



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
CARTAGENA**



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**

***INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS  
ESPECIALIDAD HIDROLOGÍA***

Proyecto Fin de Carrera

**ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS  
DE UN MÉTODO HIDROMETEOROLÓGICO  
PARA EL CÁLCULO DE AVENIDAS Y  
APLICACIÓN A UNA CUENCA MEDITERRÁNEA**

**TOMO I**

***M<sup>a</sup> INMACULADA LÓPEZ MIÑANO***

Dirigido por:

**D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ**

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

**Cartagena, junio de 2006**

# ÍNDICE

	<u>Páginas</u>
0. RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVO.....	15
3. FORMULA DE CÁLCULO.....	16
3.1. Máxima precipitación diaria.....	16
3.2. Leyes intensidad – duración.....	17
3.3. Tiempo de concentración.....	18
3.4. Coeficiente de escurrimiento.....	20
3.5. Coeficiente de uniformidad.....	24
3.6. Contraste empírico.....	26
3.7. Límites de aplicación.....	27
4. PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA.....	29
4.1. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.....	29
4.1.1. Estimación regional de cuantiles.....	30
4.1.2. Distribución espacial del valor medio como factor de escala local.....	34
4.1.3. Metodología de trabajo para la estimación de cuantiles de Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.....	34
4.2. Ajuste de una función de distribución a una estación pluviométrica cercana a la zona de estudio .....	37
5. TRÁNSITO DE AVENIDAS.....	39
5.1. Hidrograma adimensional SCS.....	39
5.2. Método de Muskingum.....	40
6. APLICACIÓN DEL MÉTODO A UNA CUENCA MEDITERRÁNEA.....	45
6.1. Introducción.....	45
6.2. Descripción geomorfológica de la zona de estudio.....	45
6.3. Precipitación máxima diaria.....	50
6.3.1. Método de Gumbel.....	50
6.3.2. Método de regionalización de máximas lluvias diarias en la España Peninsular.....	54
6.4. Caudal de referencia en el punto de desagüe.....	56
6.5. Análisis de los hidrogramas de entrada.....	72

6.6. Tránsito de los hidrogramas.....	82
6.7. Estudio de las diferentes variables y parámetros del método de tránsito.....	93
6.7.1. Estimación de un $K$ medio.....	93
6.7.2. Estimación de $K$ con un valor igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Témez.....	95
6.7.3. Estimación de $K$ con un valor igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Kirpich.....	98
6.7.4. Estimación de $K$ con un valor igual al tiempo e concentración dado por la fórmula de Giandotti.....	101
6.8. Comprobación y contraste con el modelo HEC-HMS.....	104
6.9. Comparación de resultados de caudales.....	124
7. CONCLUSIONES.....	131
BIBLIOGRAFÍA.....	133

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a D. Luis G. Castillo su excelente dirección de proyecto y su gran disposición a la hora de enseñar, tratando de mostrar sin intentar adoctrinar, dando el método para entender, analizar, razonar y cuestionar la información. Por hacerme pensar y dudar. Por haberme escuchado y ayudado. Por su sentido del humor, haciendo que todo este tiempo se convierta en un camino bonito para recordar.

A esas personas que han hecho posible que este proyecto se realizará con éxito. A Sara, que ha puesto su ordenador a mi disposición para poder obtener los resultados del HEC-HMS; a Diego, que me localizó y mandó los mapas que no encontraba; a José Antonio, por mantener en buen estado mi ordenador.

A mi padre, porque con sus gestos y a su manera, siempre ha tratado de ayudarme.

A mi madre, por ser una gran mujer y un ejemplo a seguir, por su fortaleza, por el empeño que pone en todo lo que desea, por haberme apoyado y animado siempre, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible.

A mis abuelos, por quererme como me quieren, por demostrármelo día a día, porque desde niña han sido y serán mi debilidad.

A mis hermanos Raquel y Goyo, porque han tratado de soportar mis malos días haciéndome reír y discutir, porque pase lo que pase siempre estaré con ellos.

A mis tíos y primos, porque mis preocupaciones siempre han sido sus preocupaciones.

A esos amigos que siempre han estado conmigo, porque cuando más los necesite me demostraron que podía contar con ellos

A todos esas personas que empezaron siendo compañeros y hoy día son amigos.

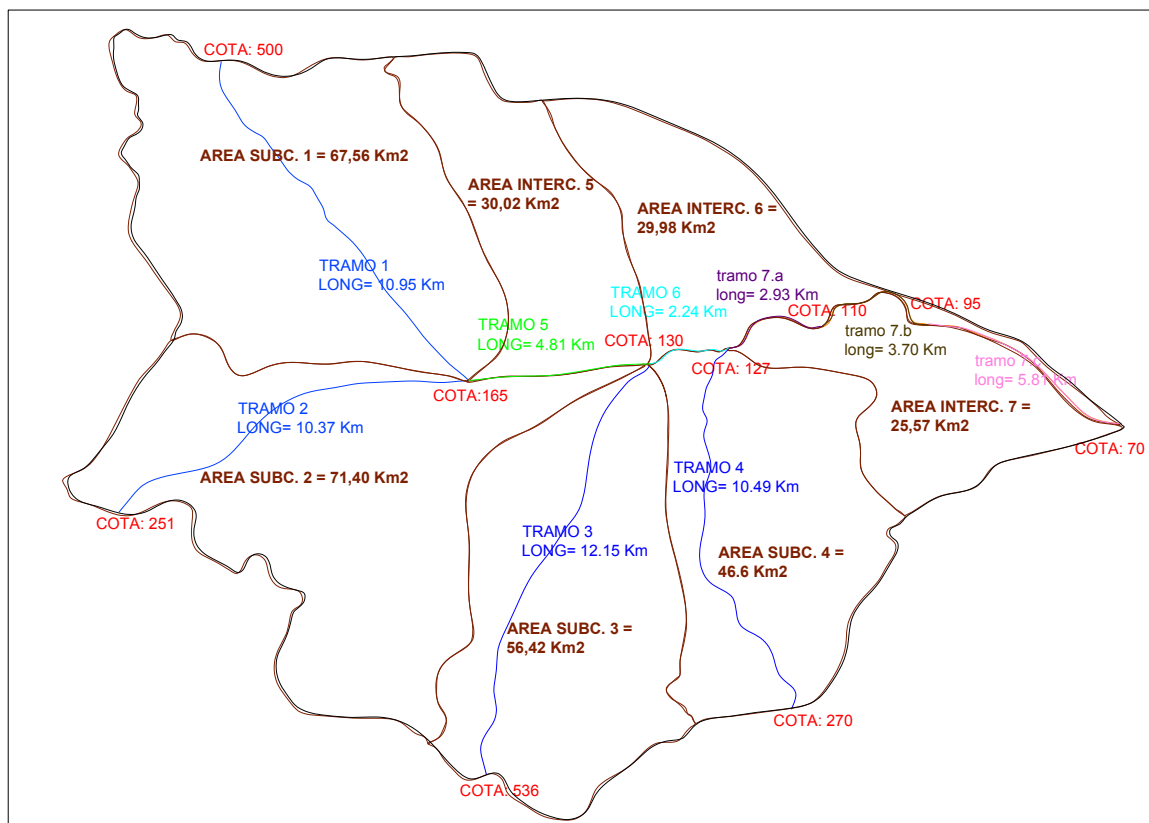
A esas personas que estos últimos meses han soportado y compartido mis continuos cambios de humor y mis preocupaciones por todo lo nuevo que ahora empieza, tranquilizándome y ayudándome constantemente.

Tal vez, estos años de universidad no han sido los mejores de mi vida, pero han estado llenos de obstáculos superados y metas cumplidas y todo porque siempre he tenido a mi alrededor gente que me ha apoyado y ayudado incondicionalmente. Gracias a todos ellos.

## 0. RESUMEN

En este estudio se revisa el método hidrometeorológico de la Instrucción de Drenaje 5.2- IC del ministerio de Fomento, las distintas posibilidades de obtener la precipitación máxima diaria y un análisis del grado de aplicabilidad, con respecto al tamaño de cuenca, para lo cual se ha realizado la subdivisión de la misma y se ha calculado los tránsitos de los hidrogramas correspondientes, con un método simple, verificando los resultados con el programa HEC-HMS (método de SCS y tránsito de Muskingum-Cunge)

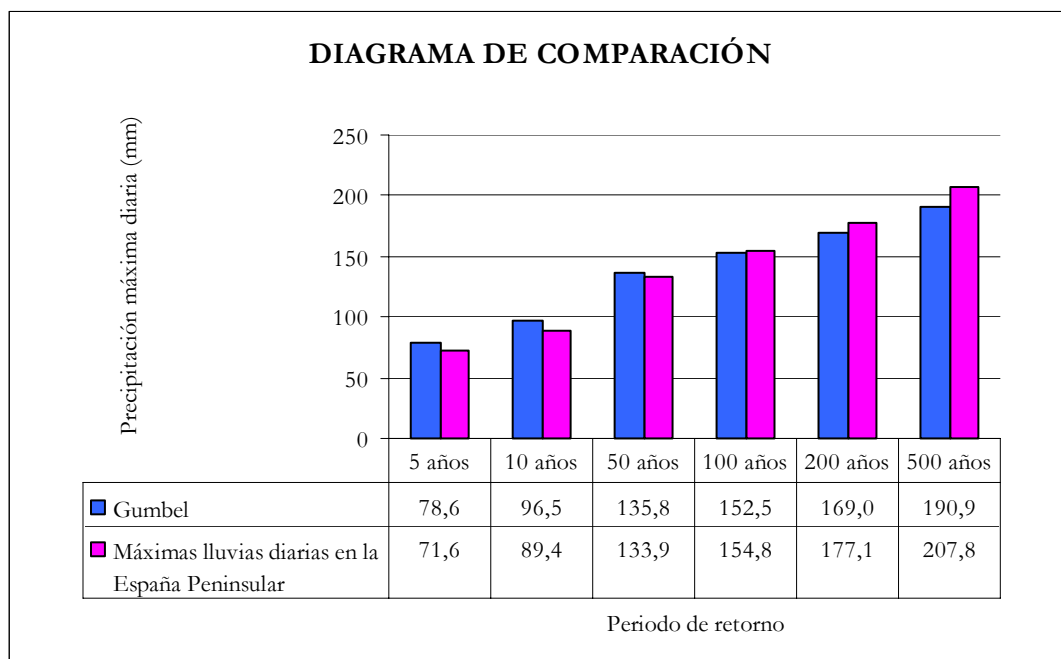
En primer lugar y referido a la cuenca en concreto se ha realizado la descripción geomorfológica de la zona, caracterizada por su suave pendiente y por poseer ramblas de cauces anchos y planos. A continuación se muestra en forma de esquema las subdivisiones estimadas para la zona:



La cuenca de estudio es una zona relativamente grande con una extensión total de 327,72 km<sup>2</sup>, que como se observa en la figura, ha sido subdividida en cuatro subcuencas y tres intercuenas; también distinguimos cuatro cauces, donde existe un cauce principal de 30,44

km de longitud y una pendiente del 1,41 %, el cual ha sido dividido en distintos tramos en los trabajos posteriores de este estudio.

Para la aplicación del método hidrometeorológico, es necesario obtener la precipitación máxima diaria para los distintos períodos de retorno de la zona, habiéndose aplicado dos procedimientos de cálculo, el método de Gumbel y la Instrucción de “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular”. A continuación se muestran los resultados obtenidos y un análisis gráfico para ambos procedimientos.



Podemos señalar que ambos procedimientos dan resultados muy similares, siendo los valores superiores en el método de Gumbel para períodos de retorno de hasta 50 años; sin embargo, la Instrucción da valores mayores para períodos de retorno superiores a los 50 años.

Una vez obtenidas las precipitaciones se ha aplicado el método racional descrito en la Instrucción de drenaje para la cuenca completa, obteniéndose un caudal de desagüe a la salida de la misma, pero previamente se requiere la estimación de los distintos parámetros que intervienen en el método, como es la obtención del umbral de escorrentía  $P_o$ , a partir de los mapas de usos de suelo y geológicos. Se han obtenido los siguientes valores para la cuenca completa y para las distintas subcuencas:

	ÁREA (km <sup>2</sup> )	P <sub>o</sub>
<b>CUENCA COMPLETA</b>	<b>327,73</b>	<b>20,88</b>
<b>SUBCUENCA 1</b>	67,60	18,61
<b>SUBCUENCA 2</b>	71,44	23,60
<b>SUBCUENCA 3</b>	56,45	15,43
<b>SUBCUENCA 4</b>	46,63	22,73
<b>INTERCUENCA 5</b>	30,04	21,21
<b>INTERCUENCA 6</b>	30,00	20,37
<b>INTERCUENCA 7</b>	25,59	21,19
<b>MEDIA</b>	<b>327,73</b>	<b>20,34</b>

A partir del  $P_o$  y aplicado el método racional para la cuenca completa, se obtiene los siguientes caudales de referencia a la salida de la misma, para los distintos periodos de retorno:

<b>CAUDAL DE REFERENCIA (m<sup>3</sup>/s)</b>	
<b>Período de Retorno</b>	<b>Cuenca Completa</b>
5 años	149,4
10 años	249,9
50 años	526,7
100 años	662,1
200 años	805,9
500 años	1007,1

De igual forma se ha aplicado el método racional a una cuenca desagregada, en cada una de las subcuencas e intercuencas, como si fueran unidades independientes (subcuencas sin tránsito). Para este caso se han obtenidos dos resultados, los obtenidos de la suma directa de los caudales pico (sin desfase temporal) y los resultantes de la suma de los hidrogramas de salida de cada subcuenca, una vez unificados los incrementos temporal de los mismos (con desfase temporal). A continuación se muestran los caudales pico de cada subcuenca y los resultados obtenidos a la salida de la cuenca completa por los dos estudios realizados

