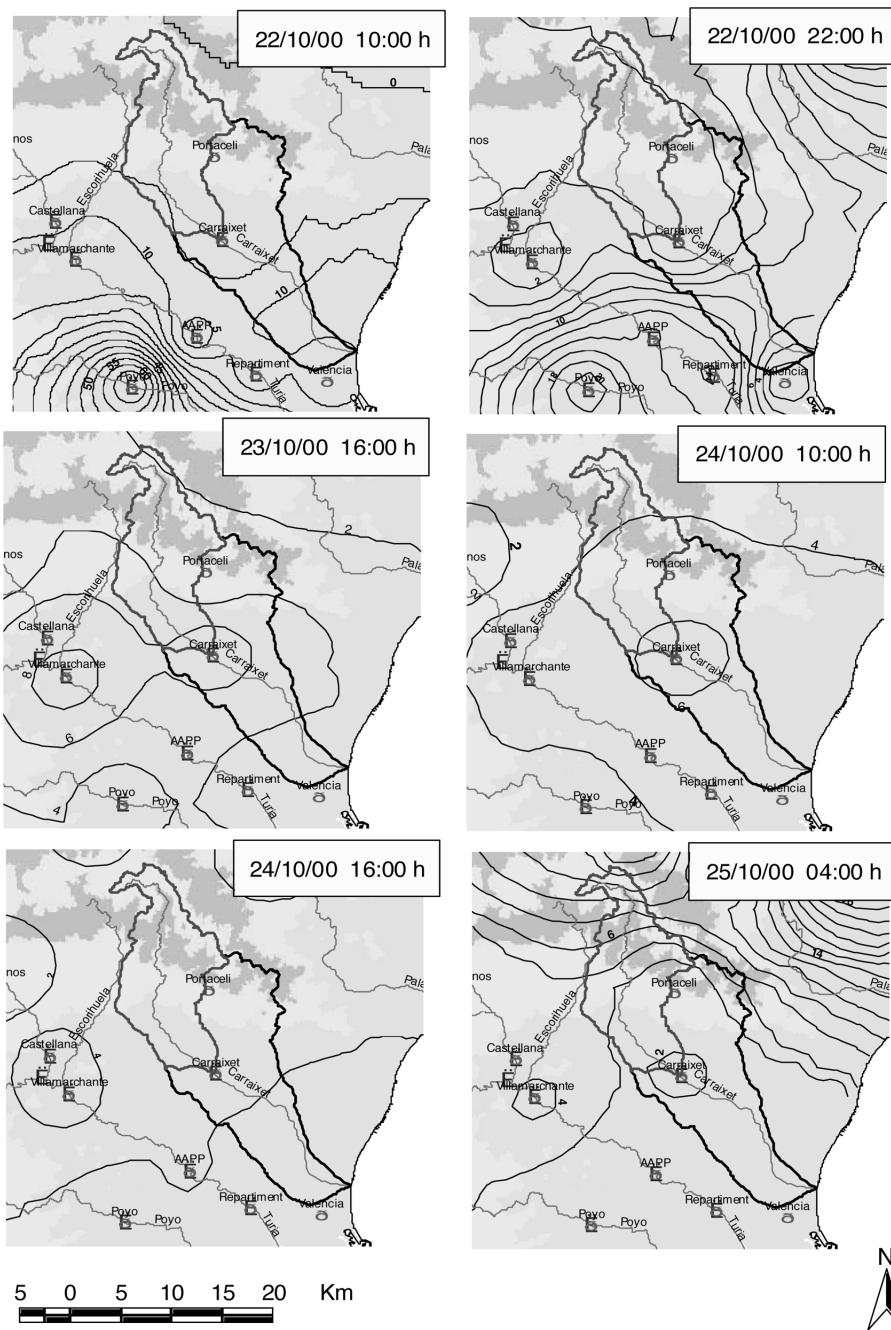


Figura 4. Evolución de la tormenta sobre la cuenca entre los días 22 y 25 de octubre de 2000.

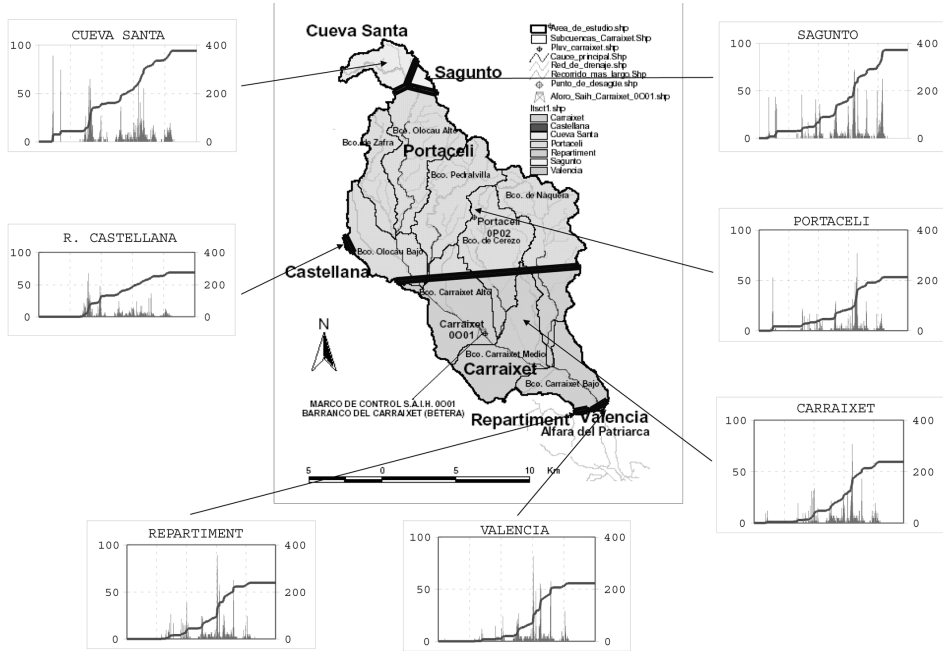


Figura 5. Polígonos de Thiessen calculados para los pluviómetros SAIH y hietogramas que afectan a la cuenca del barranco del Carrizet.

