

Caracterización hidrológica y simulación de hidrogramas de avenida de una pequeña cuenca de montaña del sureste español

JUAN ANTONIO NAVARRO RODRÍGUEZ (*)

JOSÉ LUIS AYUSO MUÑOZ (**)

ADOLFO PEÑA ACEVEDO (***)

RESUMEN Se analiza la hidrología de una pequeña cuenca de montaña, la cuenca del Arroyo Salado de Lanjarón de 273 ha, mediante la aplicación del modelo hidrológico HEC-1. El modelo ha sido calibrado usando datos registrados de episodios de lluvia-escorrentía y posteriormente verificado con diferentes episodios de lluvia-escorrentía observados. Calibrados los parámetros del modelo se simulan diferentes aguaceros de 6 horas de duración para periodos de retorno de 25 y 100 años. Los diversos aguaceros considerados siguen unos patrones deducidos de las relaciones de distribución temporal de las lluvias más intensas y de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia obtenidas para la zona. Se comparan los diversos hidrogramas y los valores de los caudales punta.

FLOOD HYDROGRAPHS SIMULATION AND HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION OF A SMALL HIGHLAND BASIN IN SOUTH-EAST SPAIN

ABSTRACT The hydrology of a small highland basin, the Salado Creek basin of Lanjarón with 273 Ha of area, is analyzed through the use of the HEC-1 flood hydrograph package. The model was calibrated with gaged rainfall-runoff data and validated with different storm events. Once the model parameters were estimated, several synthetic storms of 6 hours of duration for 25 and 100 years of return period were simulated. The storm distribution patterns were taken from temporal distribution of high intensity rainfall events and IDF curves obtained for the site. A discussion of the peak flow rates and hydrographs shapes is finally made.

Palabras clave: Distribución temporal de lluvia; Modelos hidrológicos; Hidrogramas de avenida.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de modelos hidrológicos para la simulación de la respuesta de una cuenca a eventos de lluvia es una práctica común en la ingeniería civil. Los modelos basados en los principios físicos constituyen, por una parte, el enfoque más lógico y científicamente avanzado para comprender el comportamiento hidrológico de cuencas complejas y, por otra, las herramientas que ayudan a establecer las relaciones hidrológicas que permiten la determinación de los hidrogramas de avenida.

El modelo HEC-1 (HEC, 1990) es un modelo físicamente basado que simula la respuesta de una cuenca a aguaceros individuales de los que se conoce la distribución temporal de la lluvia.

Se presenta en este artículo la aplicación del modelo HEC-1 para el análisis y simulación hidrológica de una pequeña cuenca de montaña localizada en la vertiente sur de Sierra Nevada, con el objeto de determinar los hidrogramas de respuesta a aguaceros intensos para diferentes periodos de retorno que puedan utilizarse en el diseño de estructuras de control y/o gestión de la cuenca.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del Arroyo Salado de Lanjarón, tributario del Río Lanjarón, se localiza en la vertiente suroccidental del macizo montañoso de Sierra Nevada (figura 1) entre las coordenadas UTM 4553-4558 y 4866-48913. La superficie aportadora de 518 ha, próxima a Lanjarón, se extiende entre las cotas 670 m, donde se ubica un pequeño embalse de 680 m³ de capacidad, y 2.191 m del punto más alto de Peña Caballera. La cuenca es atravesada por una acequia excavada en tierra de sección rectangular variable entre 0,70 x 0,50 m² y 1,45 x 0,95 m², que discurre aproximadamente paralela a la cota 1.400 m en dirección SE-NO y que la escinde en dos zonas, al recoger y canalizar fuera de la

(*) Ingeniero Agrónomo, MOPTMA, Instituto Nacional de Meteorología.

(**) Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Proyectos de Ingeniería, ETSIAM, Universidad de Córdoba.

(***) Ingeniero Agrónomo, Profesor Titular de Escuela Universitaria del Área de Proyectos de Ingeniería, ETSIAM, Universidad de Córdoba.

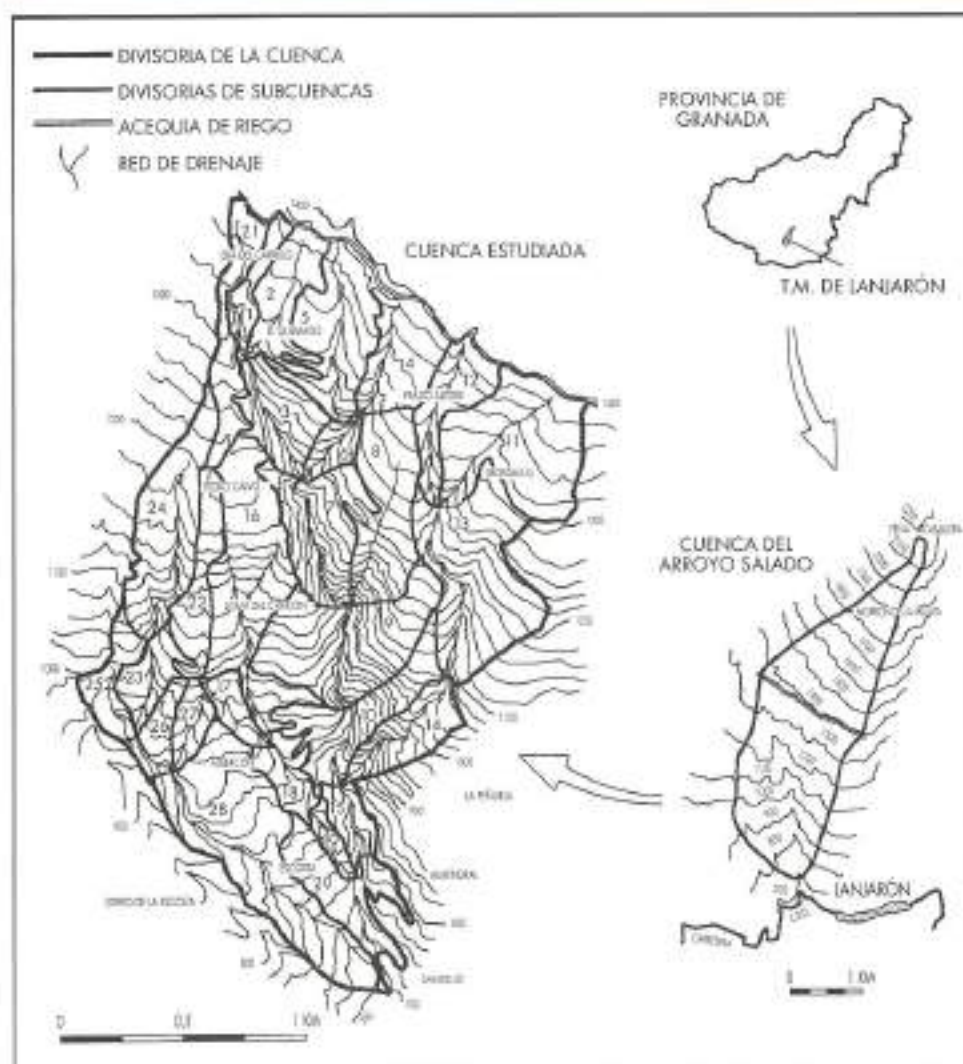


FIGURA 1. Localización geográfica, configuración, topografía e hidrología superficial de la cuenca analizada.

cuenca la escorrentía superficial procedente de la zona superior. Por consiguiente, la acequia actúa de divisoria entre las dos subcuencas. En algunas ocasiones la subcuenca por encima de la acequia contribuye a la escorrentía de la subcuenca inferior con escorrentía subsuperficial diferida en el tiempo que no afecta de manera apreciable a la escorrentía directa o respuesta rápida de la subcuenca inferior a cualquier aguacera.

En el análisis hidrológico realizado en este estudio se considera la subcuenca de la zona inferior de 273 ha comprendida entre la citada acequia y el pequeño embalse de la Estación Experimental Forestal de Lanjarón a la cota 670 m.