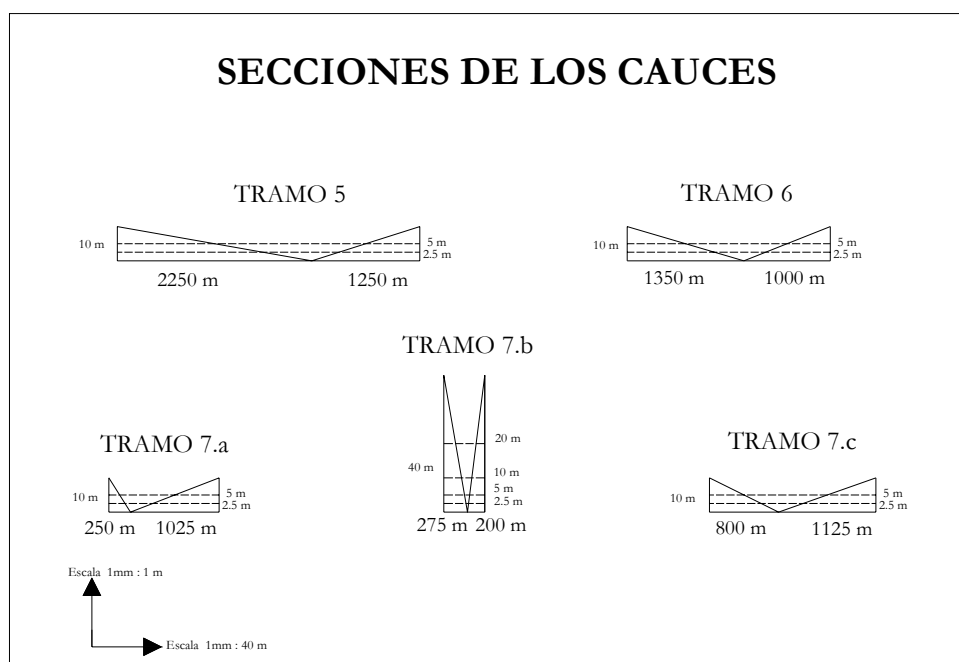
<b>CAUDALES PICO PARA CADA SUBCUENCA (m<sup>3</sup>/s)</b>							
Período de Retorno	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4	Intercuenca 5	Intercuenca 6	Intercuenca 7
5 años	67,6	37,8	70,8	32,7	28,2	26,5	32,0
10 años	108,1	64,8	108,7	55,0	46,2	43,1	52,4
50 años	216,5	140,0	207,5	116,6	95,5	87,8	108,0
100 años	268,5	177,2	254,0	146,9	119,4	109,5	135,0
200 años	323,3	216,7	302,4	179,0	144,7	132,4	163,6
500 años	399,2	272,3	368,8	224,0	179,9	164,2	203,4

Subcuenca sin tránsito ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
Período de Retorno	Sin desfase temporal	con desfase temporal
5 años	296	244
10 años	478	392
50 años	972	793
100 años	1211	986
200 años	1462	1189
500 años	1812	1472

Como se observa, los caudales de salida para una desagregación de la cuenca son valores superiores a los obtenidos para la cuenca completa, por lo que se estaría sobre estimando los caudales.

Una vez determinados los caudales de desagüe o caudales pico por período de retorno, se han obtenidos sus hidrogramas correspondientes, necesarios para la aplicación del método de tránsito. El cálculo de los hidrogramas se ha basado en el hidrograma adimensional del Soil Conservation Service.

Obtenidos los hidrogramas se ha llevado acabo su tránsito mediante el método de Muskingum. En primer lugar se ha realizado la estimación del tiempo de tránsito  $K$ , que al no disponer de los datos necesarios para su cálculo se ha obtenido a partir del tiempo de viaje de la onda en condiciones de flujo uniforme, conociendo el caudal de entrada en cada tramo y la sección transversal del mismo. A continuación se muestra las secciones determinadas para cada tramo de tránsito.





Una vez determinado el parámetro  $K$  para cada condición de tránsito, seguidamente se ha aplicado la formulación del Muskingum, donde los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM CON DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRÁNSITO EN CADA CASO</b>	
Período de Retorno	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
5 años	<b>178,2</b>
10 años	<b>294,9</b>
50 años	<b>654,3</b>
100 años	<b>771,1</b>
200 años	<b>937,3</b>
500 años	<b>1202,1</b>

Posteriormente se ha realizado un estudio con distintas estimaciones del tiempo de tránsito, para ver como las variaciones de este parámetro afecta a los resultados finales; una de estas estimaciones se ha basado en un cálculo medio de los valores que  $K$  ha obtenido en el caso anterior; con esta consideración y aplicando el método de Muskingum, se han obtenido los siguientes resultados:

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM CON UN TIEMPO DE TRÁNSITO MEDIO POR TRAMO</b>	
Período de Retorno	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
5 años	<b>186,1</b>
10 años	<b>306,6</b>
50 años	<b>607,2</b>
100 años	<b>761,2</b>
200 años	<b>918,4</b>
500 años	<b>1136,8</b>

Otras estimaciones del tiempo de tránsito se ha basado en igualar este parámetro  $K$  al tiempo de concentración dado por distintas fórmulas de cálculo (Témez, Kirpich, Giandotti). A continuación se muestran los resultados obtenidos en los siguientes cuadros:

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM CON UN TIEMPO DE TRÁNSITO IGUAL AL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE TEMEZ</b>	
Período de Retorno	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
5 años	<b>102,8</b>
10 años	<b>169,8</b>
50 años	<b>376,7</b>
100 años	<b>434,5</b>
200 años	<b>529,5</b>
500 años	<b>658,4</b>

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM CON UN TIEMPO DE TRÁNSITO IGUAL AL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE KIRPICH</b>	
Período de Retorno	Q (m <sup>3</sup> /s)
5 años	134,3
10 años	217,1
50 años	440,3
100 años	548,4
200 años	662,0
500 años	820,2

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM CON UN TIEMPO DE TRÁNSITO IGUAL AL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE GIANDOTTI</b>	
Período de Retorno	Q (m <sup>3</sup> /s)
5 años	77,8
10 años	126,7
50 años	259,8
100 años	327,3
200 años	402,8
500 años	499,4

Como método de contraste se ha utilizado el programa HEC-HMS de modelización hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Si se aplica el modelo a la cuenca completa (uso incorrecto del modelo), los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

<b>CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA HEC-HMS PARA LA CUENCA COMPLETA</b>	
Período de Retorno	Q (m <sup>3</sup> /s)
5 años	176
10 años	267
50 años	496
100 años	601
200 años	708
500 años	855

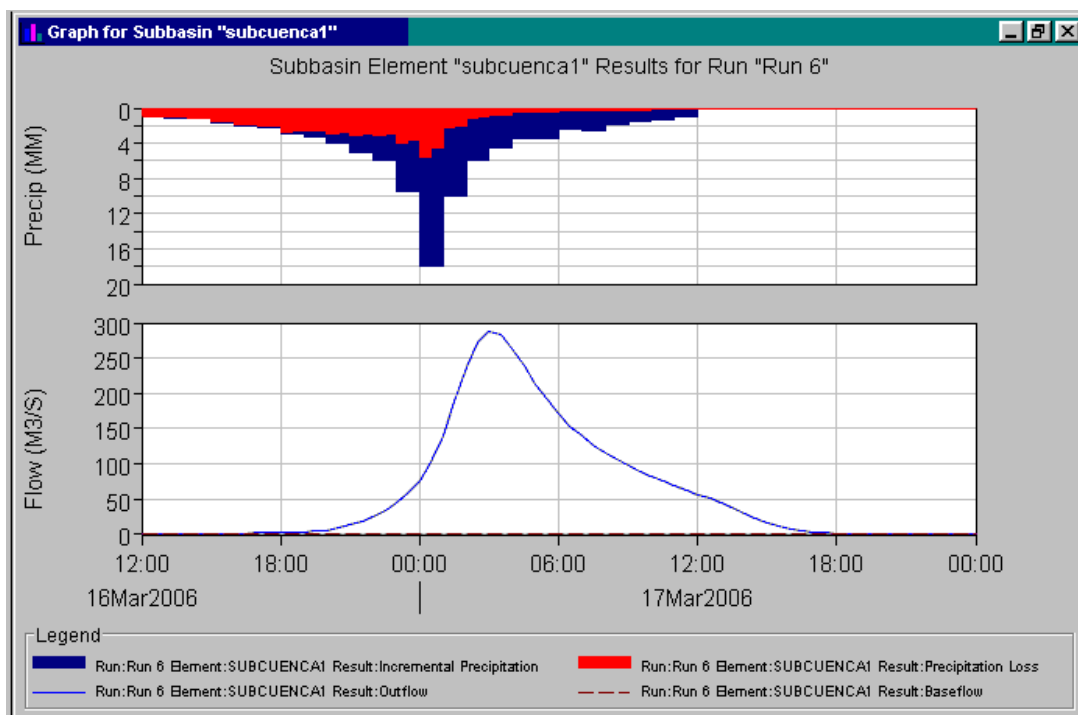
Finalmente, se ha aplicado el modelo como base de comparación de los anteriores resultados con la desagregación de la cuenca en subcuencas (forma correcta de aplicación del modelo). Los resultados para este estudio en los distintos períodos de retorno se muestran en el siguiente cuadro:

CAUDALES TRAS LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA HEC-HMS PARA LA DESAGREGACIÓN DE LA CUENCA	
Período de Retorno	Q (m <sup>3</sup> /s)
5 años	232,5
10 años	356,4
50 años	666,0
100 años	809,1
200 años	953,8
500 años	1151,1

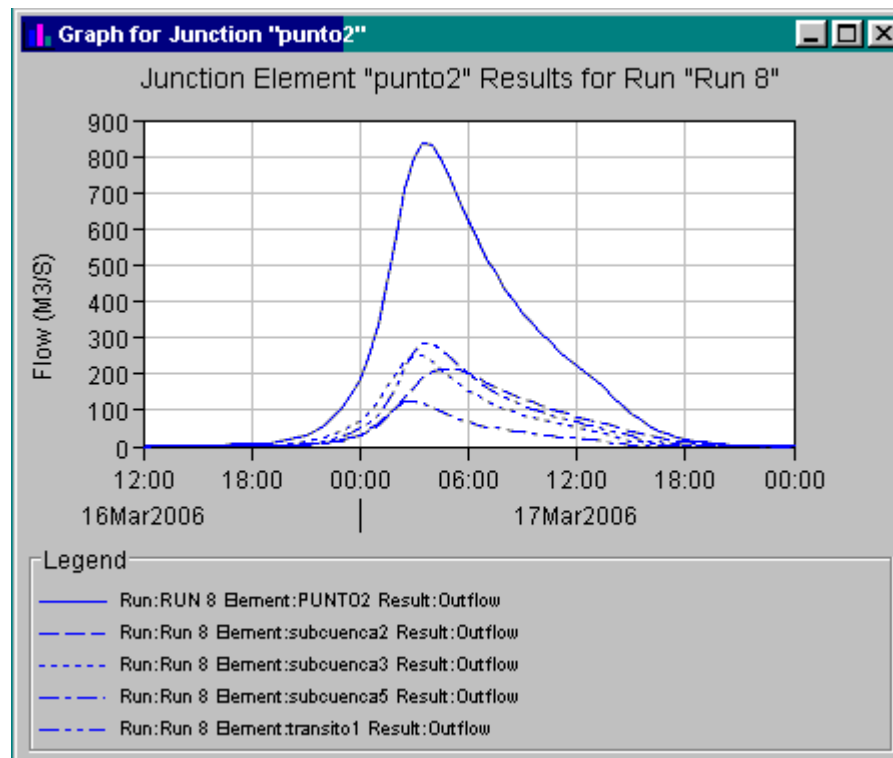
Se puede observar que los caudales obtenidos con el modelo desagregado en subcuencas del HEC-HMS son superiores a los obtenidos con el método de la Instrucción aplicado a cuenca completa. Sin embargo, son similares si se aplica el método de la Instrucción a la cuenca subdividida y con los tránsitos correspondientes.

De forma representativa, se muestra la información gráfica que el modelo proporciona para los distintos elementos que componen el esquema de tránsito, en este caso de estudio para el período de retorno de 500 años.

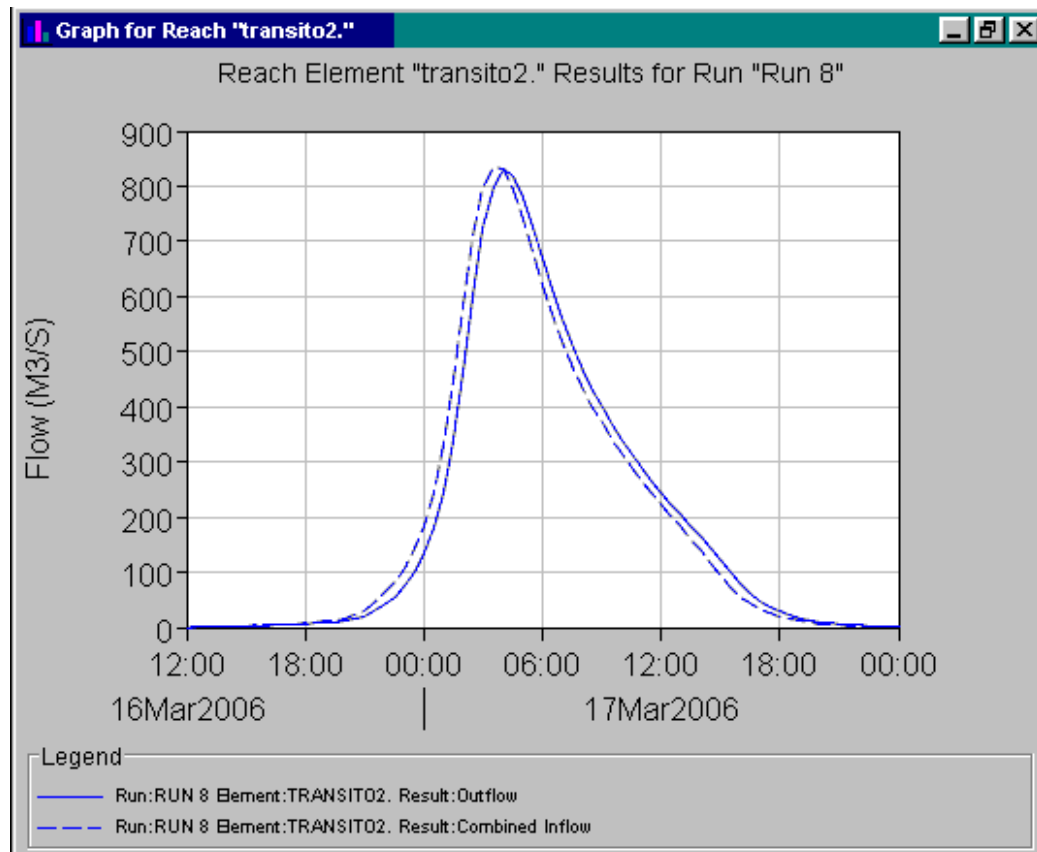
A continuación se observa el hietograma de precipitación para la subcuenca 1, las pérdidas de precipitación y el hidrograma de salida que en ella se genera.



En la siguiente figura se muestran los hidrogramas que confluyen en el punto 2, cuya suma genera el hidrograma que se transita a lo largo del tramo 2.