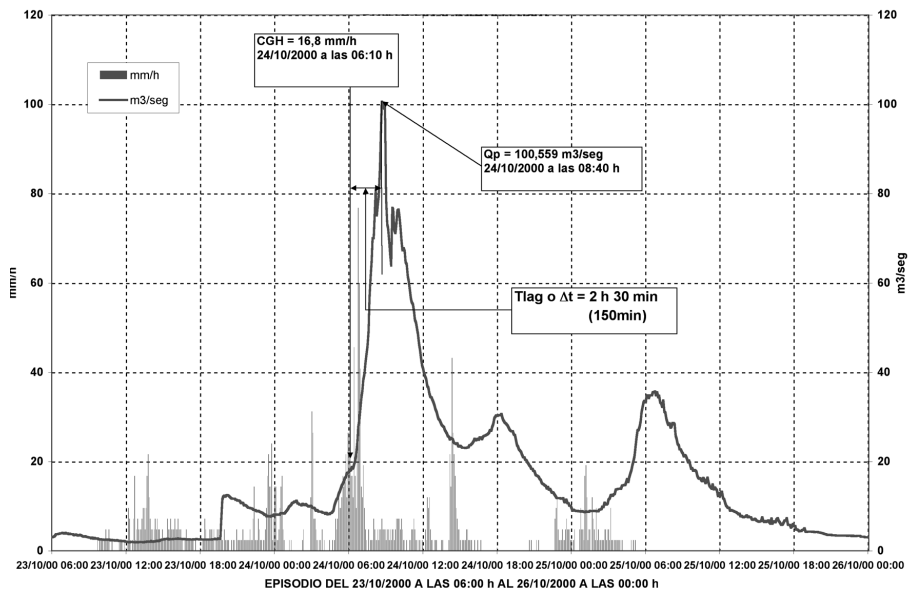


Figura 6. Estimación del  $T_{lag}$  observado en la punta de crecida a partir de datos SAIH.



Cuadro 4. Registros pluviométricos del SAIH durante el episodio de octubre de 2000.

Estación SAIH	Pico intens. (mm/h)	PICOS INTENSIDAD 5' EPISODIO DEL 21 AL 26/10/2000				
		mm/h 21	mm/h 22	mm/h 23	mm/h 24	mm/h 25
Carraixet	76,8	12,0	31,2	33,6	76,8	19,2
Portaceli	76,8	52,8	21,6	28,8	76,8	16,8
Sagunt	76,8	43,2	45,6	36,0	76,8	62,4
Cueva Santa	88,8	88,8	64,8	36,0	60,0	19,2
R. Castellana	67,2	0,0	67,2	24,0	36,0	12,0
Repartiment	88,8	0,0	26,4	38,4	88,8	24,0
Valencia	81,6	0,0	14,4	26,4	81,6	28,8

Estación SAIH	TOTAL (mm)	ACUMULADO (mm) EPISODIO DEL 21 AL 26/10/2000				
		mm 21	mm 22	mm 23	mm 24	mm 25
Carraixet	238,2	4,8	27,2	73,4	115,0	17,8
Portaceli	212,4	17,6	21,4	46,2	110,8	16,4
Sagunt	371,6	29,4	37,0	99,0	138,8	67,4
Cueva Santa	376,4	43,2	112,0	61,0	123,8	36,4
R. Castellana	276,0	0,0	126,4	58,6	70,6	20,4
Repartiment	239,2	0,0	30,6	62,2	136,6	9,8
Valencia	222,4	0,2	10,4	58,4	143,4	10,0

Estación SAIH	Prec. media (mm) 24h	PREC. MÁX. 24 h (mm) PARA PERIODOS DE RECURRENCIA (T AÑOS MAXPLU)							
		T 2	T 5	T 10	T 25	T 50	T 100	T 200	T 500
Carraixet	83	73	109	135	173	204	237	272	321
Portaceli	88	77	115	144	184	216	251	288	341
Sagunt	84	74	110	137	175	206	239	274	325
Cueva Santa	80	71	104	129	165	194	224	257	302
R. Castellana	71	62	93	116	148	173	202	231	272
Repartiment	75	66	98	123	157	185	214	245	290
Valencia	72	63	94	118	151	177	206	235	278

polígono ocupa sobre cada subcuena. Estos cálculos han sido realizados mediante el empleo de un SIG vectorial (*Arc-View GIS*) cruzando la capa temática de polígonos de Thiessen con la capa temática de subcuenas del modelo *HEC-HMS*.