2.1. GEOLOGÍA

La cuenca se ubica en el complejo Nevado Filábride o Complejo de Sierra Nevada. La geología de la cuenca comprende los mantos del Veleta y del Mulhacén (Sánchez, 1990). El primero, afectado por metamorfismo regional está constituido por micaesquistos grafitosos que pueden ser feldespatíticos o bióticos y el segundo, por micaesquistos epidiotíticos con turmalinas intercalándose algunos niveles de mármoles cipolíticos (figura 2).

2.2. SUELOS

Los suelos de la cuenca se han formado sobre materiales paleozoicos modificados por metamorfismos regionales, como micaesquistos con grafito y feldespatos alternando con cuarcitas. Debido a las fuertes pendientes y a la gran elevación, los suelos no están muy desarrollados. Se clasifican como *Xerorthents* dentro de la clasificación Soil Taxonomy o *regosoles éutricos* en el sistema FAO (figura 3). La profundidad media no supera los 0,4 m, aunque localmente, en ciertas depresiones, pueda llegar a 1 m de espesor. La proporción de material grueso, próxima al 40%, sirve de protección superficial. La fracción arcillosa es menor del 10% de la fracción más pequeña de 2 mm de diámetro. El pH es próximo a 7,0.

2.3. VEGETACIÓN

La vegetación de la zona se enmarca dentro del entorno de bosque mediterráneo, en el que destacan las especies arbóreas y arbustivas esclerófilas. La presión antrópica en la zona desde la más remota antigüedad ha dado lugar a la desaparición de los encinares, surgiendo un matorral de sustitución y otras especies arbóreas. En la cuenca estudiada (figura 4) predomina el estrato arbustivo (126,1 ha)

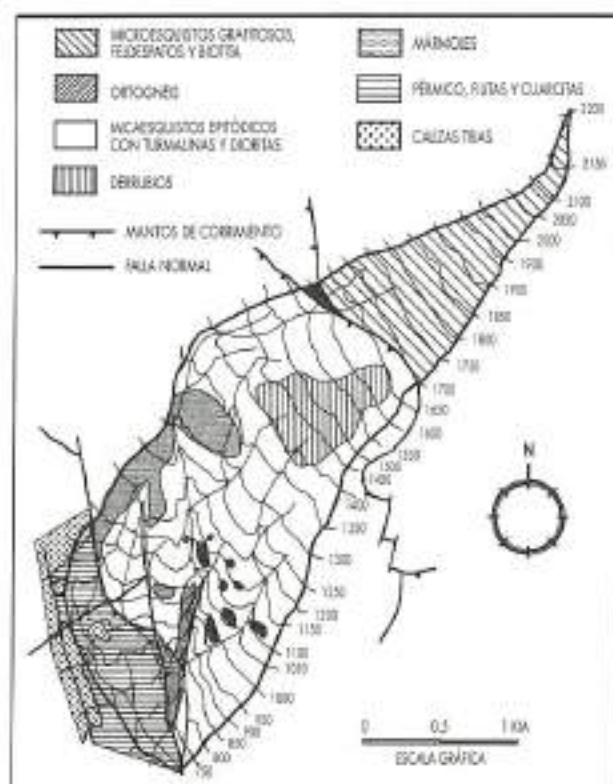


FIGURA 2. Geología de la cuenca del Arroyo Salado.

representado por aulaga (*Ulex europaeus*), jara (*Cistus ladaniferus*) y tomillo (*Thymus vulgaris*). El estrato arbóreo (113,3 ha) está constituido fundamentalmente por coníferas (*Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Pinus silvestris*, *Pinus radiata*, etc.) y frondosas (*Robinia pseudoacacia*), resultado de las diferentes repoblaciones forestales efectuadas en la cuenca desde 1929 dado su carácter de cuenca experimental forestal. Las especies forestales se encuentran principalmente en las zonas adyacentes a los canales de desagüe de la cuenca. En las zonas de menor altitud y pendiente existen cultivos de almendro y otras especies frutales (33,6 ha) cultivadas en terrazas.

2.4. TOPOGRAFÍA

La altitud de la cuenca varía desde la cota 670 m del vertedero del dique del embalse hasta la cota 1.400 m por donde discurre la acequia que sirve de divisoria a efectos del estudio de la escorrentía superficial. La cuenca tiene fuertes pendientes siendo la pendiente media del 46,4%, teniendo el 23% de la superficie una pendiente media superior al 62%.

2.5. PRECIPITACIÓN

La precipitación media anual en la cuenca es de 491,5 mm (período analizado 1945-1992, figura 5) variando entre 291,2 y 823,5 mm. Se distribuye estacionalmente siendo el período lluvioso el correspondiente a las estaciones de otoño-invierno en las que se registra, como promedio, el 75% del total de la lluvia anual. Suelen ocurrir aguaceros de gran intensidad, existiendo registros de intensidades medias de 160 mm/h en 10 minutos (año 1977) y de 42 mm/h en 1 hora (año 1975).

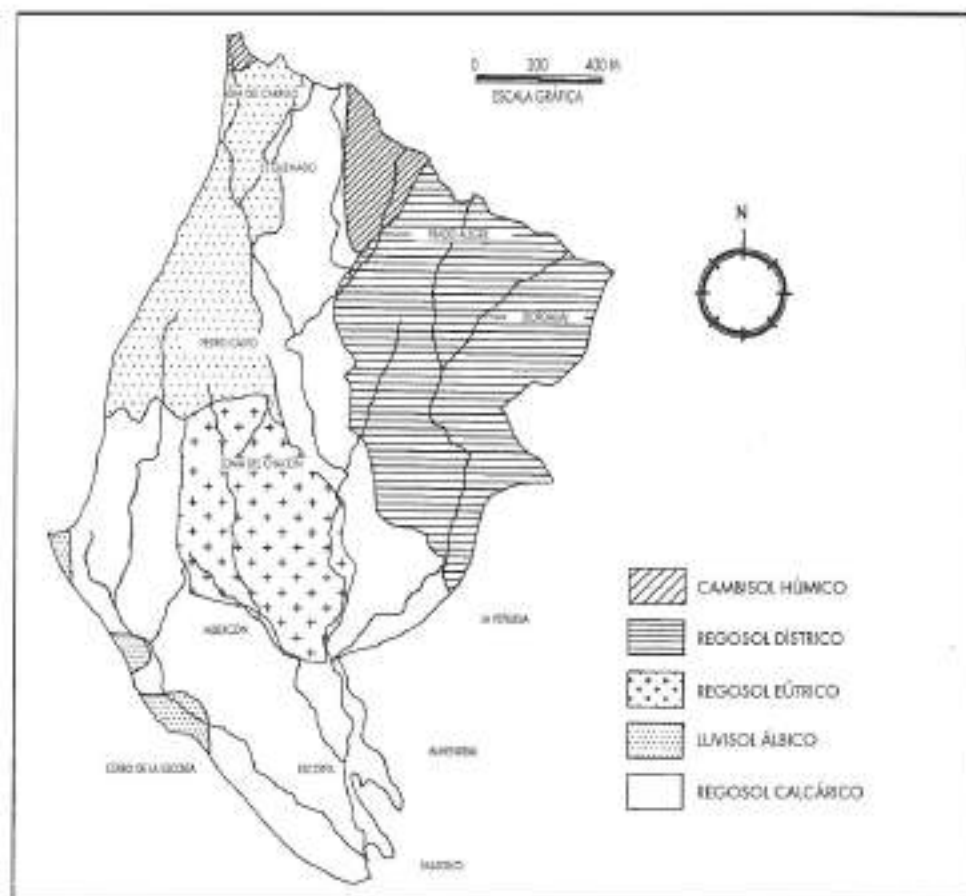


FIGURA 3. Mapa de suelos de la cuenca analizada.