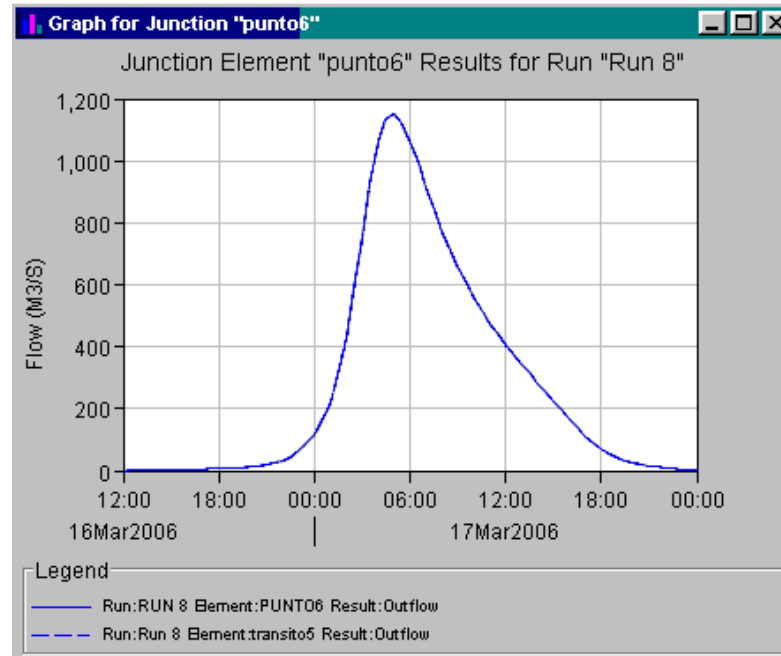


A continuación se muestran el efecto del tránsito a lo largo del tramo 2.



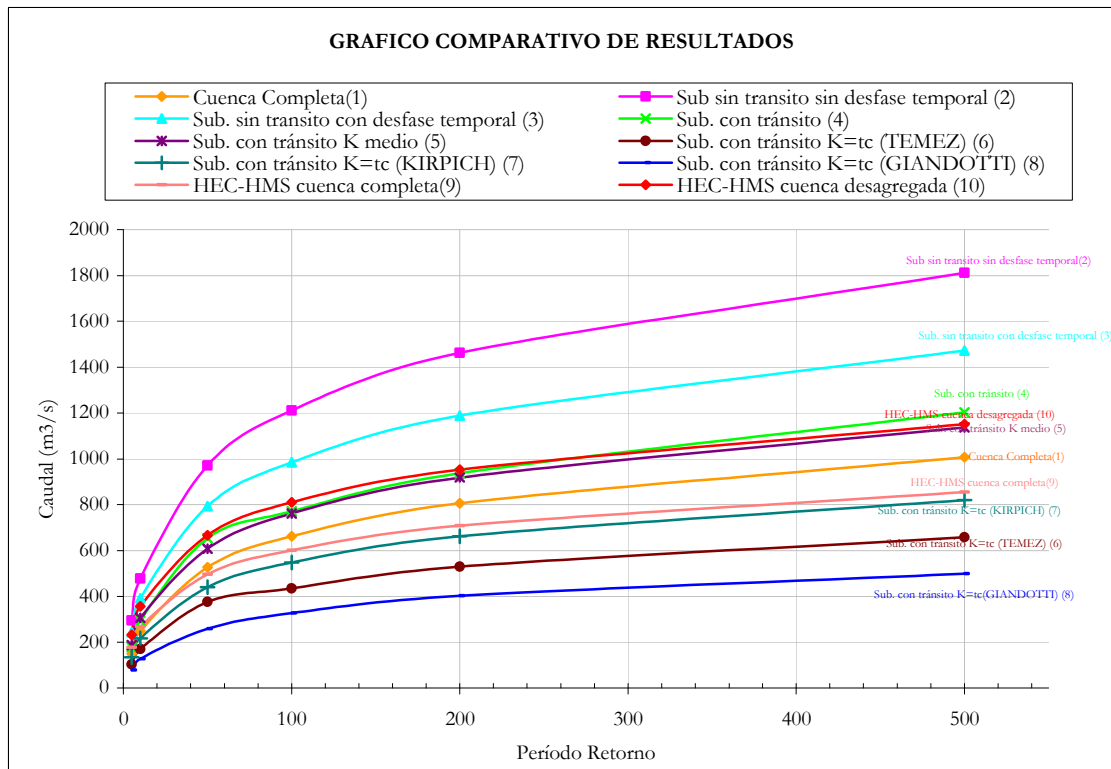
Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

En la siguiente figura aparece el hidrograma de salida para la cuenca, siendo el caudal pico para el período de retorno de 500 años de  $1151 \text{ m}^3/\text{s}$ .



En el cuadro y gráfico siguiente se muestran todos los resultados de este estudio.

RESUMEN GENERAL DE CAUDALES PARA LOS DISTINTOS MÉTODOS DE CÁLCULO ( $\text{m}^3/\text{s}$ )										
Período de retorno	cuenca completa	Sub. sin tránsito		Sub. con tránsito	Sub.con tránsito $K$ medio	Sub.con tránsito $K=t_c$ (TEMEZ)	Sub.con tránsito $K=t_c$ (KIRPICH)	Sub.con tránsito $K=t_c$ (GIANDOTTI)	HEC-HMS cuenca completa	HEC-HMS cuenca desagregada
		Sin desfase temporal	Con desfase temporal							
5	149	296	244	178	186	103	134	78	176	232
10	250	478	392	295	307	170	217	127	267	356
50	527	972	793	654	607	377	440	260	496	666
100	662	1211	986	771	761	435	548	327	601	809
200	806	1462	1189	937	918	530	662	403	708	954
500	1007	1812	1472	1202	1137	658	820	499	855	1151



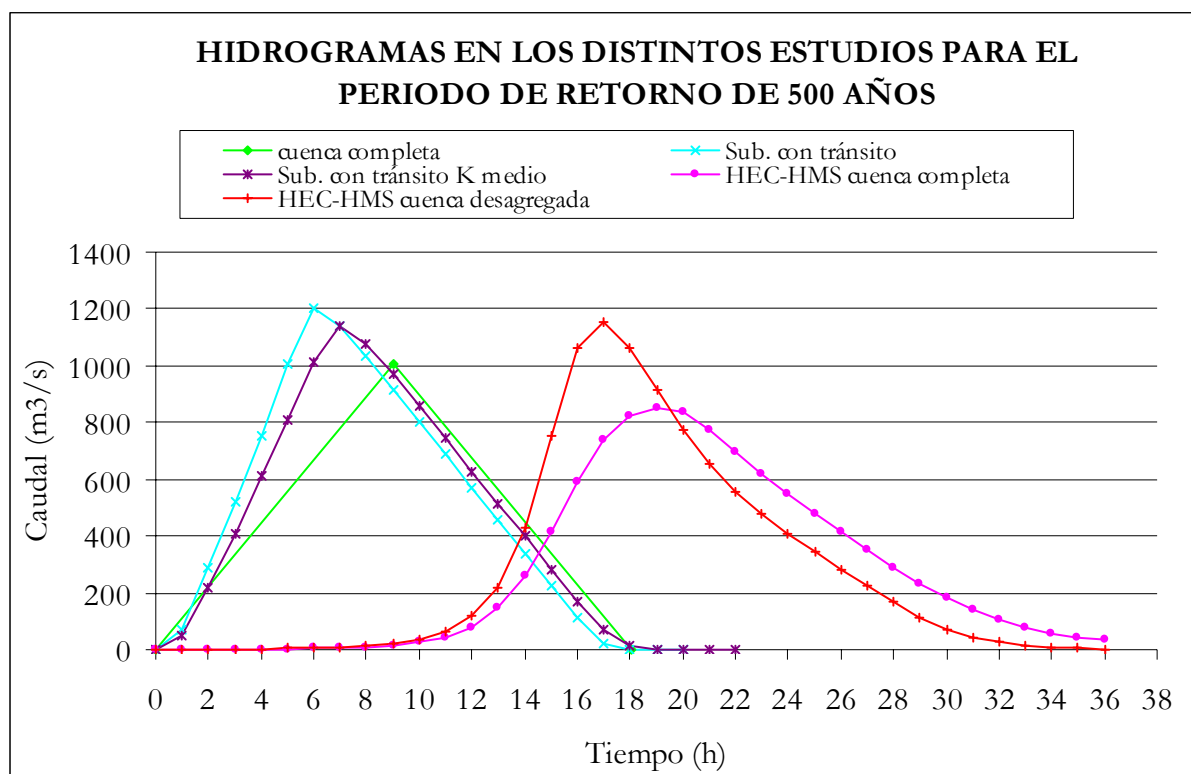
A continuación se analizan los distintos resultados obtenidos:

- Se puede concluir que la estimación del tiempo de tránsito igual al tiempo de concentración (curva 6,7 y 8), no sería muy válida ya que los caudales quedan por debajo de los obtenidos con el HEC-HMS (curva 10), e incluso por debajo de lo que la Instrucción dice para la cuenca completa (curva 1), subestimando los caudales de forma importante.
- La aplicación de la Instrucción para una desagregación de la cuenca sin tránsitos (curva 2 y 3), tampoco se consideraría un método válido, ya que los caudales obtenidos en este caso serían superiores a todos los métodos utilizados, sobreestimando los caudales de forma importante.
- En el caso del HEC-HMS para cuenca completa (curva 9), los resultados quedan también por debajo a los del HEC-HMS para la cuenca desagregada (curva 10), por lo que un buen uso del programa sería no aplicar a cuencas con superficie superior a los 100 km<sup>2</sup>. Para cuencas con superficie mayor se debe subdividir en subcuencas con superficie inferior a 100 km<sup>2</sup> y además realizar los tránsitos correspondientes.
- Los caudales de aplicar la Instrucción para la cuenca completa (curva 1), con los caudales del HEC-HMS para la cuenca desagregada (curva 10), se observa que los

resultados que proporciona la Instrucción son inferiores a los obtenidos con el programa, por lo que se puede concluir, que para cuencas con estas características la Instrucción se debe aplicar a superficies inferiores a los 250 km<sup>2</sup>; en caso contrario, se debe subdividir la cuenca en subcuencas con tamaño máximo a los 250 km<sup>2</sup> indicados y realizar el método de tránsito del Muskingum con  $K$  medio.

- Cuando se aplica un método de tránsito con una correcta determinación de  $K$  en cada caso (curva 4) o con una estimación de un  $K$  medio por tramo (curva 5), los resultados obtenidos son muy satisfactorios, ya que estos resultados quedarían muy próximos a los obtenidos por el HEC-HMS (curva 10).

A continuación se muestran los hidrogramas de salida para los períodos de retorno de 500 años de los estudios más destacados.



Como se observa los resultados con el HEC-HMS (cuenca completa y desagregada) se encuentran desplazados hacia la derecha en un tiempo de unas 10 horas debido a que se tiene en cuenta la distribución temporal de la precipitación a través del hietograma de precipitación de cálculo.

Sin embargo, los tiempos de los caudales punta de todos los métodos de cálculo son del orden del tiempo de concentración de la cuenca ( $t_c \approx 9 \text{ horas}$ ).

En el caso de los métodos con el HEC-HMS, en las primeras 10 horas de los hidrogramas de salida, los caudales son muy pequeños (inferiores a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Por último se señala las consideraciones más importantes de este estudio y se sugiere posibles puntos de mejora:

- Los límites de aplicación que considera la instrucción para cuencas con tiempos de concentración del orden de  $0,25 \text{ h} \leq t_c \leq 24 \text{ h}$  o áreas  $A \leq 3000 \text{ km}^2$ , son límites excesivamente grandes ya que se estaría subestimando caudales, recomendando que para cuencas superiores a los  $250 \text{ km}^2$  sería conveniente hacer subdivisiones en subcuencas y aplicar algún método de tránsito.
- El método de tránsito de Muskingum da resultados buenos con valores en su parámetro  $K$  obtenidos en función de condiciones de flujo uniforme.
- En relación a la Instrucción sería conveniente mejorar la estimación del umbral de escorrentía  $P_o$ , unificando las clasificaciones que ésta hace de los distintos tipos de cultivos y suelos, con los métodos de consulta de los que se disponen; es decir, los mapas de cultivos y aprovechamientos y los mapas geológicos.



## 1. INTRODUCCIÓN

El método racional estructura de forma sencilla y adecuada la influencia que en el proceso de cálculo de los caudales de crecida tienen los factores que esencialmente lo condicionan. Sus parámetros tienen un claro sentido físico que favorece el control de los cálculos y además son susceptibles de estudios regionales, lo cual facilita su inmediata aplicación a los casos concretos.

A pesar de todo ello, las versiones tradicionales del método racional conducen a resultados poco satisfactorios que en general sobreestiman la ley de frecuencia de caudales, especialmente en el rango de bajos y medios períodos de retorno.

Estas consideraciones han motivado a la Dirección General de Carreteras de España a promover los estudios oportunos para lograr un metodología que conservando las virtudes de la fórmula racional corrigiera sus deficiencias y diera lugar a unos resultados más acordes con la realidad. Fruto de estos estudios es la Instrucción de Drenaje 5.2-IC del Ministerio de Fomento (antiguo Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo).

El método hidrometeorológico que recoge la Instrucción de Drenaje Superficial, tiene como objeto el facilitar normas y recomendaciones para proyectar, construir y conservar adecuadamente los elementos del drenaje superficial de una carretera, aunque su uso puede ser generalizado a otros campos de la ingeniería civil. Principalmente trata de obtener a partir de las precipitaciones de una zona los caudales de referencia que se producen a la salida de dicha zona para cada período de retorno.

El método de estimación de los caudales asociados a distintos períodos de retorno depende del tamaño y naturaleza de la cuenca aportante.

Para cuencas pequeñas son apropiados los métodos hidrometeorológicos contenidos en la instrucción, basados en la aplicación de una intensidad media de precipitación a la superficie de la cuenca, a través de una estimación de su escorrentía. Ello equivale a admitir que la única componente de esa precipitación que interviene en la generación de caudales máximos es la que escurre superficialmente. En las cuencas grandes estos métodos pierden precisión y, por tanto la estimación de los caudales es menos correcta; pero, por otra parte en estas cuencas suele disponerse de información directa sobre niveles o caudales de avenidas. La frontera entre cuencas grandes y pequeñas, a efectos de la instrucción, corresponde aproximadamente

a un tiempo de concentración igual a seis horas; aunque el método permite aplicar aun rango de tiempo de concentración  $0,25 \leq t_c \leq 24 h$ .