La precipitación media areal asociada se obtiene como combinación lineal de los coeficientes de Thiessen multiplicados por el pulso de precipitación cincominutal de cada uno de los pluviómetros que afectan a cada subcuena. El total de precipitaciones sobre el aforo SAIH 0001 (Bétera) fue entre los días 20 y 26 de octubre de 238,2 mm, con intensidades pico de hasta 76 mm/h. En la figura 5 podemos observar tanto los hietogramas de intensidades de precipitación con discretización cincominutal registrados por el SAIH de todos los pluviómetros que afectan a la cuenca, como el área de influencia de cada polígono sobre las subcuenas del modelo.

En el cuadro 4 se detalla la información pluviométrica de las estaciones SAIH cuya área de influencia (Thiessen) afecta a la cuenca del barranc del Carraixet. En él puede observarse que la precipitación caída durante el día 24 de octubre superó los cuantiles para un período de retorno de 10 años, lo que demuestra que la magnitud de este episodio se debe más al carácter continuado de las precipitaciones durante 4 días seguidos. La precipitación media areal asociada a un período de retorno se obtiene a partir de los coeficientes de Thiessen multiplicados por la precipitación de cada uno de los pluviómetros que afectan a cada subcuena para un período de retorno determinado.

Resulta muy útil la observación del  $T_{lag}$  o tiempo de desfase a la punta del hidrograma a partir de datos pluviométricos reales como método de calibración del calculado



Figura 7. Crecida del barranc del Carraixet en su tramo final (24/10/2000).

anteriormente a partir del MDT. Con los registros del SAIH se observa en qué momento se ha producido la punta del hidrograma. Conociendo la diferencia en minutos respecto al centro de gravedad del hietograma se puede estimar el  $T_{lag}$  (figura 6) para el Carraixet hasta el aforo SAIH que es de 2,5 horas, valor muy próximo a las 2,4 horas estimadas para el barranc de Olocau Alto a partir del MDT. La crecida puede caracterizarse como de tipo *flash-flood* con un súbito pico de crecida que se produce en cuestión de una hora o minutos de acusado ascenso (casi vertical) pero más pausado y tendido en su curva de descenso.

#### *Principales afecciones durante la crecida de octubre de 2000*

La información de caudales provenientes de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) de la CHJ y de las lecturas del nivel de aguas en escalas señala que cerca de la desembocadura en la escala de Tavernes Blanques-Almàssera (en el muro junto al puente de la CV-300) se registraron caudales por encima de los 300 m<sup>3</sup>/seg según cálculos establecidos a partir de los datos observados, frente a los 100 m<sup>3</sup>/seg registrados en Bétera. Esto sólo se explica por un recrudecimiento de las intensidades de precipitación sobre las subcuencas del barranc del Cerezo y de Nàquera con unos enérgicos relieves cercanos al mar que disparan la inestabilidad. Todo ello acompañado de una confluencia simultánea de puntas de crecida sobre los tramos medio y bajo del Carraixet (figura 7). Por otro lado, no se debe dejar de considerar el hecho de tratarse de unas cuencas con un substrato de terreno más impermeable que las situadas en la cabecera donde la absorción de precipi-

tación por la vegetación arbórea es mucho más efectiva que aguas abajo (ver figura 3, mapa de  $P_0$ ).

Los problemas de desbordamientos se deben en gran medida en el tramo final del Carraixet a los aportes del barranc del Palmaret y a que la red de drenaje se encuentra claramente deshecha. El lecho pierde su definición y se activan numerosos paleocanales en el llano de inundación por la intensa ocupación histórica del suelo en este sector (COPUT, 1997). Siendo el riesgo máximo en los márgenes del cauce a partir del núcleo de Moncada sobre un área topográficamente deprimida (*marjal de Montcada*), disminuyendo el riesgo con reducción de los calados y aumento del periodo de retorno conforme nos vamos alejando en abanico del cauce principal del barranco hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo.

Se formó un área inundada por flujos muy veloces de rotura de las márgenes (*breach flow*) con daños sobre parcelas agrícolas de huerta y naranjos entre los núcleos de Borbotó y Carpesa provocados por aguas pluviales procedentes del área de Burjassot-Godella y de Benifaraig. Estas aguas discurrieron por un paso deprimido entre Alfara del Patriarca y Benifaraig y se concentraron en el núcleo urbano de Tavernes Blanques por desbordamiento de las orillas (*overbank flow*) con flujos de retorno (*ebb flow*) hacia el propio cauce del barranc del Carraixet.

#### RESULTADOS DEL MODELO *HEC-HMS* A LA CUENCA DEL BARRANC DEL CARRAIXET: SIMULACIÓN DEL EPISODIO DE OCTUBRE DE 2000

El siguiente paso es la realización de un modelo que permita la simulación y cálculo de caudales. Para la obtención de caudales, y en general para el desarrollo del modelo hidrometeorológico, se ha utilizado el programa *HEC-HMS* desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1998). Las siglas *HMS* (*Hydrologic Modeling System*) corresponden a un entorno de modelación agregada ampliamente utilizado que contiene una colección de modelos hidrológicos clásicos. *HEC-HMS* es la versión *Windows* del clásico *HEC-1* y contiene prácticamente todas las rutinas y modelos de este programa en un entorno visual que facilita enormemente la revisión de las ejecuciones.