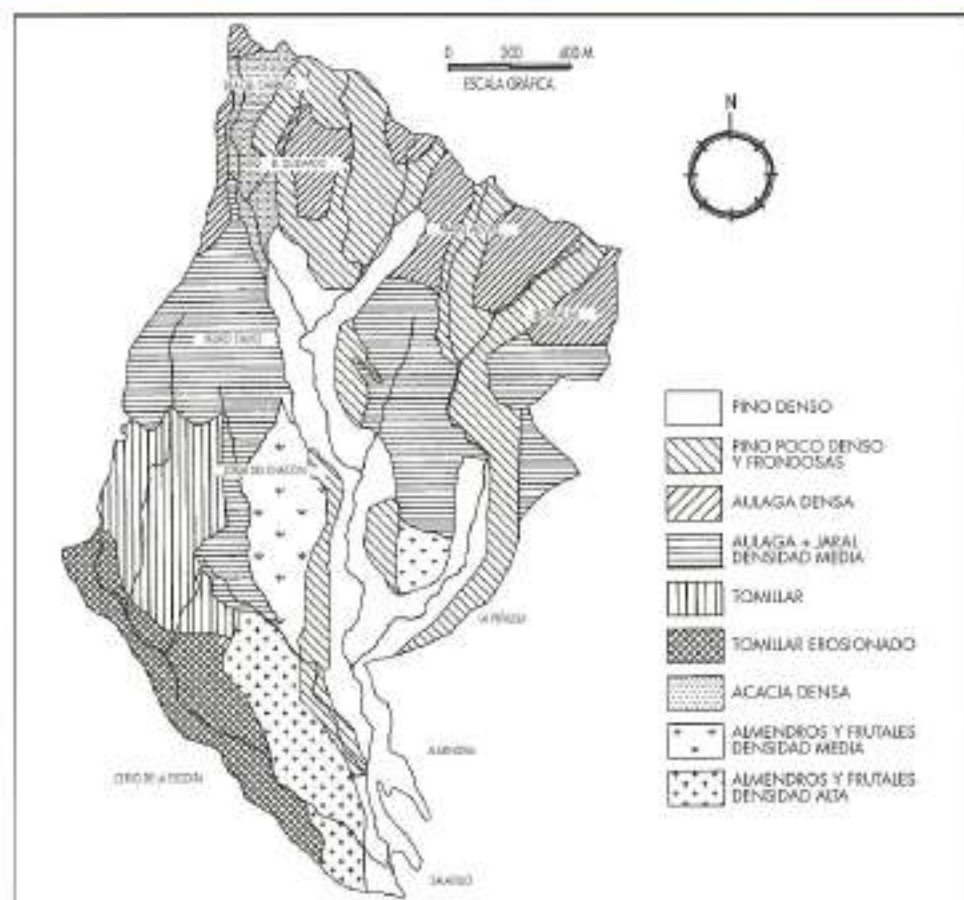


FIGURA 4. Mapa de vegetación y cultivos.

Mediante el análisis de los datos horarios de las lluvias registradas en el periodo 1968-1988 se caracterizó la distribución temporal de los aguaceros más intensos de la zona. Se seleccionaron 282 aguaceros que se clasificaron en cuatro grupos, cuartiles, tras considerar la duración de cada aguacero dividida en cuatro partes iguales (cuartiles) y asig-

nando el aguacero al cuartil en el que se producía la máxima altura de precipitación, obteniéndose la distribución por cuartiles dada en la tabla 1.

CUARTIL	Nº DE AGUACEROS	FRECUENCIA %
1	40	13
2	110	37
3	102	34
4	47	16

TABLA 1. Distribución por cuartiles de los aguaceros en Lanjarón.

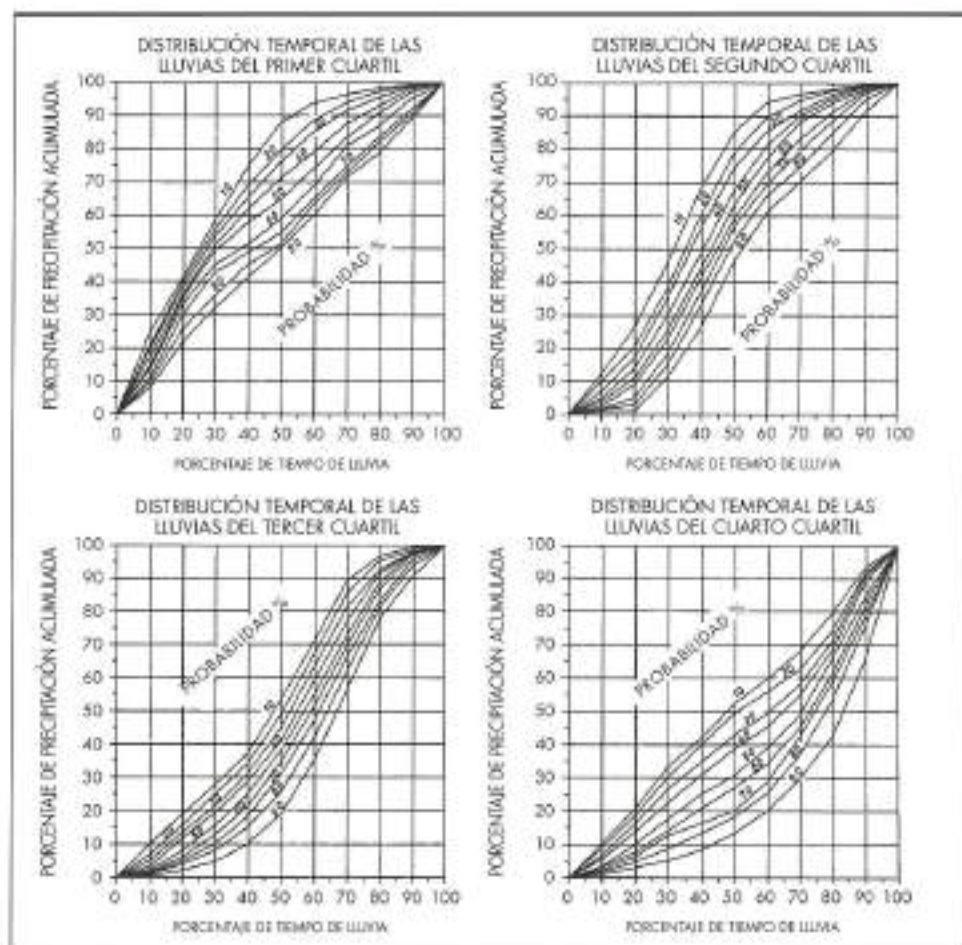


FIGURA 5. Precipitación actual en la cuenca del Arroyo Salado de Lanjarón.

De los 282 aguaceros seleccionados se desarrollaron, siguiendo la metodología propuesta por Ayuso y Molina (1993), las relaciones de distribución temporal de las lluvias más intensas registradas en la cuenca presentándolas en términos de probabilidad (figura 6). Estas relaciones representan los patrones de la distribución temporal de la lluvia en la zona de Lanjarón (Ayuso y col., 1991) y permiten deducir los hietogramas de diseño para la simulación hidrológica de la cuenca.

Se dispone de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la precipitación en la cuenca (figura 7) representada por la siguiente expresión (Ayuso y col., 1991).

$$i = \frac{95,9587^{0,2708}}{t_d^{0,2044}} - 1,2405 \quad [1]$$



donde i representa la intensidad media en mm, T el período de retorno en años y t_d la duración del episodio de lluvia en minutos.

2.6. GEOMORFOLOGÍA

Según el sistema de ordenación de Horton-Strahler (Singh, 1988) la red de drenaje de la cuenca se clasifica de tercer orden (figura 8). La mayoría de los cursos de agua son efímeros, permaneciendo secos durante grandes períodos de tiempo, ocurriendo el flujo como respuesta directa a la precipitación. La longitud total de la red de drenaje es de 12,86 km y la densidad de 47,5 m/ha, siendo la longitud media del flujo superficial, antes del encauzamiento en canales de corriente, de 105 m, oscilando para las diversas subcuencas consideradas entre 30 m y 270 m.