La naturaleza de la cuenca aportante influye en los métodos hidrometeorológicos, en función del tipo de recorrido del agua; es decir de tipo difuso, sobre el terreno (plataforma de carretera y márgenes que a ella viertan) o de tipo canalizado o cauce. Especialmente en zona urbana, representa una singularidad la presencia de sumideros que desagüen a una red de canalización y que absorban una parte de la esorrentía. También representan casos especiales la presencia de lagos, embalses y planas inundables, que laminen o desvíen la esorrentía. Se podrán, asimismo, tener en cuenta aportaciones procedentes del deshielo de la nieve: salvo casos excepcionales, su contribución no se considerará superior al 10 por 100.

## **2. OBJETIVO**

El objetivo de este estudio puede englobarse en tres puntos como se muestra a continuación:

1. Revisión del método hidrometeorológico de la Instrucción 5.2-IC del Ministerio de Fomento, para el cálculo de avenidas.
2. Caracterización de las principales variables y parámetros del método y la determinación del grado de importancia en los resultados esperados.
3. Aplicación del método a una cuenca mediterránea, evaluando principalmente la influencia del tránsito de avenidas.
4. Comprobación y contrastación del método por medio de la aplicación del modelo del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos HEC-HMS.

### 3. FÓRMULA DE CÁLCULO

Se conserva la expresión tradicional incorporándole únicamente el factor  $K$ , denominado de uniformidad.

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,6} \times K \quad (1)$$

siendo:

$Q$  (m<sup>3</sup>/s) = Caudal punta correspondiente a un período de retorno dado.

$I$  (mm/h) = Máxima intensidad media en el intervalo de duración  $t_c$ , para el mismo período de retorno.

$A$  (km<sup>2</sup>) = Superficie de la cuenca.

$C$  = Coeficiente de escorrentía.

$K$  = coeficiente de uniformidad

#### 3.1. Máxima precipitación diaria

Tanto para el cálculo de la intensidad  $I$  como el coeficiente de escorrentía  $C$  de la fórmula 1, se necesita conocer el valor de la máxima precipitación diaria  $P_d$  (mm) correspondiente al período de retorno de cálculo.

En principio la estimación se debería hacer a partir de los planos de isoyetas de máximas precipitaciones diarias (isomáximas) trazadas de acuerdo con valores de las lluvias puntuales de un mismo período de retorno en las diversas estaciones pluviométricas y cuya utilización se indicaran mas adelante.

El valor medio areal en una cuenca así deducido debe afectarse de un factor reductor función de su área según la expresión

$$K_A = 1 \quad \text{para } A < 1 \text{ km}^2$$
$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15} \quad \text{para } 1 \leq A \leq 3000 \text{ km}^2 \quad (2)$$

siendo

$K_A$  = Factor reductor de la lluvia diaria

$\log A$  = Logaritmo decimal de la superficie  $A$  en  $\text{km}^2$

La aplicación de ese factor se justifica por la no simultaneidad de las precipitaciones de un mismo período de retorno en todos los puntos de la cuenca y ha sido deducida a partir de los valores empíricos obtenidos en cuencas de diverso tamaño y localización donde se ha determinado la lluvia media areal del día mas desfavorable en cada uno de los años con datos de registro. Posteriormente el método ha sido comparado con la ley de frecuencia obtenida a partir de esos valores, con otra deducida de las isomáximas de precipitación.

### 3.2. Leyes intensidad-duración

La aplicación del método es compatible con el empleo de cualquier curva de intensidad – duración, si bien para su determinación se utiliza la fórmula 3, donde en el caso concreto de España la Dirección General de Carreteras facilita un mapa (ver figura 1) con la variación espacial del parámetro  $I_1/I_d$ .

$$I_t = \frac{P_d}{24} \times \left( \frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}} \quad (3)$$

siendo:

$I_d$  (mm/h): la intensidad media diaria de precipitación correspondiente al período de retorno considerado. Es igual a  $P_d/24$ .

$P_d$  (mm): la precipitación total diaria correspondiente ha dicho período de retorno.

$I_1$  (mm/h): la intensidad horaria de precipitación correspondiente a dicho período de retorno. El valor de la razón se podrá tomar de la figura 1.

$t$  (h): duración del intervalo al que se refiere  $I$ , que se tomará igual al tiempo de concentración. ( $t_c$ )



Figura 1. Mapa de isótopos  $I_1/I_a$  regionalizados en el territorio español.

### 3.3. Tiempo de concentración

En el desarrollo del método se han realizado un análisis crítico de diversas fórmulas. El principal problema era dilucidar el verdadero significado del tiempo que definen y si ese tiempo es el adecuado para utilizarlo en los cálculos de la fórmula racional a través de la curva intensidad – duración.

Las principales conclusiones prácticas a la que han llegado son:

- La intensidad de la fórmula racional debe referirse a un intervalo de duración igual al tiempo de concentración  $t_c$ , entendiendo por tal el necesario para que salgan de la cuenca las gotas de lluvia hidrológicamente más alejadas. Dicho

tiempo es asimilable al transcurrido en un aguacero unitario desde el final de la lluvia hasta el final del correspondiente hidrograma supuesto triangular.

- La fórmula californiana (Kirpich) figura en los textos como representativa del tiempo de concentración. Ello quizá pueda admitirse en algunas cuencas urbanas, pero en las naturales supone una notable infravaloración de ese concepto y más parece adecuarse al tiempo de demora  $T_g$  que separa los centros de gravedad del hietograma y del hidrograma superficial, cuya relación con el tiempo de concentración es del orden del 45%.
- La fórmula de U.S. Corps of Engineers es la más satisfactoria de las analizadas (Kirpich, Ven Te Chow, Giandotti) y define el tiempo mediano que transcurre desde el origen del hidrograma hasta el momento en que se ha desaguado la mitad de su volumen.
- La simplificación y adaptación de la fórmula del U.S. Corps of Engineers al concepto de tiempo de concentración antes mencionado conduce a la fórmula 4 finalmente propuesta.

$$t_c = 0,3 \times \left[ \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \right] \quad (4)$$

siendo:

$L$  (km): la longitud del cauce principal.

$J$ (m/m): su pendiente media.

- La aceptación de esta fórmula supone el empleo de tiempos de concentración del orden de dos veces los tradicionales de Kirpich o Giandotti y ello repercute sensiblemente en los cálculos, sobre todo en cuencas pequeñas.

### 3.4. Coeficiente de esorrentía

El coeficiente de esorrentía se determina mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{\left[ \left( \frac{P_d}{P_o} \right) - 1 \right] \times \left[ \left( \frac{P_d}{P_o} \right) + 23 \right]}{\left[ \left( \frac{P_d}{P_o} \right) + 11 \right]^2} \quad \text{para } P_d > P_o \quad (5)$$
$$C = 0 \quad \text{para } P_d \leq P_o$$

donde:

$P_d$ : es la precipitación total diaria correspondiente a dicho período de retorno.

$P_o$ : es el umbral de esorrentía, se podrá obtener del cuadro 1, multiplicando los valores en ella contenidos por el coeficiente corrector de la figura 2. Este coeficiente refleja la variación regional de la humedad habitual en el suelo al comienzo de aguaceros significativos, e incluye una mayoración (del orden del 100 por 100) para evitar sobre valoraciones del caudal de referencia a causa de ciertas simplificaciones del tratamiento estadístico del método hidrometeorológico, el cual ha sido contrastado en distintos ambientes de la geografía española. Para el uso del cuadro 1 los suelos se clasifican en los grupos del cuadro 2, en cuya definición interviene la textura (figura 3).



Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características Hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R/N	47	25	16	13
Praderas	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Buena	*	*	22	14
		Muy buena	*	*	25	16
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥ 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
	< 3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy espesa	*	65	43	33
NOTAS						
1. N: Denota cultivo según las curvas de nivel. R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente.						
2. *: Denota que esa parte de cuenca debe considerarse inexistente a efectos de cálculo de caudales de avenida						
3. Las zonas abancaladas se incluirán entre las de pendiente menor del 3 %						

Cuadro 1. Estimación inicial del umbral de escorrentía  $P_o$  (mm).



Figura 2. Coeficiente corrector para el umbral de escorrentía  $P_o$ .

GRUPO	INFILTRACIÓN (cuando están muy húmedas)	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenosa Arenosa-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franco-arcillosa- arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo- limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Nota: Los terrenos con nivel freático alto se incluirán en el Grupo D

Cuadro 2. Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía.

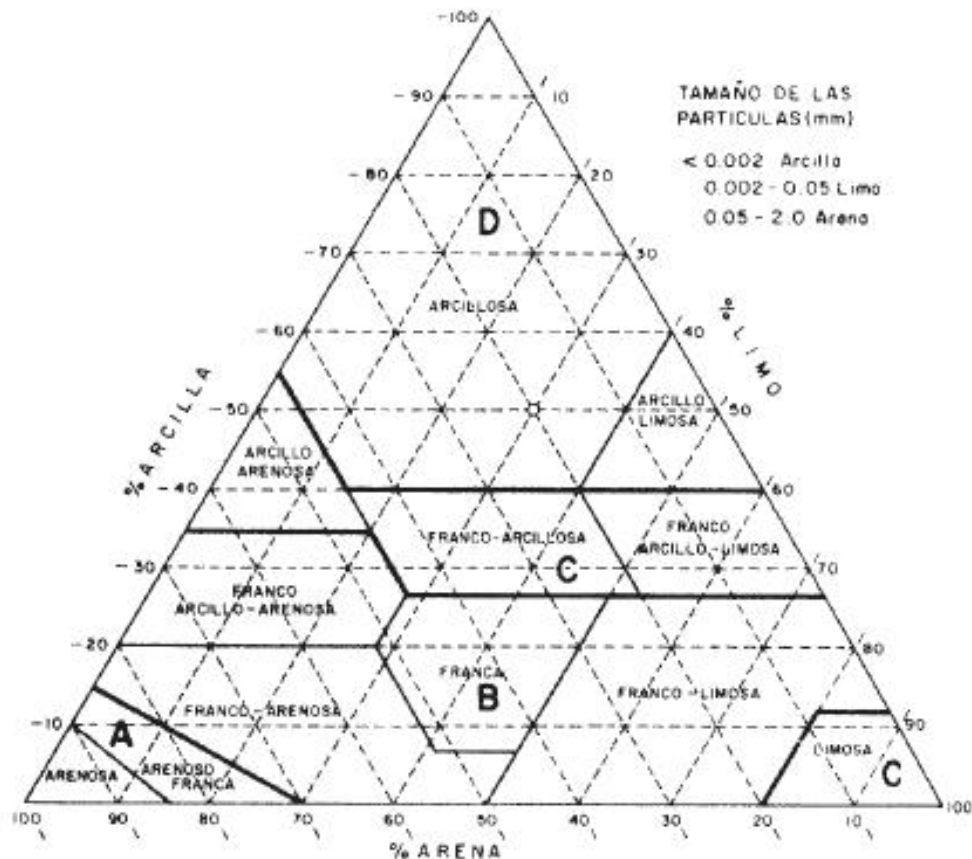


Figura 3. Diagrama triangular para la determinación de la textura.

El parámetro  $Po$  define el umbral de precipitación a partir del cual se inicia la esorrentía, y es función del complejo suelo-vegetación de la cuenca según el cuadro 1. Para una misma cuenca el valor de  $Po$  varía de unas fechas a otras en función de la humedad inicial del suelo. En los estudios de carácter estadístico y no determinísticos, como es el caso de las leyes de frecuencia obtenidas por el método racional, el valor del  $Po$  del cuadro deberá afectarse en cada región de un factor acorde con las condiciones habituales de humedad del suelo en las épocas de fuertes aguaceros. Como se puede observar en la figura 2 de la regionalización del factor corrector del  $Po$  este varía entre valores próximos a 1 en la zona húmeda del Norte de España y valores superiores a 3 en la zona sureste del mediterráneo.

Sin embargo, la práctica común en esta última zona es aplicar factores de corrección entre 1.5 y 2 apoyándose en el contraste empírico en cuencas aforadas. Los valores de  $Po$  a utilizar en el cálculo de caudales no son muy diferentes en las regiones húmedas y secas, lo cual se explica por los efectos contrapuestos que tiene la humedad del suelo y la vegetación. En

relación con el de las zonas áridas, el  $Po$  de las húmedas debería ser menor en razón al contenido de agua en el suelo, pero mayor a causa de la vegetación más abundante. En todo caso, el rango de valores más frecuente es:

$$24 \leq Po \leq 35 \text{ mm}$$

### 3.5. Coeficiente de uniformidad

Al ir aumentando el tamaño de la cuenca, algunas de las hipótesis implícitas en la formulación del método racional dejan de cumplirse y ello se acusa en los resultados de cálculo que deben ser corregidos. Uno de los efectos más importantes a corregir es el relativo al supuesto reparto uniforme de la esorrentía dentro del intervalo de cálculo de duración  $t_c$ .

El coeficiente de uniformidad  $K$  varía de un aguacero a otro, pero su valor medio en una cuenca concreta depende principalmente del valor de su tiempo de concentración, y de forma tan acusada que a efectos prácticos puede despreciarse la influencia de las restantes variables, tales como el régimen de precipitaciones, etc.

Su valor puede estimarse de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14} \quad (6)$$

La ley y las afirmaciones antes mencionadas están basadas en los contrastes realizados en diferentes cursos de agua dotados de estaciones de aforo como se muestra en el cuadro y figura adjunta. La ley está también en buen acuerdo con las conclusiones que se pueden deducir de algunos análisis teóricos desarrollados con el hidrograma unitario.

PUNTO N°	ESTACIÓN DE AFOROS	A <sub>2</sub> (km <sup>2</sup> )	t <sub>c</sub> (h)	K	P <sub>o</sub>
1	R. OYARZUN EN OYARZUN	38	3,4	1,25	35
2	R. RUECAS EN CAÑAMERO	42	3,1	1,27	30
3	R. UBAGUA EN MUEZ	55	3,1	1,25	27
4	R. JAUTO EN ALFAIX	68	7,0	1,45	46
5	R. GUADALMEDINA EN Pº. AGUJERO	153	11,0	1,70	25
6	R. SOR EN RIBERAS DEL SOR	169	12,3	1,52	35
7	R. CABE EN PTE. RIVAS ALTAS	353	7,4	1,55	30
8	R. PAS EN PTE. VIESGO	357	9,3	1,54	27
9	R. GUATEN EN VILLASECA	430	15,0	1,68	30
10	R. BURBIA EN TORAL DE LOS VADOS	492	10,0	1,56	24
11	R. CABRERA EN PTE. DOMINDO FLORES	560	15,8	1,73	24
12	R. ORIA EN ANDOAIN	755	13,2	1,64	20
13	R. MIÑO EN LUGO	2.303	21,8	1,70	30
14	R. TAJO EN TRILLO	3.253	34,0	1,70	27
15	R. LLOBREGAT EN CASTELLVELL	3.293	21,7	1,77	35
Valores experimentales					

Cuadro 3.