El modelo *HEC-HMS* está dentro del grupo de modelos hidrológicos agregados. Aunque se puede denominar en cierto modo pseudo-distribuido, ya que la obtención de los parámetros se hace de modo distribuido anexando un SIG ráster (a excepción de la precipitación) y dividiendo la cuenca aforada en numerosas subcuencas. Se podría decir que este tipo de modelos ofrece mejores resultados con menores complicaciones al tratarse de modelos elaborados a partir de información de carácter distribuido pero de ejecución relativamente rápida por tener pocos parámetros a calibrar en situaciones en tiempo real. Presenta ventajas respecto a los modelos distribuidos (sencillez, rapidez, facilidad en la calibración de los parámetros a introducir...) y frente a los modelos agregados a gran escala pues refleja la cuenca de drenaje de un modo más complejo.

Para comenzar se inserta un modelo de cuenca en el que se represente las entradas de agua (precipitación recibida en cuenca), los puntos de control del caudal (aforos) y los tramos de propagación de avenidas en cauce. Para el correcto funcionamiento del programa se requiere la definición de los siguientes aspectos:

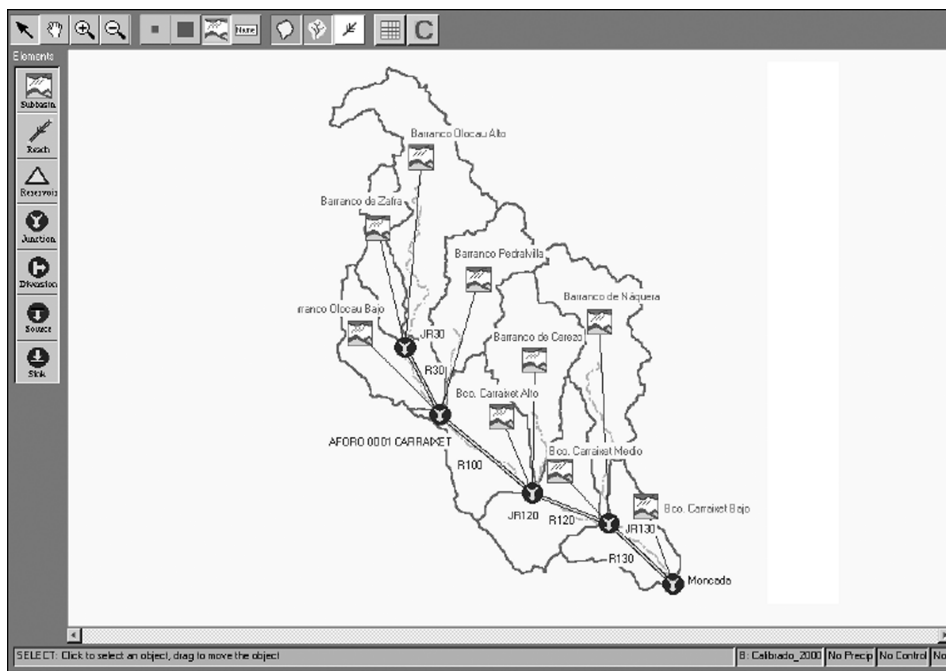


Figura 8. Vista del esquema básico del modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del barranc del Carraxet.

1. *Cálculo de la lluvia neta*: Calcula qué cantidad de la lluvia caída sobre la subcuenca pasa a formar parte de la escorrentía o flujo superficial, descontando aquella parte que es interceptada por la vegetación, que se infiltra o almacena en el terreno, que se evapora...
2. *Cálculo del hidrograma de escorrentía superficial* en el punto de desagüe de la subcuenca.
3. *Desestimamos el flujo basal* al tratarse de una rambla.

#### *Desagregación espacial de la cuenca*

Para llevar a cabo la modelación de la cuenca del Carraxet, se ha asumido una desagregación espacial en subcuencas y tramos de río con sus correspondientes nudos de conexión o puntos de control. Para ello hay que introducir al comenzar la utilización del modelo el esquema básico de la cuenca, es decir todas las subcuencas dispuestas en su correcta posición, con los nudos donde desembocan tal como dedujimos del MDT y los correspondientes tramos de laminación. Se procede a la delimitación del perímetro y área de las subcuencas, así como de sus características geomorfológicas más representativas empleando un SIG que toma como entrada un MDT. El criterio de elección de las subcuencas (figura 8) ha sido tomar como puntos de drenaje de cada una:

Los puntos de desembocadura de los afluentes importantes y cuencas de cabecera al cauce principal.

Otros puntos representativos como la ubicación de la estación de aforos del SAIH o puntos geográficos conflictivos desde el punto de vista de la ocupación del territorio (Moncada).

Cabe destacar que la simulación se ha hecho hasta un punto de la cuenca situado entre Moncada y Alfara del Patriarca posterior a la confluencia de los barrancos de Cerezo y Nàquera, donde comienzan a aparecer los principales problemas de inundabilidad. Este punto está situado varios kilómetros aguas abajo del aforo SAIH 0001 de Bétera sobre el puente que cruza el cauce principal. Por esta razón la superficie de la cuenca de drenaje simulada es de 248 km<sup>2</sup> frente a los 128 km<sup>2</sup> de cuenca de drenaje existentes hasta el Marco de Control del SAIH en Bétera (CAMARASA, 1995). Utilizando la base topográfica del Carraixet (MDT) la confluencia de los barrancos de Cerezo y Nàquera no es coincidente cosa que si ocurre en la realidad debido a la intensa alteración del medio natural.