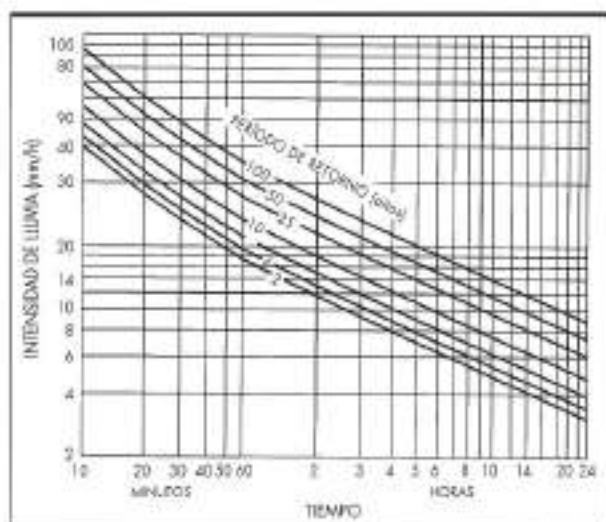
2.7. DATOS FORONÓMICOS

Para la realización de este estudio se ha dispuesto de una serie de hidrogramas registrados en el año 1977 en un limnógrafo que existía en el pequeño embalse ubicado a la salida de la cuenca en la Estación Experimental Forestal de Lanjarón. Estos hidrogramas servirán para la calibración y validación del modelo hidrológico HEC-1 aplicado en el estudio de avenidas en la cuenca.

3. EL MODELO HEC-1

Para el estudio de la escorrentía directa y la predicción de los hidrogramas de avenida para aguaceros de diferentes

períodos de retorno, se ha dispuesto de la versión revisada y actualizada a mayo de 1990 del modelo HEC-1, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de EEUU. El modelo



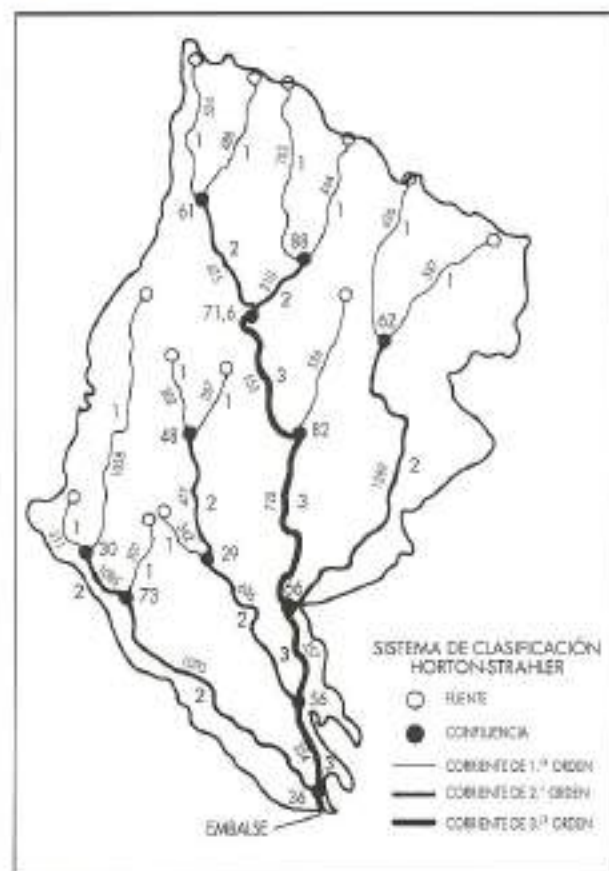


FIGURA 8. Red de drenaje con los ángulos de confluencia en grados sexagesimales, longitudes en metros y órdenes de corriente de la cuenca estudiada.

consta de un programa principal y seis subrutinas de las que dos de ellas realizan la optimización de parámetros para los hidrogramas unitarios, pérdidas por interceptación de parámetros para los hidrogramas unitarios, pérdidas por interceptación, infiltración y circulación de flujos. El modelo simula la respuesta de la cuenca a un aguacero y utiliza parámetros que representan las características medias, en espacio y tiempo, de las subcuencas aportadoras. La base del modelo la constituye la red de drenaje, permitiendo obtener hidrogramas en cualquier punto de la cuenca. Cada subcuenca se representa como una combinación de componentes del modelo (infiltración, escorrentía, circulación de caudales, etc.) que constituyen fases del pro-

ceso de generación y circulación de la escorrentía a través de la cuenca.

La precipitación y la infiltración se suponen uniformes en cada subcuenca, y el exceso de lluvia es circulado por los métodos de onda cinemática o cualquiera de los hidrogramas unitarios que dispone (Clark, Snyder o SCS) hasta la salida de la subcuenca para producir un hidrograma de escorrentía que será circulado a través del canal de la siguiente subcuenca, por cualquiera de los métodos de Muskingum, Muskingum-Cunge u onda cinemática, combinando los componentes de escorrentía superficial y circulación de flujos en canal.

4. APLICACIÓN DEL MODELO

La aplicación del modelo para la simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca a un aguacero requiere las siguientes fases (Bedient y Huber, 1988):

- Caracterización de la cuenca (fisiografía, usos del suelo, precipitación, infiltración, características de los canales, etc.).
- Elección de un método para la determinación de los hidrogramas en las diversas subcuencas y de circulación de flujos por los canales de drenaje aguas abajo de cada subcuenca.
- Calibración del modelo mediante la utilización de datos históricos de lluvia, caudal y condiciones existentes en la cuenca.
- Verificación o validación del modelo usando otros eventos bajo condiciones diferentes manteniendo los mismos parámetros de la calibración.
- Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.
- Ejecución de simulaciones hidrológicas usando hidrogramas de diseño, diversas condiciones de usos del suelo y posibles estructuras hidráulicas de control.

Referente a la caracterización de la cuenca, previamente comentada en el apartado 2, la aplicación del modelo requiere la división de la misma en subcuencas de manera que se asegure la uniformidad de los parámetros requeridos por el modelo en cada una de ellas y que simule el comportamiento real de la cuenca. Del análisis de mapas topográficos, fotografías aéreas y trabajo de campo, se realizó la subdivisión de la cuenca en 28 subcuencas (figura 1) con sus correspondientes componentes de escorrentía superficial y de circulación de flujos en canal que se muestra en la figura 9.

De los diversos métodos disponibles por el modelo HEC-1 para la determinación de los hidrogramas de las subcuencas y de circulación de flujos, la tabla 2 indica los utilizados en este trabajo junto con los parámetros requeridos.

El comportamiento hidrológico de los suelos es descrito por el método del número de curva del Servicio de Conserva-

COMPONENTE	OPCIÓN UTILIZADA	PARÁMETROS
Precipitación	Especificación del hidrograma	—
Infiltración y sustracción inicial [S]	Método del Número de Curva del SCS	NC y S
Escorrentía superficial	Onda cinemática	Pendiente de ladera y coeficiente de rugosidad
Circulación de caudales	Onda cinemática	Pendiente, sección transversal del canal y n de Manning

TABLA 2. Componentes principales del modelo HEC-1 y opciones utilizadas.

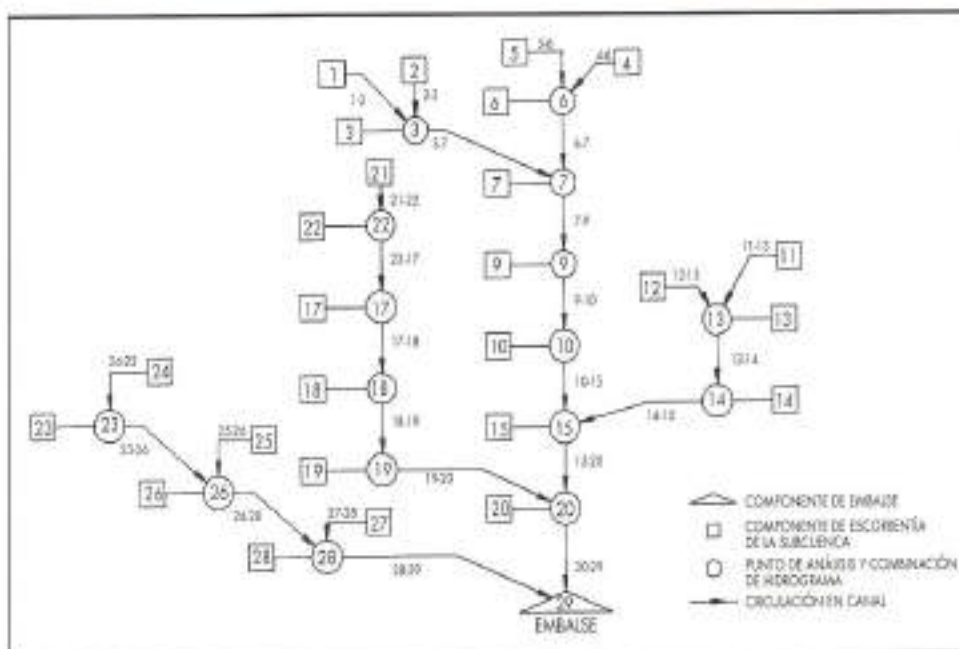


FIGURA 9. Componentes de escorrentía superficial de la cuenca y secuencia de cálculo utilizada por el modelo HEC-1.