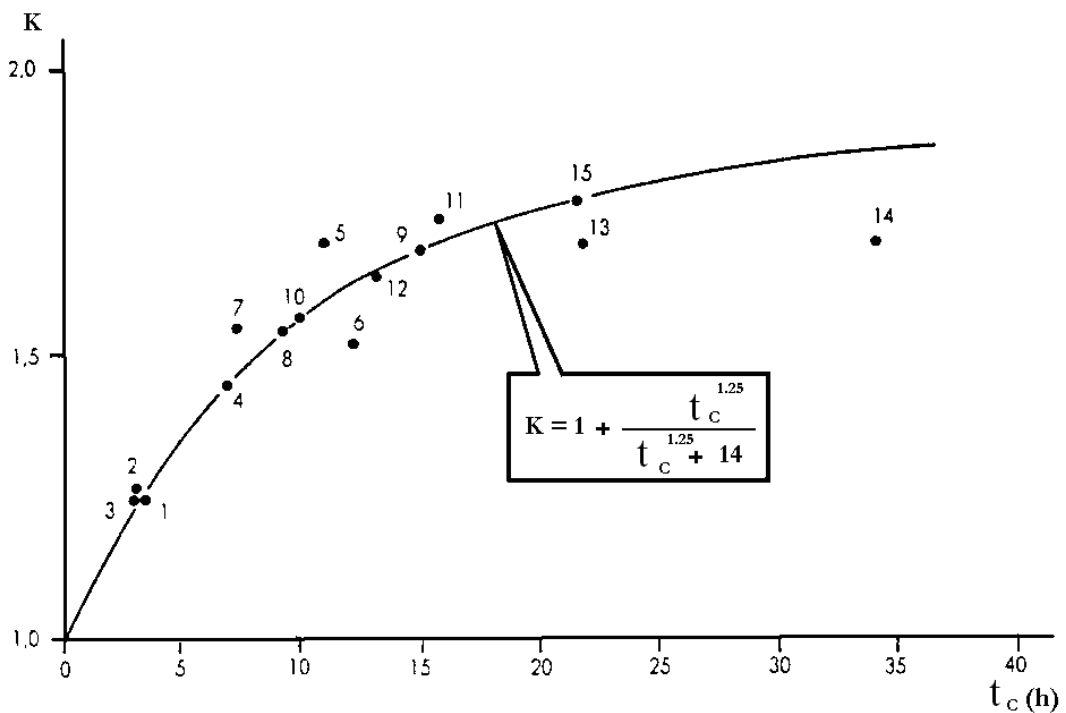


Figura 4.

### 3.6. Contraste empírico

Como ejemplo de los contrastes empíricos realizados, las figuras 5 y 6 muestran en dos estaciones de aforo las leyes de frecuencia estimadas con este método en relación con los puntos experimentales correspondientes a los máximos caudales anuales observados en el período de registro.

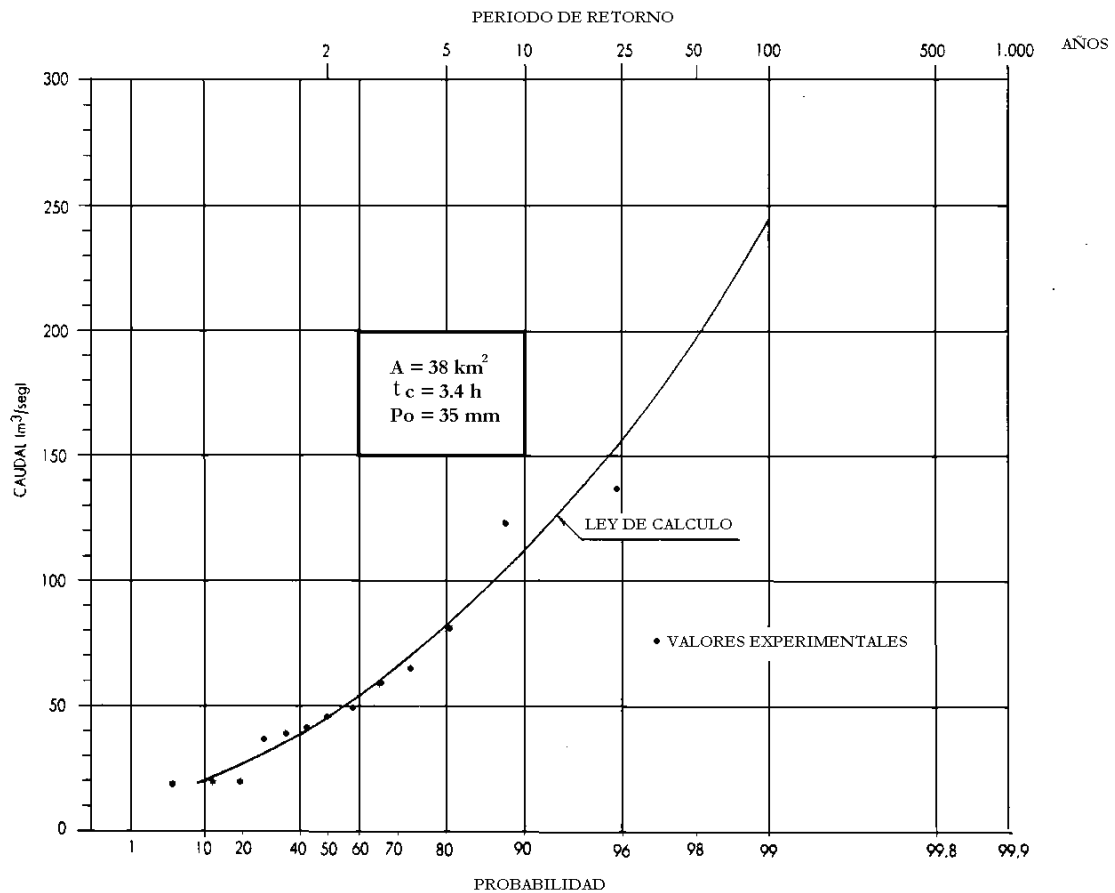


Figura 5.

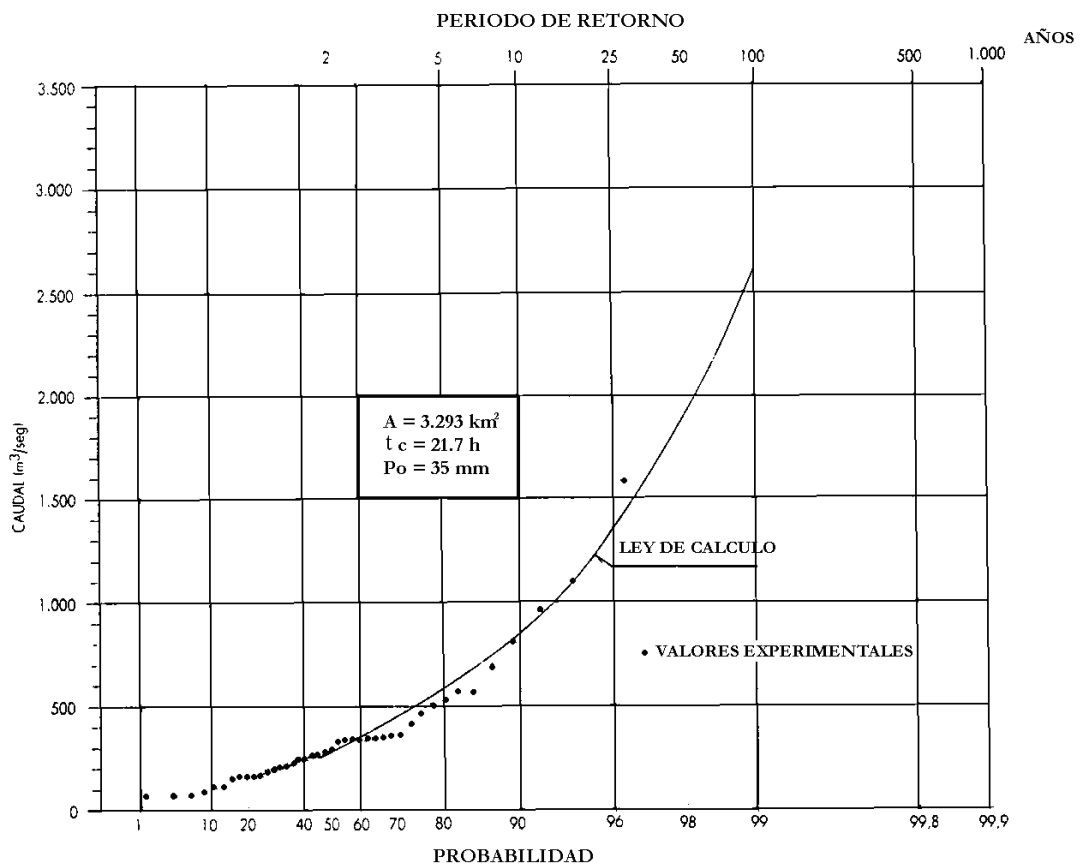


Figura 6

### 3.7. Límites de aplicación

Este método es aplicable a cuencas naturales de régimen predominantemente pluvial donde no se dejen sentir efectos extraordinarios de laminación en lagos y embalses o bien en grandes planas de inundación.

Los límites del campo de aplicación en función del tamaño de la cuenca son los propios de un método hidrometeorológico agregado, es decir, que contempla unitariamente la cuenca y trabaja con los valores medios areales de los parámetros pluviométricos y edafológicos. Son por ejemplo los mismos límites que tiene el hidrograma unitario. Así se pueden citar los siguientes órdenes de magnitud.

$$0,25 \text{ h} \leq t_c \leq 24 \text{ h}$$

$$A \leq 3000 \text{ km}^2$$

siendo  $t_c$  el tiempo de concentración y  $A$  la superficie de cuenca.

El límite mínimo de 0,25 h impuesto al tiempo de concentración excluye aquellas cuencas minúsculas donde el tiempo de recorrido del flujo difuso tiene relevancia frente al recorrido por la red de drenaje. En tales casos, se suele utilizar la siguiente relación:

$$t_c = 0,05 + 0,1 \left( \frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (7)$$

siendo:

$L$  (km): la longitud del cauce principal.

$J$ (m/m): su pendiente media.



#### **4. PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA**

Para poder realizar los cálculos anteriormente expuestos para la obtención de los caudales de referencia a la salida de una cuenca un dato básico son las lluvias máximas previsibles en un día, y para ello se pueden optar por dos vías:

1. Usando la publicación del Ministerio de Fomento “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.
2. Usando directamente los datos de una estación pluviométrica cercana a la zona de estudio y aplicando una función de distribución adecuada.

##### **4.1. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular**

Constituye un método operativo que de una manera breve y fiable, sirve de base de partida para el cálculo de los caudales de avenida. En este estudio se han distinguido las siguientes fases:

1. Selección de estaciones pluviométricas y recopilación de sus datos correspondientes a las máximas lluvias diarias.
2. Modelación estadística de las series anuales de máximas lluvias diarias realizando una estimación regional de parámetros y cuantiles.
3. Análisis de la distribución del valor medio de las series anuales de máximas lluvias diarias, estimado directamente a partir de las muestras.
4. Resumen y presentación de los resultados alcanzados tanto en la forma tradicional de planos, como en versión informática aprovechando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El método opta por un enfoque regional que trata de reducir la varianza de los parámetros con una única muestra, empleando la información de estaciones con similar comportamiento, frente a anteriores trabajos a escala nacional en que se empleaban exclusivamente los datos locales en cada una de las distintas estaciones pluviométricas.

El enfoque tradicional de estos métodos asume la existencia de una región homogénea respecto a ciertas características estadísticas, lo que permite aprovechar el conjunto de información disponible en dicha región.

El método regional adoptado, denominado tradicionalmente “índice de avenida”, asume que la variable  $Y$  resultante de dividir en cada estación los valores máximos anuales por su media

$$Y = P / \bar{P} \quad (8)$$

sigue idéntica distribución de frecuencias en toda la región considerada. Los parámetros de dicha distribución, una vez seleccionado el modelo de ajuste, son obtenidos a partir del conjunto de datos de las estaciones de la región, mientras que el valor local de la media  $\bar{P}$  se estima exclusivamente a partir de los datos de cada una de las estaciones.

La estimación de los cuantiles locales en un determinado punto se reduce a reescalar los cuantiles regionales  $Y_i$  con la media local  $\bar{P}$  según la siguiente expresión:

$$X_i = Y_i \times \bar{P} \quad (9)$$

#### 4.1.1. Estimación regional de cuantiles

La primera etapa de la estimación regional de cuantiles ha consistido en agrupar 1545 estaciones básicas, con 30 o más años de registro, en 26 regiones geográficas (figura 7). Las regiones han sido definidas tratando de agrupar zonas del territorio con características meteorológicas comunes y analizando de forma complementaria los coeficientes de variación muestrales  $C_v$ . Posteriormente la homogeneidad de las regiones ha sido contrastada mediante un test estadístico de  $\chi^2$ .



Figura 7. División de la España Peninsular en 26 regiones con características meteorológicas comunes.

En la segunda etapa han realizado la estimación regional de los parámetros y cuantiles de los siguientes cuatro modelos de función de distribución cuya formulación puede verse en el cuadro 4:

- a) Valores Extremos Generalizados (GEV).
- b) Log-Pearson III (LP3).
- c) Valores Extremos con dos Componentes (TCEV).
- d) SQRT-ET max.

<u>Distribución</u>	<u>f(x) ó F(x)</u>	<u>Parámetros</u>
GEV	$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{x-u}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \right\}$	$u, \alpha, k$
LP3	$f(x) = \frac{\left( \frac{\log_{10} x - u}{\alpha} \right)^{k-1}}{x \alpha \Gamma(k)} \exp \left\{ - \left( \frac{\log_{10} x - u}{\alpha} \right)^k \right\}$	$u, \alpha, k$
TCEV	$F(x) = \exp(-\alpha_1 e^{-x \theta_1} - \alpha_2 e^{-x \theta_2})$	$\alpha_j, \theta_j, j = 1, 2$
SQRT-ET max	$F(x) = \exp[-k(1 + \sqrt{\alpha x}) \exp(-\sqrt{\alpha x})]$	$\alpha, k$

Cuadro 4. Funciones de distribución seleccionadas

Un análisis de los cuantiles regionales  $Y_i$  estimados, con los cuatro modelos de ley seleccionados en las 26 zonas adoptadas, muestran diferencias prácticamente inexistentes para bajos y medios períodos de retorno (2, 5, 10 y 25 años), y sólo cuando los períodos de retorno son mayores, existen ligeras diferencias siempre inferiores al 8% para 500 años.