#### *Asignación de parámetros*

Una vez definido el esquema básico que describe el comportamiento físico de una cuenca hidrológica, simulando los tres procesos básicos que en ella tienen lugar (infiltración, escorrentía y propagación) se debe pasar a insertar los parámetros necesarios que permitan al programa aplicar cada uno de los modelos para llegar a unos resultados finales. Para ello hay que definir los parámetros hidrológicos, tanto de subcuencas como de tramos de propagación en cauces, confluencias, precipitaciones, etc.

A continuación se introducen los datos de precipitación bruta en cuenca para cada una de las subcuencas que configuran el modelo. Se ha introducido tanto el hidrograma registrado en el Marco de Control SAIH 0001 Carraixet (Bétera) como los datos de precipitación que afectan a cada subcuenca por medio de los hietogramas registrados por el SAIH ponderados por su correspondiente coeficiente de Thiessen para cada subcuenca. Previamente se ha solucionado satisfactoriamente la introducción en tiempo real de los datos de precipitación recibidos por la red de pluviómetros del SAIH-Júcar mediante la importación en formato *dss* al paquete de software *HEC-HMS*. Para definir este modelo se insertan los pluviogramas de precipitación acumulada con una discretización cincominutal. A este dato de precipitación se le aplican las pérdidas por infiltración siguiendo el modelo del SCS ( $P_0$  y  $CN$ ), así como el tiempo de desfase a la punta ( $T_{lag}$ ) del hidrograma unitario del SCS y los parámetros de Muskingum  $X$ ,  $K$  y  $n$  de propagación en cauces.

#### *Ejecución de la simulación y observación-comparación de los resultados*

Finalmente, se aplica el modelo y se observa el volumen de agua total escurrido y otra serie de parámetros que nos comparan los resultados de la modelización con los del hidrograma observado. Completado este paso se puede obtener una salida de los resultados bien de forma gráfica o en forma de listado de datos. Éstos posteriormente son exportados mediante el programa *HEC-Ras* a un entorno *Excel* lo que permite un análisis

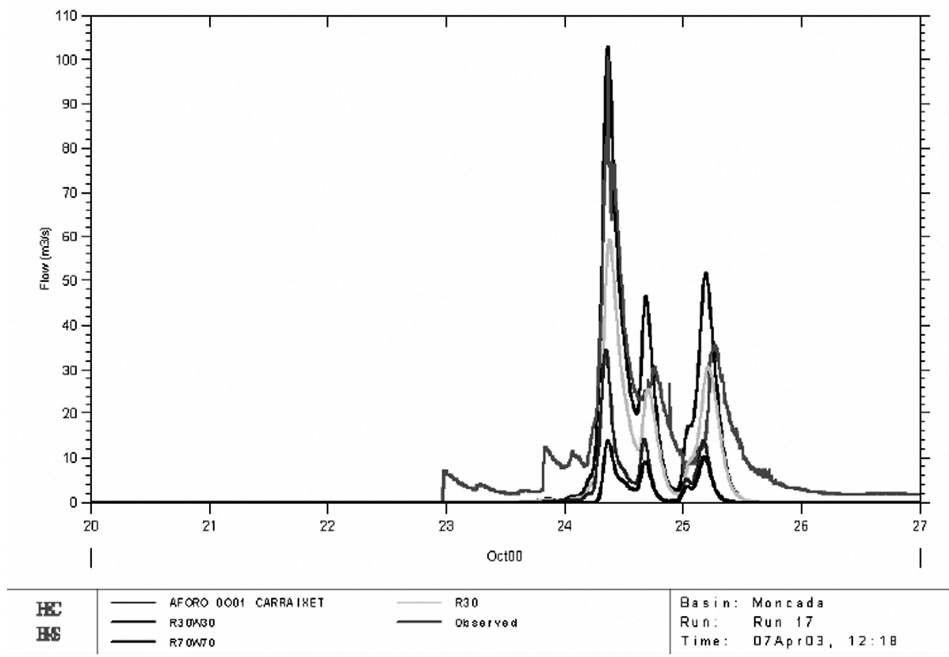


Figura 9. Simulación de la crecida mediante HEC-HMS en el aforo SAIH 0001 Carraixet.

matemático y estadístico de los resultados obtenidos comparándolos con el caudal registrado por el SAIH, tal como aparece en la figura 9.

Una vez aplicado el modelo se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los elementos o *ítems* del modelo *HEC-HMS* (subcuencas, confluencias y tramos de laminación) como se detalla a continuación en el cuadro 5. El resultado de la simulación da sobre el aforo SAIH un caudal de 102,79 m<sup>3</sup>/seg frente a los 100,56 m<sup>3</sup>/seg observados. En cuanto al momento de máximo caudal la simulación coincide con los datos registrados por el SAIH (08:40 horas). A su paso por Moncada la crecida del Carraixet según el modelo llegaría hasta los 184,38 m<sup>3</sup>/seg 2 horas y 10 minutos después de su paso por el Marco de Control del SAIH.

Durante el proceso de verificación y comparación de los resultados obtenidos con los observados se puede ver que en la simulación realizada en ambas cuencas existe una correspondencia inequívoca entre la estructura interna del hietograma de precipitación y las características del hidrograma de crecida. Sin embargo las características físicas y morfométricas de la red de drenaje nos darán muchas respuestas acerca del funcionamiento de la cuenca de drenaje y de los procesos de generación y traslación en cauces. Mientras que la lluvia antecedente, la litología y sobre todo la intensidad de precipitación influirán notablemente en las pérdidas hídricas por transmisión y en los umbrales de escorrentía.