ción de Suelos de EEUU, en el que NC representa el número de curva y S_i la sustracción inicial que representa el valor de la precipitación por debajo de la cual no se producirá escorrentía. Los valores de NC y S_i están relacionados con el volumen de escorrentía por las siguientes expresiones (Boughton, 1988 y Hjelmfelt, 1991):

$$V = \frac{(P - S_i)^2}{P - S_i + S} \quad [2]$$

$$S = 254 \left[\frac{100 - NC}{NC} \right] \quad [3]$$

$$S_i = K \cdot S \quad [4]$$

donde V representa la escorrentía acumulada en mm, P la altura de lluvia acumulada en mm, S la retención máxima potencial del suelo y K un porcentaje del valor de S . En la determinación de los valores de partida de los parámetros NC y S_i para la fase de calibración se siguió la metodología expuesta por el SCS (1972), partiendo de los valores dados por la condición de humedad antecedente. Se ajustó un valor real del parámetro correspondiente a la humedad real del suelo al inicio del aguacero.

La mayor sensibilidad del modelo se ha observado en los parámetros NC y S_i frente a los coeficientes de rugosidad para los que la respuesta del modelo a variaciones en los mismos fue muy poco significativa. En consecuencia, la calibración se limitó a los parámetros anteriores considerando un valor medio para el coeficiente n de Manning de 0,04 en canales. La tabla 3 muestra los valores de dichos parámetros junto con otros parámetros geomorfológicos requeridos por el modelo como pendientes de canales y de subcuencas. Asimismo, mediante trabajo de campo se obtuvo el perfil de las secciones transversales tipo representativas para los diversos tramos de canales de las subcuencas requeridos por el modelo para la circulación de los hidrogramas de avenida por el método de la onda cinemática (figura 10).

4.1. CALIBRACIÓN

La calibración es una parte esencial del proceso de modelación. Con la calibración se pretende ajustar los parámetros del modelo, de manera que los hidrogramas obtenidos mediante su aplicación reproduzcan satisfactoriamente los hidrogramas registrados en la cuenca. Con la división en subcuencas establecida, la calibración se ha realizado partiendo de una estimación inicial de parámetros y efectuando ejecuciones sucesivas del modelo en las que se introducen modificaciones en los valores de los parámetros (Navarro, 1993) de acuerdo con la asignación inicial. Debido a la opción elegida de estimar las pérdidas por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial mediante el método del Número de Curva del SCS, los parámetros importantes a ajustar son los que determinan la cantidad de lluvia que aparece como escorrentía directa y la velocidad del flujo superficial, es decir, el número de curva, NC (que tiene en cuenta la humedad inicial) y la sustracción inicial S_i (interceptación y almacenamiento superficial) por una parte y los coeficientes de rugosidad en la circulación de flujos, por otra.

Para la calibración se dispuso de diversos hidrogramas registrados en el limnógrafo del embalse de la Estación Experimental Forestal de Lanjarón. Se eligió el hidrograma registrado durante los días 7 y 8 de diciembre de 1977 (figura 11) que produjo un volumen total de escorrentía de 3.857 m³, equivalente a 1,41 mm de altura, con un caudal punta de 8,8 10⁻² m³/s, siendo la precipitación total de 42,2 mm.

El ajuste de los números de curva, NC , de cada una de las subcuencas y de las sustracciones iniciales, S_i , a utilizar por el modelo se realizó del siguiente modo: a) La lluvia registrada durante los cinco días anteriores al episodio de escorrentía registrado durante los días 7 y 8 de diciembre de 1977, determinaron la condición de humedad antecedente (CHA), correspondiendo a la condición I; b) Identificada la CHA , se asignó a cada subcuenca los valores de los números de curva establecidos en la tabla 3, de acuerdo a las características de los suelos, tipo de cubierta vegetal y condiciones hidrológicas; c) Mediante variaciones porcentuales de los valores de los NC de partida y de las sustracciones iniciales S_i , se trató de reprodu-

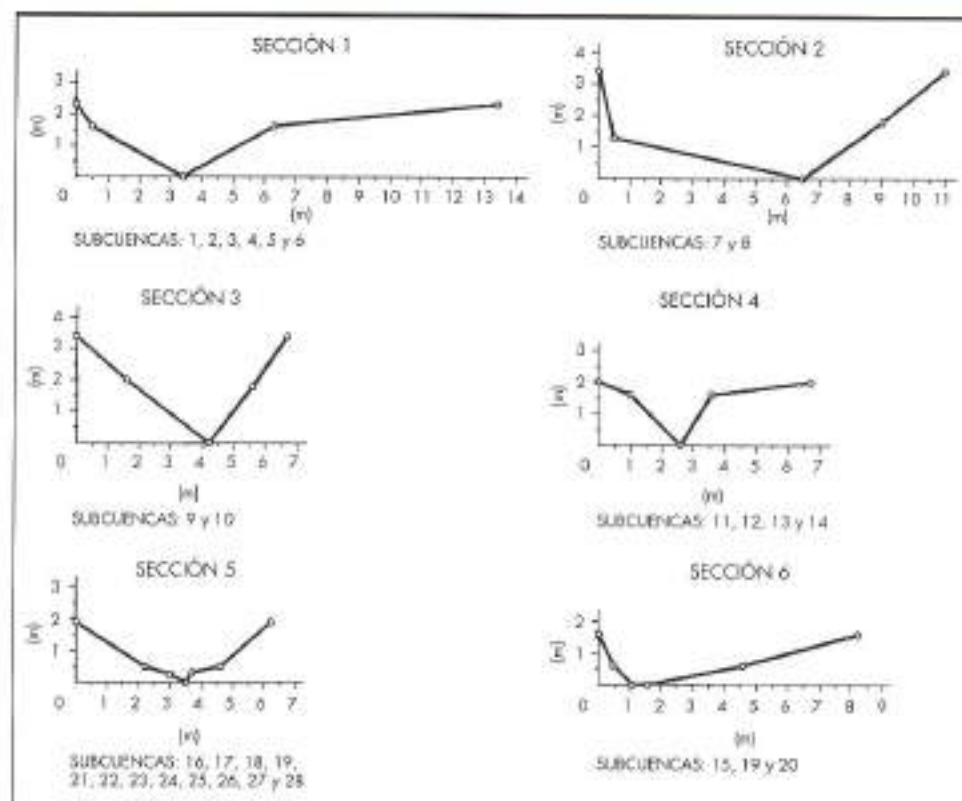


FIGURA 10. Secciones transversales tipo de los canales de la cuenca.