Este hecho, reduce en cierto modo la trascendencia del proceso de selección del modelo de ley, siendo la ley SQRT-ET max la finalmente seleccionada por las siguientes razones:

- Es el único de los modelos analizados de la ley de distribución, que ha sido propuesto específicamente para la modelación estadística de máximas lluvias diarias.
- Está formulada con sólo dos parámetros lo que conlleva una completa definición de los cuantiles en función exclusivamente del coeficiente de variación con lo que se consigue una mayor facilidad de presentación de resultados.
- Por la propia definición de la ley proporciona resultados más conservadores que la tradicional ley de Gumbel.
- Conduce a valores más conservadores que los otros modelos de ley analizados para las 17 regiones con cuantiles menores, mostrando unos resultados similares en el resto de las regiones.
- Demuestra una buena capacidad para reproducir las propiedades estadísticas observadas en los datos, lo que ha sido comprobado mediante técnicas de simulación de Montecarlo.

El enfoque tradicional de los métodos regionales permite estimar el valor de los cuantiles regionales en un punto, simplemente asignándole los valores obtenidos en la región en la que dicho punto está incluido, lo que presenta como principales inconvenientes tanto la incertidumbre existente respecto a los límites considerados en las regiones, como la indeseable discontinuidad que presentan los resultados en dichos límites. Para resolver estos problemas, han optado por presentar los resultados en forma “suavizada” trazando un mapa nacional de Isolineas del coeficiente de variación ( $C_v$ ) que se muestra en la figura 8.

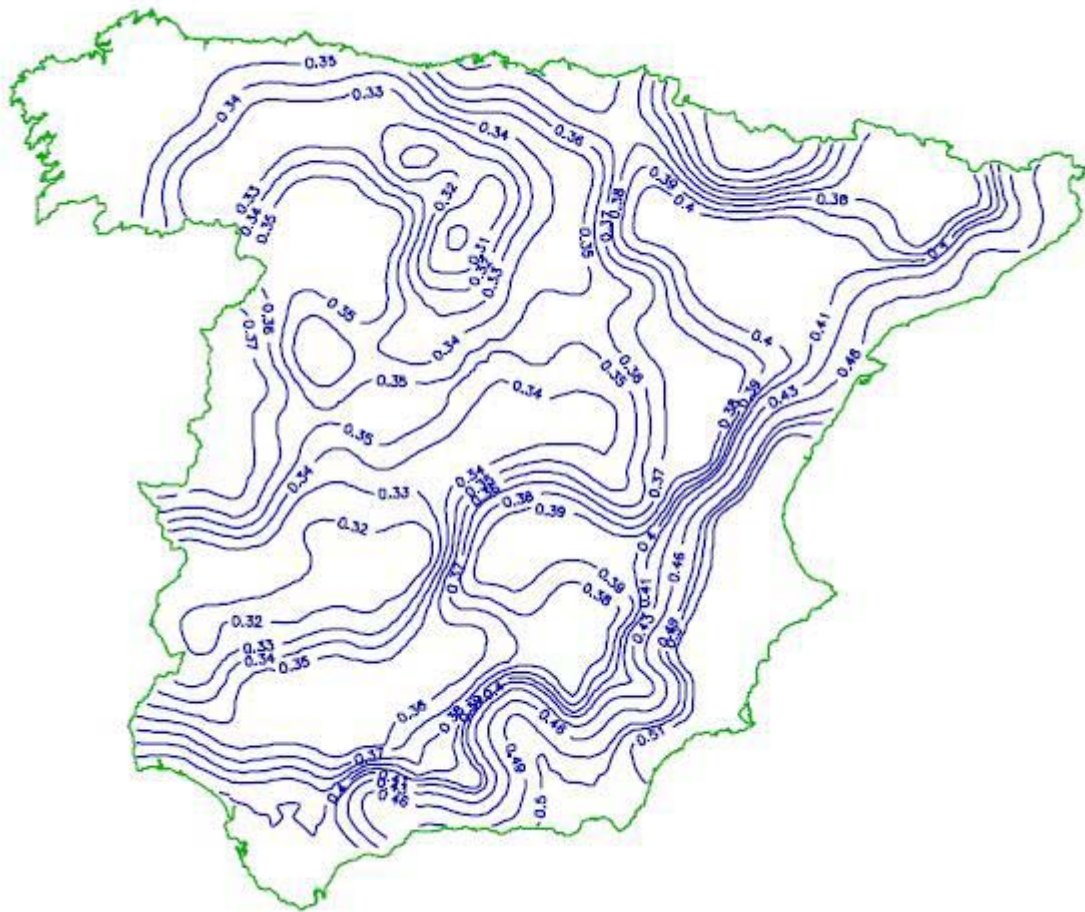


Figura 8. Isótopas del valor regional del coeficiente de variación  $C_v$ .

El  $C_v$  ha sido seleccionado como parámetro básico debido a su fácil comprensión al estar directamente relacionado con el valor de los cuantiles debido al modelo de ley y al método de estimación de los parámetros adoptados.

#### 4.1.2. Distribución espacial del valor medio como factor de escala local

La estimación de cuantiles en un determinado punto es el resultado de aplicar la fórmula 9, en la que la media  $\bar{P}$  de las series analizadas actúa como factor local.

El análisis de la distribución espacial de  $\bar{P}$  ha sido abordado mediante interpolación espacial con técnicas de krigado a partir de los valores medios de las series de 2231 estaciones, que incluyen las 1545 “básicas”, ya empleadas en la modelación estadísticas y otras 686 “complementarias” con series de más de 20 años.

La técnica del krigado presenta como ventaja fundamental, frente a otros métodos de interpolación (como la inversa de la distancia elevada a un exponente), la posibilidad de aprovechar directamente la información sobre correlación espacial existente en los propios datos, que queda reflejada en el denominado variograma muestral.

Para la aplicación del krigado han considerado 15 zonas geográficas con similar comportamiento de la variable analizada, caracterizado fundamentalmente por unas variaciones “bruscas” en zonas montañosas y “suaves” en el resto. En dichas zonas han calculado los variogramas muestrales y han ajustado variogramas teóricos

#### 4.1.3. Metodología de trabajo para la estimación de cuantiles de Máximas Lluvias diarias en la España Peninsular

La propia publicación describe la metodología a emplear para la obtención de resultados prácticos en el cálculo de cuantiles de lluvias para diferentes períodos de retorno, en puntos de la España peninsular.

El cálculo de cuantiles se plantea aquí mediante la utilización de dos métodos, siendo el primero en el que se hará mayor hincapié:

- A partir de mapas, incluidos en el anejo 1 (del documento), en los que se representan, para la España peninsular, los valores del coeficiente de variación  $C_v$  y del valor medio  $\bar{P}$ .
- Mediante la utilización de un programa informático que se incluye también en el documento “Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular”

En el anejo 1 del de dicha publicación se incluyen una serie de mapas en los que se representan tanto las Isolíneas del coeficiente de variación  $C_v$ , como las del valor medio  $\bar{P}$  de la máxima precipitación diaria anual.

La base de representación es la serie 4C del Servicio Geográfico del Ejército (escala original 1:400.000) que ha conducido a 25 planos reducidos a tamaño A-3 (escala real 1:800.000) y referidos a un sistema de coordenadas UTM transformadas al huso 30.

En los planos se ha representado también, y con objeto de servir de ayuda a la localización del punto en el que se va a realizar la obtención de los cuantiles, la red hidrográfica obtenida a partir de la base de datos 1:1.000.000 del Instituto Geográfico Nacional y la red de carreteras y poblaciones.

El proceso operativo de obtención de los cuantiles para distintos periodos de retorno a partir de estos mapas es el siguiente:

- 1) Localización en los planos del punto geográfico deseado.
- 2) Estimación mediante las Isolíneas representadas del coeficiente de variación  $C_v$  y del valor medio  $\bar{P}$  de la máxima precipitación diaria anual.
- 3) Para el período de retorno deseado  $T$  y el valor de  $C_v$ , obtención del cuantil regional  $Y_r$  mediante el uso del cuadro 5.
- 4) Realizar (según se recoge en la fórmula 9) el producto del cuantil regional  $Y_r$  por el valor medio  $\bar{P}$  obteniéndose  $X_r$  es decir, el cuantil local buscado.

C <sub>v</sub>	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Cuadro 5.



#### 4.2. Ajuste de una función de distribución a una estación pluviométrica cercana a la zona de estudio

Otra forma de obtener la precipitación total diaria correspondiente a cada período de retorno sería, buscar la estación pluviométrica más cercana a la zona de estudio y que disponga de un registro de años fiables y relativamente extensos. Una vez obtenidos dichos datos se aplica una función de distribución, asumiendo la hipótesis de que ésta es una muestra de una población que se distribuye según una ley teórica de distribución de valores extremos. Una de las funciones de distribución clásica que proporciona resultados adecuados es la función de distribución de Gumbel

La variable que representa la precipitación diaria máxima anual se denotara por  $x$  y viene medida en mm/h.

La ley de distribución de Gumbel es:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (10)$$

donde:

$$\alpha = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \quad (10.1)$$

$$\beta = \mu - \frac{0,5772}{\alpha} \quad (10.2)$$

$\sigma$  = Desviación típica

$\mu$  = media

el valor del sesgo constante e igual a 1,299

En esta expresión,  $F(x)$  es la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor menor o igual que  $x$ , es decir  $F(x)$  representa la probabilidad de que un valor dado de  $x$  no sea superado.

$$F(x) = \text{prob}(\xi \leq x) \quad (11)$$

Por lo tanto, la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor mayor que ese  $x$  dado será:

$$prob(\xi > x) = 1 - F(x) \quad (12)$$

El período o lapso de tiempo  $T(x)$  dentro del cual sería esperable que se produjese esa precipitación de valor  $x$ , llamado período de retorno para esa precipitación  $x$ , sería:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (13)$$

Si en la ecuación 10 despejamos la  $x$  y teniendo en cuenta que:

$$F(x) = \frac{T(x) - 1}{T(x)} \quad (14)$$

obtenemos:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(F(x))] \quad (15)$$

Lo que nos permite obtener finalmente la fórmula analítica para calcular la precipitación esperable para un período de retorno dado  $T(x)$  dado:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\ln \left( \frac{T(x) - 1}{T(x)} \right) \right] \quad (16)$$

## 5. TRÁNSITO DE AVENIDAS

El hidrograma de un flujo representa el caudal en función del tiempo, en un lugar dado de la corriente. Constituye una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular.

Existen diversos procedimientos de cálculo para la obtención de los hidrogramas de una cuenca pero aquí se va a destacar el Hidrograma adimensional del Soil Conservation Service (SCS).

### 5.1. Hidrograma adimensional SCS

Es un hidrograma unitario sintético que expresa la relación del caudal  $q$  con respecto al caudal pico  $q_p$  y del tiempo  $t$  con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario,  $T_p$ . Los valores de  $q_p$  y  $T_p$  pueden estimarse usando un modelo simplificado de un hidrograma triangular tal como se muestra en la figura 9, donde el tiempo esta dado en horas y el caudal en ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) por altura de lámina de precipitación.

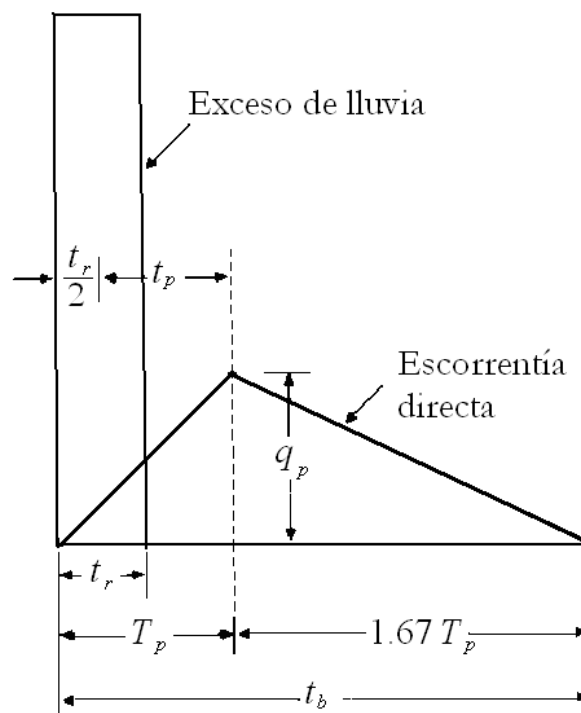


Figura 9. Hidrograma unitario triangular

El Soil Conservation Service sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse como  $1,67T_p$ .

Adicionalmente, un estudio de los hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo  $t_p \approx 0,6 \times t_c$ , donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca. Como muestra la figura 9, el tiempo de ocurrencia del pico  $T_p$  puede expresarse en términos del tiempo de retardo  $t_p$  y de la duración de la lluvia efectiva  $t_r$ .

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (17)$$

## 5.2. Método de Muskingum

Una vez conocidos los caudales de referencia y obtenidos los hidrogramas de la cuenca se puede realizar el tránsito de dichos hidrogramas. El tránsito de caudales es un procedimiento para determinar el tiempo y la magnitud del caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos o superpuestos en uno o más puntos aguas arriba. En un sentido más amplio, el tránsito de caudales puede considerarse como un análisis para seguir el caudal a través de un sistema hidrológico, dada una entrada.

Uno de éstos métodos de tránsito de avenidas es el Método de Muskingum, que es un método de tránsito de sistemas agregados es decir, el flujo se calcula como una función del tiempo únicamente en un lugar particular, sin entrar en los análisis y detalles que realizan los modelos hidráulicos.

Este método modela el almacenamiento volumétrico del flujo en un cauce mediante la combinación de dos sumandos constituidos por el almacenamiento en prisma y el almacenamiento en cuña, tal y como se muestra en la siguiente figura 10:

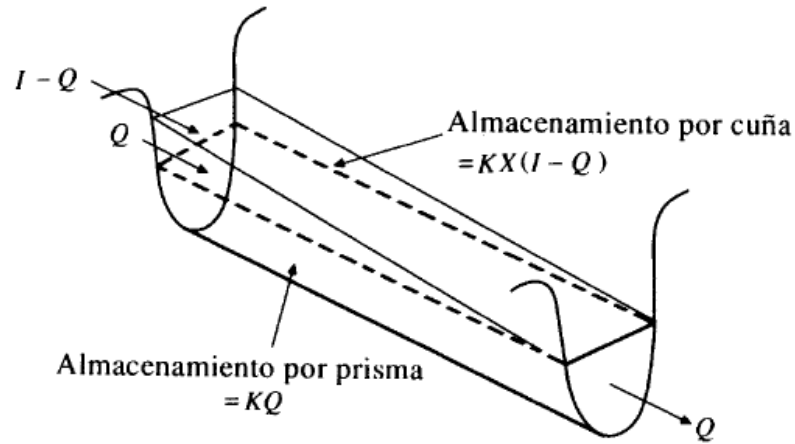


Figura 10. Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un cauce.