En el barranc del Carraixet se necesitó mucha lluvia para generar una escorrentía destacable con casi dos días de precipitaciones previas. Prueba de ello es que no es hasta el día 24 por la mañana cuando se genera el hidrograma de crecida. Esto es debido por una

Cuadro 5. Resultados de la simulación mediante HEC-HMS y comparación con el caudal observado.

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Caudal Pico Qp (m <sup>3</sup> /seg)	Momento de la punta Día/hora	Precipitación Total bruta A (mm)
<b>HMS</b>				
Bco. Olocau Alto	44,30	34,30	24/10/00 09:20 h	258,7
Bco. de Zafra	14,38	31,97	24/10/00 08:10 h	212,4
Bco. Olocau Bajo	21,21	34,59	24/10/00 08:20 h	214,1
Bco. Pedralvilla	27,34	13,65	24/10/00 08:45 h	212,5
Bco. Carraixet Alto	28,01	57,72	24/10/00 08:00 h	233,9
Bco. de Cerezo	29,04	13,64	24/10/00 08:30 h	218,1
Bco. Carraixet Medio	28,74	65,7	24/10/00 07:55 h	237,9
Bco. de Nàquera	36,36	18,20	24/10/00 09:05 h	220,0
Bco. Carraixet Bajo	18,47	37,63	24/10/00 08:00 h	238,1
<b>TOTAL</b>	<b>247,83</b>			

Subcuenca	Escorrentía Precipitación Neta B (mm)	Pérdidas Infiltración A-B (mm)
<b>HMS</b>		
Bco. Olocau Alto	29,1	229,6
Bco. de Zafra	46,3	166,1
Bco. Olocau Bajo	36,3	177,8
Bco. Pedralvilla	15,3	197,2
Bco. Carraixet Alto	54,7	179,2
Bco. de Cerezo	14,8	203,3
Bco. Carraixet Medio	61,1	176,8
Bco. de Nàquera	18,5	201,5
Bco. Carraixet Bajo	57,0	181,1

Puntos de confluencia	Caudal Pico Qp (m <sup>3</sup> /seg)	Momento de la punta Día/hora	Salida total (mm)	
<b>HMS</b>				
Olocau Alto-Zafra	59,75	24/10/00 08:30 h	33,3	
<b>Pedr.-Olocau B. (AFORO 0001)</b>	<b>102,79</b>	<b>24/10/00 08:40 h</b>	<b>29,3</b>	
Carraixet Alto - Bco. de Cerezo	136,07	24/10/00 09:20 h	31,1	<b>Descarga Total obs. (mm)</b>
Carraixet Medio - Bco. de Nàquera	174,73	24/10/00 09:30 h	32,8	
Desagüe Carraixet en Moncada	184,38	24/10/00 10:50 h	34,6	<b>37,9</b>
<b>CAUDAL REGISTRADO</b>	<b>Qp Aforo (m<sup>3</sup>/seg)</b>	<b>Día/hora</b>	<b>Residual (m<sup>3</sup>/seg)</b>	<b>Total Resid. (mm)</b>
<b>Aforo SAIH Carraixet</b>	<b>100,56</b>	<b>24/10/00 08:40 h</b>	<b>3,54</b>	<b>-8,6</b>

Tramo de traslación-laminación HMS	Qp Entrada Tramo (m <sup>3</sup> /seg)	Día/hora	Qp Salida Tramo (m <sup>3</sup> /seg)	Día/hora
Bco. Olocau Bajo	59,75	24/10/00 08:30 h	59,21	24/10/00 09:00 h
Bco. Carraixet Alto	102,79	24/10/00 08:40 h	110,8	24/10/00 09:40 h
<b>Obser. Aforo SAIH Carraixet</b>	<b>100,56</b>	<b>24/10/00 08:40 h</b>		
Bco. Carraixet Medio	136,07	24/10/00 09:20 h	135,21	24/10/00 09:55 h
Bco. Carraixet Bajo	174,73	24/10/00 09:30 h	172,57	24/10/00 10:55 h

parte a que las lluvias del día 22 no tuvieron demasiada entidad en magnitud e intensidad por lo que el hidrograma generado el día 23 apenas alcanza los 10 m<sup>3</sup>/seg. Por otra parte se debió a una focalización tanto en el llano y piedemonte de Bétera como en los rebordes montañosos compartimentados más litorales (barranc de Nàquera y de Cerezo). También intervino como causa la presencia de un substrato más permeable con predominio de areniscas y calizas que da unos umbrales de escorrentía superiores a los 85 mm en condiciones secas absorbiendo lluvia cuando baja su intensidad. Pero sobre todo es la presencia de canales amplios y pedregosos lo que favorece las pérdidas por transmisión y el consecuente retardo y reducción de la escorrentía.

Según se muestra en los resultados de la simulación las pérdidas en las subcuencas de cabecera fueron de entre el 85 y el 90%. Como ejemplo más destacado podemos citar el barranc de Pedralvilla con una precipitación bruta de 212,5 mm, unas pérdidas de 197,2 mm y un diferencial o precipitación neta de 15,3 mm. El tiempo de desfase a la punta observado está en torno a las 2 horas y media muy similar al calculado para el barranc de Pedralvilla a partir del MDT.