SUBCUENCA	ÁREA (ha)	DENSIDAD DE DRENAJE (m/ha)	PENDIENTE DE ARROYOS	PENDIENTE DE SUBCUENCAS	NÚMERO DE CURVA		
					CHA-I	CHA-II	CHA-III
SUB 1	4.813	56,51	0,254	0,401	40,0	60,0	78,0
SUB 2	8.090	60,32	0,246	0,267	42,5	62,5	80,0
SUB 3	8.210	57,85	0,200	0,679	49,1	68,4	84,1
SUB 4	9.390	47,28	0,320	0,378	40,0	60,0	78,0
SUB 5	14.200	49,44	0,192	0,391	43,9	63,9	81,1
SUB 6	2.970	104,38	0,323	0,634	48,7	68,6	83,9
SUB 7	12.002	46,08	0,239	0,886	51,9	70,7	85,5
SUB 8	14.060	38,12	0,504	0,470	32,3	51,7	71,3
SUB 9	18.950	21,42	0,305	0,663	44,4	64,2	81,1
SUB 10	10.820	29,02	0,223	0,623	46,5	66,0	82,3
SUB 11	19.520	27,59	0,274	0,290	31,5	50,7	70,5
SUB 12	7.440	84,10	0,256	0,428	35,4	55,4	74,3
SUB 13	21.270	32,50	0,234	0,482	36,3	56,3	75,0
SUB 14	7.170	83,40	0,435	0,688	55,0	73,4	87,0
SUB 15	3.628	98,40	0,182	0,631	54,6	73,0	86,8
SUB 16	20.616	39,19	0,408	0,396	37,5	57,5	75,5
SUB 17	3.097	110,43	0,295	0,427	42,5	62,5	80,0
SUB 18	4.340	67,97	0,193	0,450	55,7	74,0	87,4
SUB 19	1.970	157,86	0,257	0,468	54,6	73,0	86,8
SUB 20	9.585	36,95	0,318	0,370	57,1	75,1	88,1
SUB 21	7.636	66,46	0,177	0,274	31,7	50,9	70,7
SUB 22	7.045	112,49	0,240	0,342	39,5	59,5	77,6
SUB 23	4.616	72,88	0,223	0,514	52,6	71,3	85,8
SUB 24	14.663	48,56	0,274	0,424	41,2	61,2	79,0
SUB 25	4.902	63,40	0,225	0,362	46,9	66,6	83,0
SUB 26	3.614	51,19	0,211	0,449	50,5	69,6	84,7
SUB 27	3.190	96,23	0,322	0,475	52,5	71,2	85,7
SUB 28	25.417	42,34	0,170	0,363	55,3	73,6	87,0

TABLA 3. Características geomorfológicas de la cuenca del Arroyo Salado.

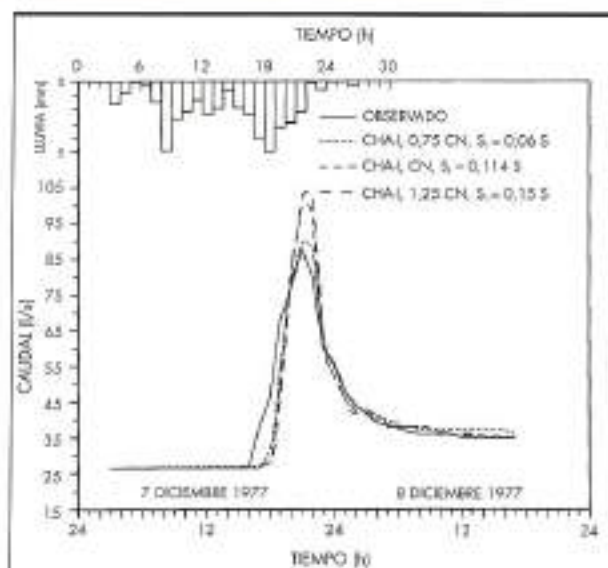


FIGURA 11. Hidrograma observado y calculado en la calibración.

cir el volumen de escorrentía registrado, V . De todos los hidrogramas así obtenidos se eligió el que mejor reproducía el valor real del caudal punta, Q_p , y el tiempo en el que se producía tal caudal, T_p , y más se ajustase a la forma del hidrograma. En la tabla 4 se indican los resultados de la calibración y en la figura 11 el hidrograma observado y el calculado.

De los resultados obtenidos se dedujo que los NC que mejor reproducían el hidrograma observado correspondían a valores inferiores en un 25% de los iniciales (tabla 3) y un valor de la sustracción inicial del 6 por ciento de la retención potencial máxima, $S_1 = 0,06 S$. Los valores de los números de curva calibrados correspondientes al 75 por ciento de los valores NC dados en la tabla 3 para la condición de humedad antecedente I (CHAI) no pueden utilizarse para ninguna otra relación S_1 distinta de la anterior, del mismo modo que los números de curva dados por el SCS de EEUU no pueden utilizarse para ninguna otra relación distinta a $S_1 = 0,2 S$, como Woodward y Cronshaw (1991) sugieren. Para usar otra relación de S_1 distinta, deberá realizarse una nueva calibración de los parámetros NC de la cuenca. El SCS muestra la dispersión de los valores de la relación de S_1 frente a S en donde $S_1 = 0,2 S$ solamente representa el valor medio para una gran número de cuencas.

4.2. VALIDACIÓN

La validación del modelo se llevó a cabo simulando diferentes hidrogramas con los parámetros previamente determina-

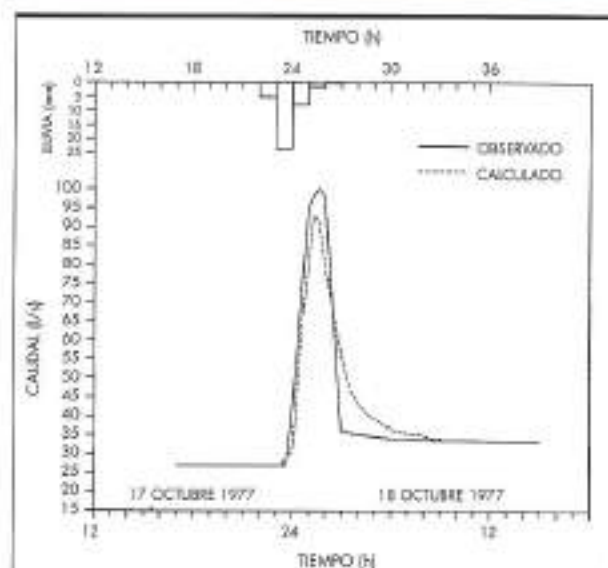


FIGURA 12. Hidrograma utilizado en la validación.

dos en la fase de calibración. El hidrograma elegido se produjo los días 17-18 de Octubre de 1977, con un volumen total de escorrentía observado de 842 m³ (figura 12). Con las mismas condiciones de números de curva y sustracción inicial obtenidas en la calibración se ajustó dicho volumen. El caudal punta observado fue de 0,1 m³/s muy próximo al calculado de 0,094 m³/s.

4.3. ANÁLISIS

Los resultados obtenidos muestran que el modelo, para las opciones elegidas y los hidrogramas estudiados, es poco sensible a parámetros estructurales como el intervalo de tiempo y a otros parámetros físicos como el coeficiente de rugosidad de Manning. La mayor sensibilidad se obtuvo con los números de curva y la sustracción inicial, ya que ambos determinan la cantidad de escorrentía que se produce. La cuenca elegida en el estudio se encuadra en las de montaña con fuertes pendientes que determinan la velocidad del flujo. Consecuentemente, el análisis se ha centrado en los mismos parámetros de la calibración. Como índice de sensibilidad se ha utilizado el valor de sensibilidad dado por Beven (1979).

$$S_F = \frac{Q - Q_A}{\frac{Q}{P - P_A}} \quad [6]$$

VALORES CARACTERÍSTICOS	HIDROGRAMA OBSERVADO	HIDROGRAMAS CALCULADOS CON LA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE I Y DISTINTOS NC		
		NC (%)	1,25-NC (%)	0,75-NC (%)
Q_p (m³/s)	0,088	0,100	0,104	0,090
t_p (h)	21,00	21,33	21,33	21,33
Error medio (%)	—	5,24	5,94	4,33

(*) Valores de NC dados en la tabla 3 para la CHAI

TABLA 4. Valores obtenidos en la calibración.

VALORES CARACTERÍSTICOS	HIDROGRAMA OBSERVADO	HIDROGRAMA CALCULADO
Q_p [m^3/s]	0,100	0,093
t_p [h]	2,00	1,42
Error medio (%)	—	6,09

TABLA 5. Valores obtenidos en la validación.

en donde Q representa el caudal punta calculado, P el valor del parámetro correspondiente cuya sensibilidad se estudia, y el subíndice A indica el valor que corresponde al mejor ajuste obtenido. De las diversas pruebas realizadas para la calibración, se obtuvo un valor medio de 0,4 para la sensibilidad al número de curva y de 0,6 para la sustracción inicial, lo que indica la importancia del conocimiento de valores reales de este último parámetro en la aplicación del método del número de curva.

4.4. SIMULACIÓN DE AVENIDAS

Una vez realizada la caracterización hidrológica de la cuenca y obtenidos los parámetros de infiltración del modelo, se procede, como aplicación, a la simulación de avenidas con el aguacero de 6 horas de duración para periodos de retorno de 25 y 100 años, cuyas intensidades medias, deducidas de las curvas IDF de la zona (ecuación [2] y figura 7), corresponden a 12,6 mm/h y 18,3 mm/h, equivalentes a 75,6 mm y 109,8 mm de precipitación respectivamente.