Durante la fase de crecimiento del hidrograma, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, produciéndose un almacenamiento en forma de cuña positiva. Por el contrario durante la fase de recesión, el caudal de salida es mayor que el de entrada, resultando así una cuña negativa. Además, existe un almacenamiento en prisma que está formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del cauce.

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de avenidas es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento por prisma es igual a  $KQ$  donde  $K$  es un coeficiente de proporcionalidad, y el volumen de almacenamiento por cuña es igual a  $KX(I - Q)$ , donde  $X$  es un factor de ponderación dentro del rango  $0 \leq X \leq 0,5$ . El almacenamiento total es por consiguiente la suma de las dos componentes,  $S = KQ + KX(I - Q)$ , que reorganizada da la función de almacenamiento para el método de Muskingum,

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (18)$$

y representa un modelo lineal para el tránsito de caudales en flujos.

El valor de  $X$  depende de la forma de almacenamiento en cuña y varía desde 0 para un almacenamiento tipo embalse, hasta 0,5 para una cuña completamente desarrollada. Cuando  $X = 0$  no existe cuña y por consiguiente no existe curva de remanso. En este caso la ecuación anterior resulta en un modelo de embalse lineal  $S = KQ$ . En flujos naturales,  $X$  se encuentra

entre 0 y 0,3 con un valor medio cercano a 0,2. No se necesita una gran precisión en la determinación de  $X$  debido a que los resultados del método son relativamente insensibles al valor de este parámetro. El parámetro  $K$  es el tiempo de tránsito de la onda de flujo a través del tramo del canal. Para su determinación se necesita el hidrograma de entrada y de salida y a partir de ello  $K$  quedaría definida como:

$$K = \frac{S}{XI(1-X)Q} = \frac{0,5\Delta t[(I_{j+1} + I_j) - (Q_{j+1} + Q_j)]}{X(I_{j+1} - I_j) + (1-X)(Q_{j+1} - Q_j)} \quad (19)$$

donde:

$S$  = es el almacenamiento

$X$  = depende de la forma de almacenamiento (varia entre 0 y 0,5)

$I$  = caudal de entrada

$Q$  = caudal de salida

Para el tránsito hidrológico, los valores de  $K$  y  $X$  se suponen especificados y constantes para todo el rango de flujo

Los valores de almacenamiento en el tiempo  $j$  y  $j+1$  pueden escribirse, respectivamente, como:

$$S_j = K[XI_j + (1-X)Q_j] \quad (20)$$

$$S_{j+1} = K[XI_{j+1} + (1-X)Q_{j+1}] \quad (21)$$

Utilizando las ecuaciones 20 y 21, el cambio del almacenamiento durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es como se muestra en la figura 11 y en la ecuación 22.

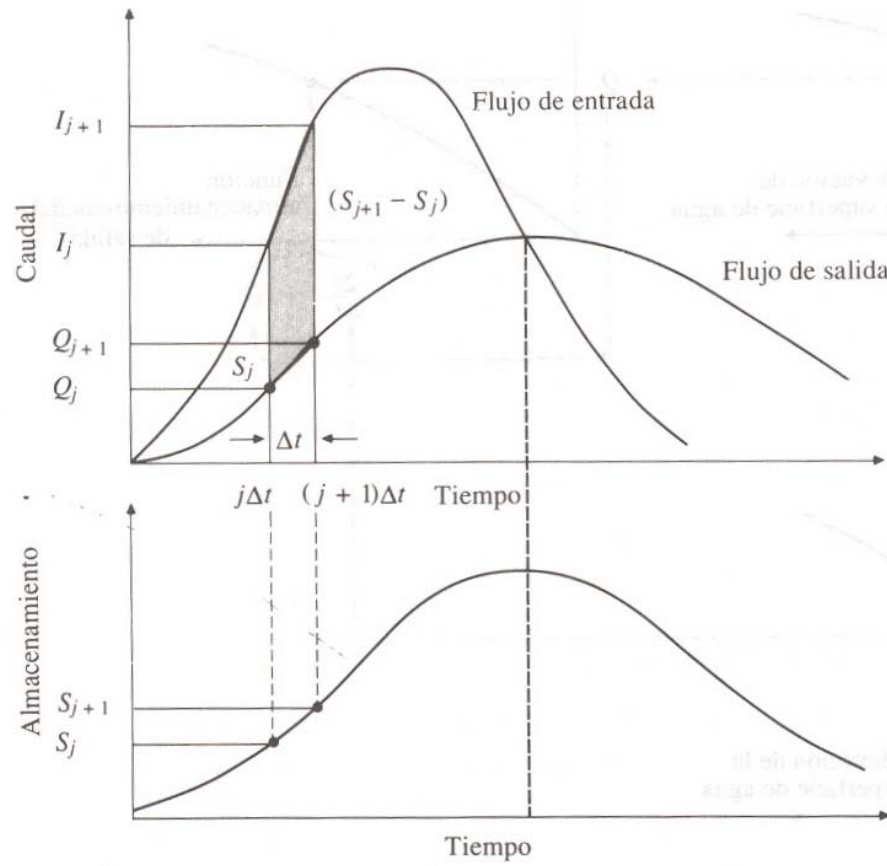


Figura 11. Cambio de almacenamiento durante un período de tránsito  $\Delta t$ .

$$S_{j+1} - S_j = K \{ [XI_{j+1} + (1-X)Q_{j+1}] - [XI_j + (1-X)Q_j] \} \quad (22)$$

El cambio en el almacenamiento también puede expresarse, como:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{(I_j + I_{j+1})}{2} \Delta t - \frac{(Q_j + Q_{j+1})}{2} \Delta t \quad (23)$$

Combinando las ecuaciones 22 y 23 y simplificando, se obtiene:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (24)$$

Que es la ecuación de tránsito para el método de Muskingum, donde:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) - \Delta t} \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (26)$$

$$C_2 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (27)$$

Nótese que  $C_1 + C_2 + C_3 = 1$



## **6. APLICACIÓN DEL MÉTODO A UNA CUENCA MEDITERRÁNEA**

### **6.1. Introducción**

El área de terreno objeto de este estudio pertenece al término municipal de Cartagena y se ubica en las cercanías del pueblo de La Aljorra, en la Región de Murcia, en el sureste español, perteneciente a la cuenca Hidrográfica del Segura.

El trabajo realizado consiste en el estudio hidrológico de la zona, para ello se necesita las precipitaciones máximas diarias anuales, a partir de la cuales se calcularon los períodos de retorno asociados a estas precipitaciones, eligiéndose como función de ajuste la función de distribución Gumbel. Una vez obtenida la precipitación total diaria para cada período de retorno se ha calculado el caudal de referencia en el punto de desagüe, es decir en el punto donde se evalúa la salida de agua de toda la cuenca, y que corresponde al caudal pico, para ello se ha aplicado el Método Racional. Esto se ha realizado también para cada una de las subdivisiones que se han hecho dentro de la cuenca según la topografía de la zona (subcuencas e intercuencas).

Posteriormente y una vez obtenido el caudal pico se han creado los hidrogramas unitarios triangulares por el Método del Soil Conservation Service (SCS). Y se ha realizado el tránsito de cada uno de los hidrogramas para cada período de retorno, utilizando el método de Muskingum.

Los resultados obtenidos con la aplicación del método en la cuenca completa y en distintos períodos de retorno, se comparan con los resultados que se obtienen de aplicar el método a las diferentes subcuencas en que se subdivide la cuenca total; tanto como suma directa y con los tránsitos hidrológicos

Finalmente, se comparan y contrastan dichos resultados, con los obtenidos con el modelo informático del U.S Army Corps of Engineer de los Estados Unidos HEC-HMS (Modelo Hidrograma Unitario del SCS y tránsito de avenidas de Muskingum-Cunge).

### **6.2. Descripción geomorfológica de la zona de estudio**

Como se ha indicado el terreno se ubica en el Campo de Cartagena, en las cercanías del pueblo de la Aljorra. De forma general se puede decir que el Campo de Cartagena geomorfológicamente se caracteriza por su amplia llanura, con pequeña inclinación hacia el

sureste, rodeada, a excepción de la zona litoral, por elevaciones montañosas. En el no existen cursos permanentes de agua y son numerosas las ramblas de cauces anchos y planos. Estas ramblas recogen las aguas en épocas de lluvia, que aunque escasas suelen ser muy intensas. La escorrentía superficial se drena en las sierras a través de numerosas ramblas de recorridos generalmente cortos y sinuosos, incorporándose progresivamente en la llanura a un sistema más jerarquizado que vierte al Mar Menor. Algunas ramblas se extinguen en la planicie debido a la escasez de pendiente y a la permeabilidad de los terrenos circundantes, o bien se ramifican en un conjunto de escorrentía difusa.

La ubicación exacta de la zona de estudio en coordenadas geográficas es  $X = 671.950$  e  $Y = 4.173.161$ , y su altura mínima sobre el nivel del mar de 70 m aproximadamente

La superficie de la cuenca es de  $327,73 \text{ km}^2$ . En ella encontramos cuatro cauces principales, en los que se han hecho distintas divisiones en tramos, ya que dicha división es necesaria para cálculos posteriores. Se han delimitado cuatro subcuencas y tres íntercuencas de características geomorfológicas variables, cuyas descripciones encontramos en los siguientes cuadros.

- CAUCES:

	LONGITUD (km)	COTA (m)		DESNIVEL (m)	PENDIENTE
		inicio	fin		
CAUCE 1	30,44	500	70	430	0,0141
CAUCE 2	29,86	251	70	181	0,0060
CAUCE 3	26,83	536	70	466	0,0174
CAUCE 4	22,93	270	70	200	0,0087

Cuadro 6. Características de los cauces de la cuenca

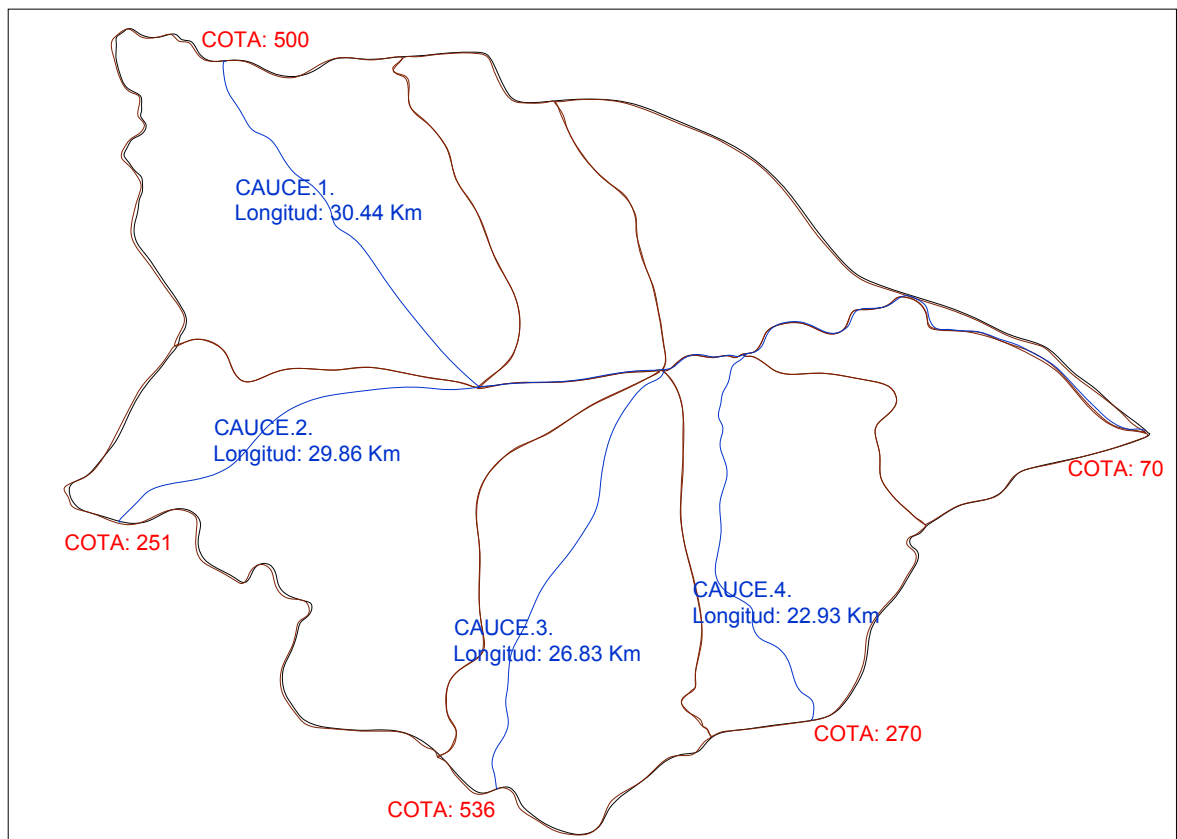


Figura 12. Características de los cauces de la cuenca

- TRAMOS:

		LONGITUD (km)	COTA (m)		DESNIVEL (m)	PENDIENTE
			inicio	fin		
TRAMO.1		10,95	500	165	335	0,03058
TRAMO.2		10,37	251	165	86	0,00830
TRAMO.3		12,15	536	130	406	0,03341
TRAMO.4		10,49	270	130	140	0,01335
TRAMO.5		4,81	165	130	35	0,00727
TRAMO.6		2,24	130	127	3	0,00134
TRAMO.7		12,44	127	70	57	0,00458
	7.a	2,93	127	110	17	0,00580
	7.b	3,70	110	95	15	0,00406
	7.c	5,81	95	70	25	0,00431