Durante los días 22 y 23 de octubre los abanicos aluviales y derrubios de ladera retuvieron el inicio de la escorrentía hasta superar sus umbrales que son notablemente altos en las cabeceras de los barrancos de Olocau, Zafra y Pedralvilla. Si se observa el hidrograma observado sobre el aforo se puede ver que pese a tratarse de una única punta el día 24, ésta presenta 3 picos que van disminuyendo en magnitud conforme avanzaba la mañana del día 24 y que dan una marcada forma tendida a la curva de descenso. Esta configuración se debe por una parte a la forma del hietograma de Portaceli (0P02) que acumuló 212 mm y genera la mayor parte del área Thiessen que afecta a este tramo y por otro lado a una falta de sintonía en la confluencia de las crecidas de los barrancos de Olocau (más sinuoso) y Pedralvilla (más rectilíneo) 5 km aguas arriba del aforo SAIH 0001 entre Olocau y Bétera debido a las notables diferencias en la configuración de sus redes de drenaje que afecta directamente a los tiempos de viaje y de concentración. Además en este primer tramo de traslación ya aparecen notables pérdidas por transmisión que en parte son liberadas unas horas después. Como se observó en el cuadro 2 el barranc de Pedralvilla tiene un  $T_c$  de 4 horas y media mientras que el barranc de Olocau por su compleja configuración supera las 9 horas.

Es sobre los barrancos de Olocau y Pedralvilla donde se concentran las precipitaciones de los rebordes más elevados siendo el doble de voluminosas que las recogidas en el pluviómetro de Portaceli, no así las intensidades. En el mapa de Thiessen se podía comprobar que estaba afectado por los registros pluviométricos de Cueva Santa 0P03 y Sagunto 0L01 y Portaceli 0P02.

Tal como se ve en la desagregación del modelo del Carraixet, las subcuencas ubicadas en los barrancos de Nàquera y Cerezo generaron buena parte de la escorrentía y contribuyeron notablemente a duplicar el caudal simulado en el desagüe del modelo (Moncada) respecto del simulado y observado en el Marco de Control del SAIH. Mientras que el pico de 100 m<sup>3</sup>/seg (en la mañana del día 24) lo constituye en su mayor parte, favorecida por red de drenaje bien organizada, las aguas escurridas desde el barranc de Pedralvilla. Por último la pequeña crecida observada el día 23 tan sólo se aprecia en las simulaciones realizadas en las subcuencas ubicadas aguas abajo del aforo.

La traslación de la avenida se produce según la simulación de modo rápido con poco desfase y en apenas 1 hora entre la primera confluencia (Olocau-Zafra) y el desagüe en Moncada. En el final del modelo (*outlet*) el caudal punta se incrementa en más de 100 m<sup>3</sup>/seg respecto del observado y simulado por los aportes del barranc de Nàquera y Cerezo, aportes no monitorizados en el aforo SAIH. En cuanto a las confluencias de subcuencas tras la unión de estos dos últimos barrancos en Bétera se ubica el punto crítico de coalescencia de puntas y donde la crecida comienza a tomar entidad (185 m<sup>3</sup>/seg). Finalmente se observa que la curva de agotamiento del hidrograma se prolongan hasta el día 27 por los aportes retardados de las formas sedimentarias de transición y de agua retenida en lechos pedregosos.



## CONCLUSIONES

Con todos estos resultados se demuestra la eficacia, precisión e implementación en tiempo real de los modelos pseudo-distribuidos para pequeñas cuencas mediterráneas. Sin embargo los avances y mejoras respecto a la precisión de los resultados de la modelización no implican tanto modificaciones de la estructura interna de los algoritmos de los modelos, que se pueden considerar suficientemente contrastadas, sino se centran más en la mejora de la calidad de los datos de entrada. Especialmente el conocimiento de la distribución espacial de las precipitaciones mediante una malla representativa de su localización. Incluso en zonas con una alta densidad de pluviómetros, los métodos habituales de interpolación para obtener la precipitación media areal en una determinada subcuenca pueden dar lugar a resultados que distan considerablemente de la realidad; sobre todo en el caso de las precipitaciones convectivas, con importantes variaciones espaciales, características del óvalo litoral valenciano.

La discretización temporal de la precipitación es posible obtenerla desde la implantación de los SAIH en el territorio español. En cuanto a su distribución espacial en tiempo real se puede mejorar si se analiza de forma cuantitativa la información de las imágenes de radares meteorológicos, agua precipitable y nubosidad y se integra en los modelos hidrometeorológicos en tiempo real; sin embargo los avances son todavía escasos. Por consiguiente, la condición principal para poder realizar previsiones más precisas y aumentar los tiempos de aviso es la mejora de los datos del campo de precipitación y su predicción (BEVEN y BINLEY, 1992). Es por ese motivo que el desarrollo y la evolución de modelos de precipitación-escorrentía están muy relacionados con los avances en la predicción meteorológica y que el desarrollo de unos debe ir parejo con el de los otros.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto "Riesgo de inundación en ramblas mediterráneas. Umbrales nideogeomorfológicos de crecida" REN2003-07171 financiado por MEC y con la colaboración de fondos FEDER.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABBOTT, M. B. y REFSGAARD, J. C. (eds.) (1996): *Distributed Hydrological Modelling*, Kluwer Academic Publishers.
- ARMENGOT SERRANO, R.; ABELLÁN ANDRÉS, J.J. y PÉREZ CUEVA, A.J. (2001): Evaluación de un modelo de regresión logística de lluvias intensa en territorio valenciano con el episodio de octubre de 2000, *El Tiempo del Clima*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC) Serie A, número 2, pp. 291-301.
- BEVEN, K. J. (2001): *Rainfall-runoff modelling. The Primer*. John Wiley & Sons, Chichester England, 360 pp.
- BEVEN, K. y M.J. KIRKBY (eds.) (1993): *Channel Network Hydrology*. John Wiley & Sons.
- BEVEN, K. y I.D. MOORE (eds.) (1993): *Terrain Analysis and Distributed Modeling in Hydrology*. John Wiley & Sons.
- BEVEN, K. J. y BINLEY, A. (1992): The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, Vol 6, pp. 279-298.
- CAMARASA BELMONTE, A.M<sup>a</sup>. (1991): La intensidad de las lluvias extremas mediterráneas a partir de la red S.A.I.H., *XII Congreso de Geografía*, Valencia 1991, pp. 127-133.