Hietogramas de diseño

Para cada periodo de retorno se han simulado 4 patrones de distribución temporal de cada uno de los aguaceros respectivos, tomando 30 minutos como unidad o intervalo de tiempo dentro de la duración del aguacero. El primer pa-

trón, basado en el método de los bloques alternantes (Chow y col., 1988), se deduce de la curva IDF especificando la altura de lluvia que ocurre en cada una de las duraciones de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, ..., 6,0 horas, como producto de la intensidad media por la duración respectiva. Hallando la diferencia entre los sucesivos valores de altura de precipitación obtenidos anteriormente, se deduce la precipitación en cada uno de los intervalos de 1/2 hora, que se reordenan en una secuencia temporal con el máximo volumen en el centro de la duración total de las 6 horas y disponiendo los restantes bloques en orden decreciente alternativamente a la derecha e izquierda del máximo central. Los otros 3 patrones se han deducido de las familias de curvas del segundo cuartil de las curvas de la figura 6, por pertenecer al mismo las lluvias más frecuentes de las registradas en la cuenca en el periodo 1968-88. Se han seleccionado tres hietogramas, el de la distribución temporal media del 50% y las dos extremas del 10% y 90%. El hietograma del 50% representa una distribución temporal tal que el 50% de los aguaceros registrados presentan, en cada uno de los intervalos de tiempo considerados valores de precipitación iguales o superiores. El hietograma del 10% representa la probabilidad de este tipo de distribución temporal para los aguaceros registrados dentro de este cuartil e indica que existe tal probabilidad, de que las alturas de precipitación de cada intervalo de tiempo sean igualadas o superadas. En consecuencia, representa una distribución temporal extrema. Análogamente, el hietograma del 90% indica la probabilidad de que las alturas de precipitación de los diversos intervalos mostradas por este aguacero sean igualadas o superadas por los aguaceros registrados en el mismo. En la tabla 6 se muestran las alturas de lluvia para cada uno de los 12 intervalos de tiempo considerados en la duración total de los aguaceros de diseño.

La probabilidad global de cada uno de los tres hietogramas seleccionados de las curvas de distribución temporal de

INTERVALOS DE TIEMPO (h)	MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNANTES		MÉTODO CURVAS DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL 2º CUARTIL					
	PERÍODO DE RETORNO		PERÍODO DE RETORNO					
	25 AÑOS	100 AÑOS	25 AÑOS			100 AÑOS		
			10%	50%	90%	10%	50%	90%
0,0 - 0,5	3,11	4,53	7,9	2,3	0,6	11,4	3,4	0,9
0,5 - 1,0	3,46	5,03	7,9	3,6	0,1	11,5	5,5	0,1
1,0 - 1,5	3,95	5,74	11,1	5,5	2,9	16,2	7,9	4,3
1,5 - 2,0	4,73	6,88	9,4	12,7	7,9	13,6	18,4	11,4
2,0 - 2,5	6,28	9,15	17,8	11,9	11,9	25,9	17,4	17,2
2,5 - 3,0	26,58	38,68	10,4	11,3	12,4	15,1	16,4	18,1
3,0 - 3,5	7,78	11,60	5,9	9,2	10,0	8,5	13,4	14,5
3,5 - 4,0	5,35	7,78	2,2	7,0	6,1	3,3	10,1	8,9
4,0 - 4,5	4,28	6,25	1,1	5,1	4,2	1,6	7,4	6,1
4,5 - 5,0	3,67	5,35	1,4	3,5	5,4	1,9	5,2	7,9
5,0 - 5,5	3,27	4,73	0,4	2,2	7,6	0,7	3,1	11,0
5,5 - 6,0	2,97	4,32	0,1	1,1	6,5	0,1	1,6	9,4

TABLA 6. Valores de la altura de precipitación (mm) de los hietogramas de los aguaceros de diseño.

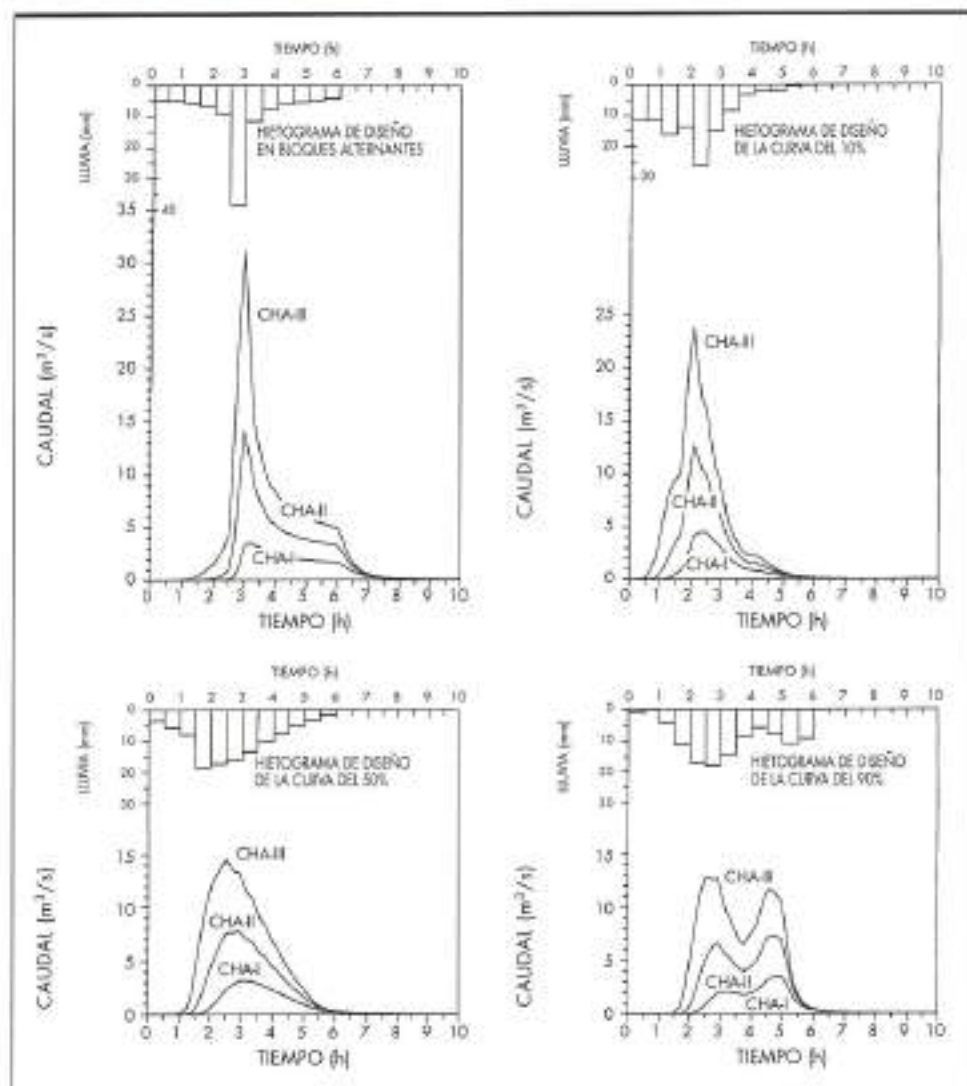


FIGURA 13. Hidrogramas obtenidos mediante el uso del modelo HEC-1.

la lluvia en Lanjarón puede obtenerse considerando el valor de la frecuencia (37%) con que se presentan los aguaceros del 2º cuartil, indicada en la tabla 1. Por consiguiente, la probabilidad global de ocurrencia del hietograma deducido de la curva del 10% será de $0,37 \times 0,10 = 0,037$, es decir del 3,7 por ciento. De manera análoga la probabilidad global del hietograma derivado de la curva del 50% será del 18,5 por ciento y del deducido de la curva del 90% será del 33,3 por ciento.

Hidrogramas de avenida resultantes

La aplicación del modelo HEC-1 con los hietogramas de diseño anteriores y diversas condiciones de humedad antecedente —CHA-I, CHA-II y CHA-III— donde la condición II representa la condición de referencia o condición media de la cuenca y las condiciones I y III, las condiciones *seca* y *húmeda* respectivamente.