- CAMARASA BELMONTE, A.M<sup>a</sup>. (1995): *Génesis de crecidas en pequeñas cuencas semiáridas: Barranc de Carraixet y Rambla del Poyo*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Júcar, 252 pp.
- CLARK, M. J. (1999): Putting water in its place: a perspective on GIS in Hydrology and Water Management. En *Hydrological Applications of GIS*. (Eds. Gurnell, A. M., and Montgomery, D. R.). *Advances in Hydrological Processes*. John Wiley and Sons. Great Britain, pp. 3-14.
- CONSELLERIA D'OBRES PÚBLIQUES, URBANISME I TRANSPORTS, (COPUT). (1997): *Delimitación del riesgo de inundación a escala regional en la Comunidad Valenciana*. Generalitat Valenciana, Serie Cartografía Temática 1.
- DIHMA (1996): *Obtención de características geomorfológicas e hidrogramas unitarios a partir de un modelo digital del terreno*. Informe para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.
- ESTRELA, T. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Crecida. Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*. CEDEX, MOPTMA (sin paginar).
- FELICÍSIMO, A. M. (1994): *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo. Pentalfa Ediciones.
- FERRER, M.; RODRÍGUEZ J. y ESTRELA T. (1995): Generación automática del número de curva con Sistemas de Información Geográfica, *Ingeniería del Agua. Volumen 2, n° 4 (diciembre 1995)*, pp. 43-58. Universidad Politécnica de Valencia, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA.
- FERRER POLO, F.J. (1993): *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Centro de Estudios Hidrográficos. MOPTMA. 75 pp.
- FRANCÉS GARCÍA, F. y BENITO CASADO, J. (1995): La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas, *Ingeniería del Agua. Volumen 2, n° 4 (diciembre 1995)*, pp. 7-24. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.
- FRANCÉS GARCÍA, F. (2002): *Modelación hidrológica distribuida, Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Centro de Estudios Hidrográficos. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente.
- GARCÍA GALIANO, S.G. (2000): *La simulación y el pronóstico hidrológico basado en GIS y DEM: análisis de sensibilidad a los factores de escala*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 404 pp.
- GARROTE, L. (2002): *Construcción de modelos hidráulicos e hidrológicos para uso en tiempo real, Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Centro de Estudios Hidrográficos. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente.
- LÓPEZ GARCÍA M.J. y CAMARASA BELMONTE, A.M<sup>a</sup>. (1999): Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment. *ITC journal, International journal of applied earth observation and geoinformation*. Issue 3-4. Editorial Board, pp. 187-195.

- MAIDMENT, D. y DJOKIC, D. (2000): *Hydrologic and hydraulic modelling support with Geographic Information Systems*. Ed. Esri Press and Environmental Systems Research Institute, 216 pp.
- MARCO, J. y REYES, M. (1981): *Hidrología*. Servicio de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Valencia, Valencia.
- MATEU BELLÉS, J.F. (1989): Ríos y ramblas mediterráneos, *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, pp. 133-150.
- PASCUAL AGUILAR, J.A. (2001): *Cambios de usos del suelo y régimen hídrico en la rambla del Poyo y el barranc del Carraixet*. Tesis Doctoral, Universitat de València, 307 pp.
- RUESCAS ORIENT, A.B. (1999): Cartografía de usos del suelo por teledetección: La cuenca del Carraixet, *Cuadernos de Geografía*, nº 65-66, pp. 103-121.
- SEGURA BELTRÁN, F. y CAMARASA BELMONTE, A.M<sup>a</sup>. (1996): Balances hídricos de crecidas en ramblas mediterráneas: pérdidas hídricas, *Clima y agua: La gestión de un recurso climático*. La Laguna, pp. 235-245.
- SHERMAN, L. K. (1932): Stream - Flow from Rainfall by the Unit - Graph Method. *Eng. News - Rec.* nº 108, pp. 501-505.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- TÉMEZ PELÁEZ, J.R. (1978): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Carreteras.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (1981): *HEC-1: Flood hydrograph Package, Users Manual*. Davis, Calif.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (1998): *HEC-HMS Hydrologic Modeling System Version 2.1. marzo 1998, User's Manual*.
- VÉLEZ, J. I. (2001): *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- WARD, R. C. and ROBINSON. M. (2000): *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill Publishing Company, London, 450 pp.
- YAIR, A. y LAVEE, H. (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones, *Hydrological Forecasting*, (Anderson & Burt ed.). pp. 183-220.
- YAIR, A. (1990): Spatial variability in runoff in semi-arid and arid areas, *Seminario UIMP*, 1991.