Los valores de los NC para las CHA-II y CHA-III en cada subcuenca se muestran en la tabla 7, habiéndose deducido de los NC obtenidos en la fase de calibración correspondientes al 75 por ciento de los valores de los números de curva dados en la tabla 3 y con una relación $S_1 = 0,06 S$. Para su

deducción se utilizaron las expresiones dadas por Hawkins y col. (1985).

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281CN_{II}} \quad [6]$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 - 0,00573CN_{II}} \quad [7]$$

Del análisis de los resultados se desprende que el aguacero cuya distribución temporal se deriva de la curva del 10% es el que origina el mayor caudal punta y el menor tiempo en que ocurre la punta para cualquier período de retorno. En consecuencia representa la avenida más desfavorable para criterios de proyecto de estructuras hidráulicas. Los aguaceros deducidos por el método de los bloques alternantes originan hidrogramas de avenida muy similares a los calculados con los aguaceros deducidos de la curva del 50%. Por último, los aguaceros derivados de la curva del 90% presentan caudales punta algo inferiores a los obtenidos por los aguaceros de la curva del 50% y un mayor retraso en el tiempo de las puntas.

SUBCUENCA	CHA-I		CHA-II		CHA-III	
	NC	S _i (mm)	NC	S _i (mm)	NC	S _i (mm)
SUB 1	30,0	35,6	49,4	15,6	69,6	6,7
SUB 2	31,8	32,7	51,6	14,3	71,4	6,1
SUB 3	36,8	26,2	57,1	11,4	75,7	4,9
SUB 4	30,4	34,9	49,4	15,6	69,6	6,7
SUB 5	32,9	31,1	52,8	13,6	72,4	5,8
SUB 6	36,5	26,5	56,8	11,6	75,5	4,9
SUB 7	38,8	24,0	59,1	10,5	77,2	4,5
SUB 8	24,3	47,5	42,2	20,9	63,1	8,9
SUB 9	33,1	30,8	53,0	13,5	72,5	5,8
SUB 10	35,2	28,1	55,2	12,4	74,2	5,3
SUB 11	23,6	49,3	41,4	21,6	62,3	9,2
SUB 12	26,5	42,3	45,2	18,3	65,8	7,9
SUB 13	27,2	40,8	46,0	17,9	66,6	7,6
SUB 14	41,2	21,8	61,5	9,5	78,9	4,1
SUB 15	41,0	21,9	61,3	9,6	78,7	4,1
SUB 16	28,7	37,9	47,8	16,6	68,2	7,1
SUB 17	31,8	32,8	51,6	14,3	71,4	6,1
SUB 18	41,8	21,2	62,1	9,3	79,3	4,0
SUB 19	41,0	21,9	61,3	9,6	78,7	4,1
SUB 20	43,2	20,0	63,5	8,8	80,3	3,7
SUB 21	23,8	48,8	41,6	21,4	62,5	9,1
SUB 22	29,6	36,2	49,0	15,9	69,2	6,8
SUB 23	39,4	23,4	59,7	10,3	77,7	4,4
SUB 24	30,9	34,1	50,5	14,9	70,5	6,4
SUB 25	35,2	28,1	55,3	12,3	74,4	5,2
SUB 26	38,8	24,0	59,1	10,5	77,2	4,5
SUB 27	39,3	23,5	59,7	10,3	77,6	4,4
SUB 28	41,5	21,5	61,8	9,4	79,1	4,0

TABLA 7. Números de curva y sustracciones iniciales (mm) para las diversas condiciones de humedad antecedente considerados en la simulación de avenidas.

5. CONCLUSIONES

Se ha calibrado y validado el modelo HEC-1 en la cuenca del Arroyo Salado de Lanjarón con caudales registrados produciendo resultados aceptables. La utilización del modelo ha

permitido la caracterización de los procesos hidrológicos de la cuenca. El conocimiento de las variables que intervienen en tales procesos y la determinación de sus valores usuales ha permitido extrapolar conclusiones sobre el comporta-

VALORES CARACTERÍSTICOS	PERÍODO DE RETORNO 25 AÑOS											
	10%			50%			90%			BLOQUES ALTERNANTES		
	CHA			CHA			CHA			CHA		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Q_p (m ³ /s)	1,50	5,34	12,48	1,11	3,64	7,72	1,42	3,62	6,79	8,0	4,81	14,27
t_p (h)	3,00	2,66	2,50	4,17	3,50	3,00	6,00	5,83	3,50	4,17	3,17	3,00
y (mm)	4,9	13,8	29,1	4,9	13,8	29,1	4,9	13,8	29,1	4,9	13,8	28,6
VALORES CARACTERÍSTICOS	PERÍODO DE RETORNO 100 AÑOS											
	10%			50%			90%			BLOQUES ALTERNANTES		
	CHA			CHA			CHA			CHA		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Q_p (m ³ /s)	4,48	12,67	23,76	3,15	7,74	14,46	3,46	7,21	12,77	3,24	14,13	31,06
t_p (h)	3,00	2,50	2,50	3,67	3,50	2,83	5,83	5,67	3,0	3,17	3,00	3,00
y (mm)	12,1	29,0	53,4	12,1	29,0	53,4	12,1	29,0	53,4	12,1	29,1	53,6

TABLA 8. Valores característicos de los hidrogramas de avenida simulados.

miento de la cuenca bajo condiciones de lluvias extremas. En este sentido se han determinado los hidrogramas de avenida para los aguaceros de 25 y 100 años de período de retorno con diferentes patrones de distribución temporal. Para condiciones extremas se recomienda proyectar con los hidrogramas obtenidos con los aguaceros derivados de la curva del 10% y para condiciones media, diseño de estructuras de poca responsabilidad, es recomendable proyectar con los aguaceros de diseño derivados por el método de los bloques alternantes o de la curva del 50%. Los hidrogramas resultantes son de gran utilidad para el diseño más realista de estructuras hidráulicas en la cuenca.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación AGR 89-0653, *Caracterización hidrológica y erosiva de los sistemas de manejo del suelo en las tierras altas del SE español*, financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AYUSO, J.L.; A. MOLINA y A. ZAPATA, 1991. *Análisis de la distribución temporal de la lluvia en una cuenca pequeña de Sierra Nevada*. III Simposio sobre el agua en Andalucía, 1:85-101.
- AYUSO, J.L. y A. MOLINA, 1993. *Hietogramas adimensionales de diseño para la zona de Córdoba*. Ingeniería Civil 90: 139-149.
- BEDIENT, Ph.B. y W.C. HUBER, 1988. *Hydrology and floodplain analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- BEVEN, K., 1979. *A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapo-transpiration estimates*. Journal of Hydrology, 44: 169-190.
- BOUGHTON, W.C., 1989. *A review of the USDA SCS curve number method*. Australian Journal of Soil Research, 27: 511-523.
- CHOW, V.T., D.R. MAIDMENT y L.W. MAYS, 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- HAWKINS, R.H., A.T. HJELMFELT, Jr. y A.W. ZEVENBERGEN, 1985. *Runoff probability, storm depth and curve numbers*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 113: 330-340.
- HJELMFELT, A.T. Jr., 1991. *Investigation of curve number procedure*. Journal of Hydraulic Engineering, 117: 725-737.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1990. *Flood Hydrograph Package*. Users manual, US Army Corps of Engineers, Sacramento.
- NAVARRO, J.A., 1993. *Análisis del modelo de hidrogramas de escorrentía HEC-1. Aplicación a la cuenca del Arroyo Salado de Lanjarón*. Trabajo profesional fin de carrera. Universidad de Córdoba.
- SÁNCHEZ, S.T., 1990. *Aplicación del estudio de suelos a la dinámica de la cuenca del río Lanjarón. Relación suelos-morfología*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- SINGH, V.P., 1988. *Hydrologic systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, U.S.D.A., 1972. *National Engineering Handbook*. Section 4. Hydrology.
- WOODWARD, D.E. y R. CRONSHY, 1992. *Investigation of curve number procedure: Discussion*. Journal of Hydraulic Engineering, 118: 951-952.