Cuadro 7. Características de los tramos de la cuenca

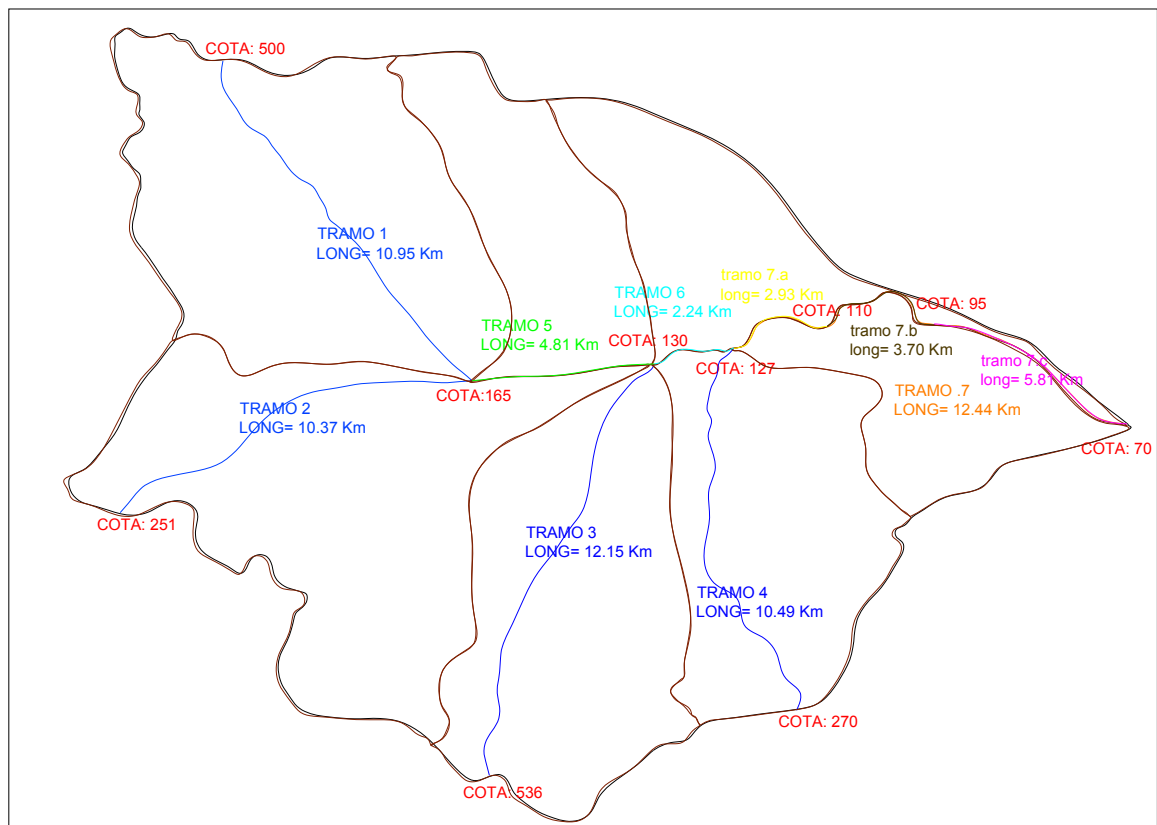


Figura 13. Características de los tramos de la cuenca

- SUBCUENCAS E INTERCUENCAS

	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (km)	COTA (m)		DESNIVEL (m)	PENDIENTE
			inicio	fin		
SUBCUENCA.1	67,56	10,96	500	165	335	0,0306
SUBCUENCA.2	71,40	15,18	251	130	121	0,0080
SUBCUENCA.3	56,42	12,15	536	130	406	0,0334
SUBCUENCA.4	46,60	10,88	270	127	143	0,0132
INTERCUENCA.5	30,02	9,12	418	155	263	0,0288
INTERCUENCA.6	29,98	9,86	219	110	109	0,0111
INTERCUENCA.7	25,57	5,22	369	95	274	0,0525

Cuadro 8. Características de subcuencas e intercuencas.

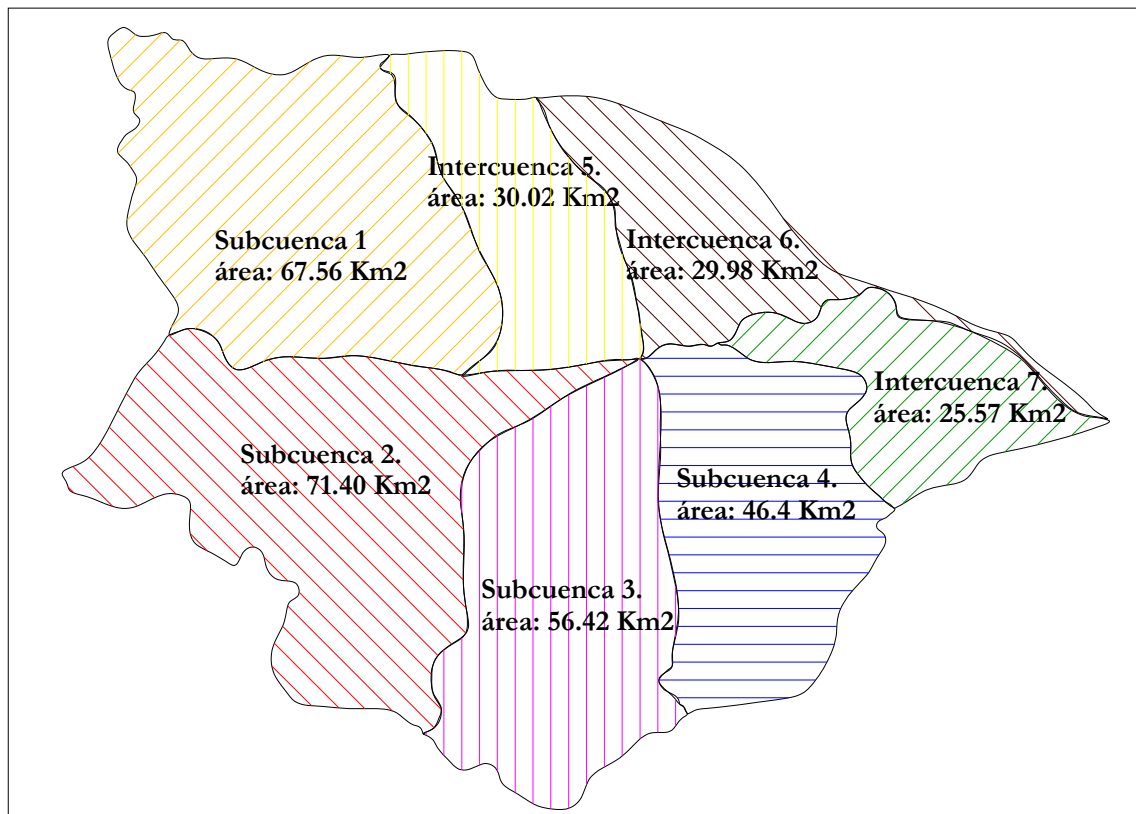


Figura 14. Características de las subcuencas e intercuencas.

### 6.3. Precipitación máxima diaria.

Este apartado se ha realizado siguiendo dos procedimientos de cálculo:

- Método de Gumbel.
- Método de regionalización de Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.

#### 6.3.1. Método de Gumbel

El primer paso para realizar el estudio hidrológico es conocer la pluviométrica de la zona. En este caso por cercanía a la zona se ha seleccionado la estación meteorológica Cartagena “Puerto” que se encuentra ubicada a una altitud de 14 metros sobre el nivel del mar y su coordenadas son  $X = 677.792$  e  $Y = 4.163.230$ . De ella se ha utilizado un registro de 36 años del período comprendido desde 1968 hasta 2003, de los cuales se disponían de los 24 primeros años y el resto fueron solicitados al Instituto Nacional de Meteorología.

Una vez obtenidos los datos se ha realizado el análisis estadístico de frecuencia de las precipitaciones máximas, para ello se ha seleccionado la función de Distribución Gumbel, mediante la que se han obtenido los períodos de retornos para distintos años, sabiendo que es la inversa de la probabilidad de ocurrencia de las máximas precipitaciones. El estudio del Gumbel se ha realizado grafica y analíticamente:

- Gráficamente.

Los resultados gráficos se obtienen mediante el papel probabilístico de Gumbel, que es una hoja estandar en la que tras introducir los puntos se debe obtener la recta que mejor se ajusta, y mediante lectura directa en el gráfico se obtiene la precipitación asociada a cada período de retorno.

Los datos en primer lugar se deben ordenar de menor a mayor, a cada uno le corresponde un orden ( $m$ ) y una probabilidad que viene definida por la siguiente ecuación:

$$PROBABILIDAD (\%) = \left[ 100 \times \frac{m}{(n+1)} \right] \quad (28)$$

Donde  $m$  es el número de orden y  $n$  el número de datos utilizados y cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro:

AÑOS	P (mm)	m	PUNTOS A REPRESENTAR	
			X	Y
			menor a mayor	$P=[100*m/(n+1)]$
1968	90	1	17,5	2,70
1969	108,7	2	28,6	5,41
1970	41,2	3	29,7	8,11
1971	40,7	4	30,1	10,81
1972	103,8	5	31,5	13,51
1973	93,6	6	31,5	16,22
1974	50,7	7	32,4	18,92
1975	42,6	8	36,6	21,62
1976	38,5	9	38,3	24,32
1977	38,8	10	38,5	27,03
1978	36,6	11	38,8	29,73
1979	31,5	12	40,6	32,43
1980	44,4	13	40,7	35,14
1981	17,5	14	40,8	37,84
1982	59	15	41,2	40,54
1983	41,7	16	41,7	43,24
1984	38,3	17	42,6	45,95
1985	105,5	18	43,5	48,65
1986	32,4	19	43,7	51,35
1987	28,6	20	44,4	54,05
1988	43,5	21	46	56,76
1989	59,5	22	48,9	59,46
1990	40,6	23	50,7	62,16
1991	67,5	24	58,9	64,87
1992	65	25	59	67,57
1993	130	26	59,5	70,27
1994	43,7	27	65	72,97
1995	29,7	28	67,5	75,68
1996	48,9	29	72,9	78,38
1997	58,9	30	90	81,08
1998	46	31	93,6	83,78
1999	31,5	32	103,8	86,49
2000	145,6	33	105,5	89,19
2001	30,1	34	108,7	91,89
2002	40,8	35	130	94,60
2003	72,9	36	145,6	97,30

Cuadro 9. Valores en el estudio del método gráfico de Gumbel.

Una vez obtenidas las probabilidades se puede representar los puntos donde la coordenada  $X$  es la precipitación y la coordenada  $Y$  la probabilidad. Y en este caso se ve que los datos si tienen una cierta tendencia lineal como se muestra en la figura 15:

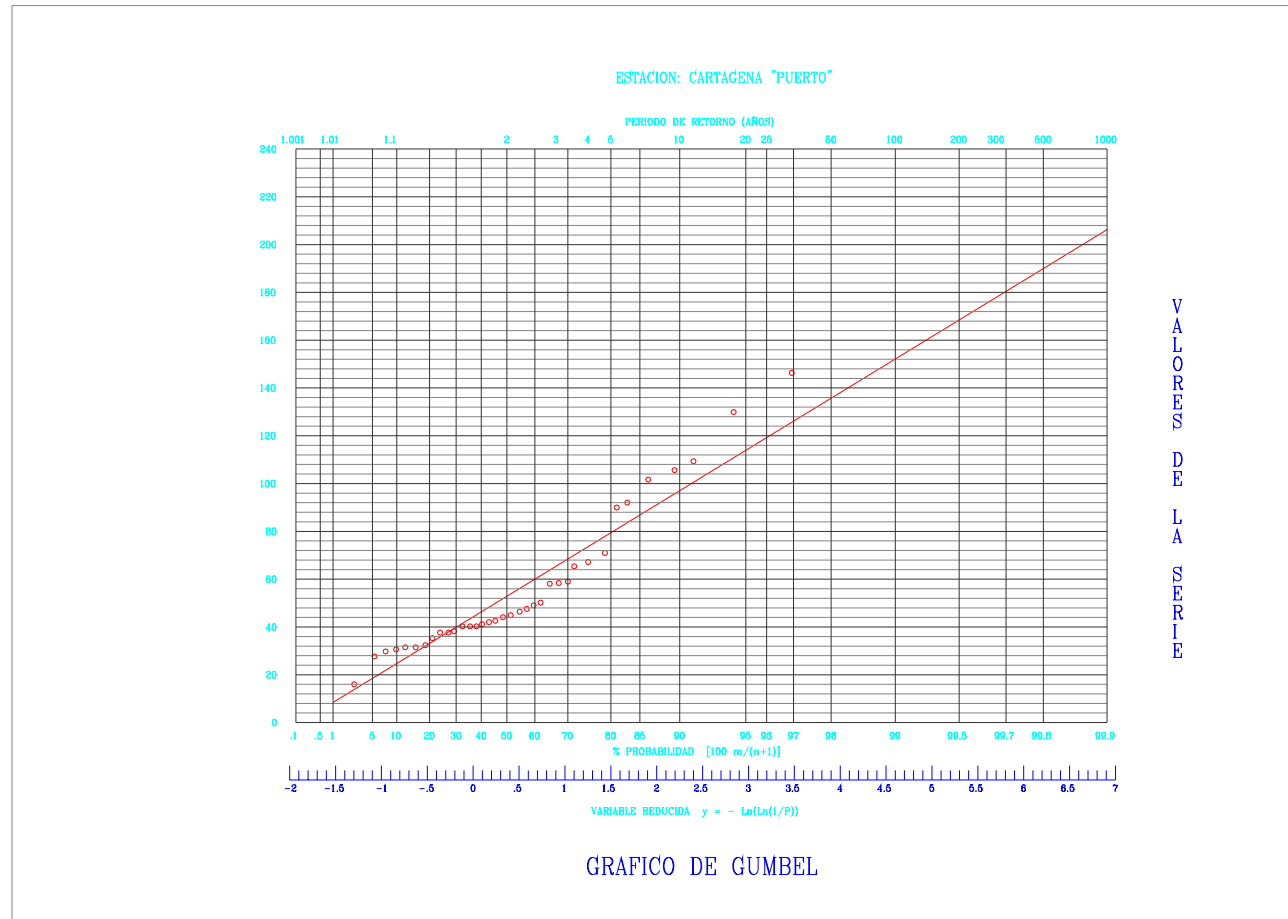


Figura 15. Ajuste probabilístico de Gumbel



De lectura directa en el gráfico se han obtenidos los resultados que se muestran a continuación:

Período de retorno (años)	$P_d$ (mm)
5	80
10	97
50	136
100	152
200	168
500	190

Cuadro 10. Resultados del método gráfico de Gumbel

- Analíticamente.

Para ello se utiliza la función de distribución de valores extremos de Gumbel que da la probabilidad de que un valor extremo sea menor que un valor dado  $X$ . Por lo tanto la probabilidad de que este valor,  $X$ , sea superado o igualado será:  $1 - F(X)$ . A partir de aquí, se define el período de retorno ( $T$ ) como el intervalo de tiempo (años) que ocurre entre dos sucesos que igualan o superan un valor extremo considerado,  $X$ , en este caso la precipitación máxima. Como ya se ha indicado la expresión que rige a la función de distribución Gumbel viene definida por la fórmula 10.

Finalmente para obtener la precipitación esperada para cada período de retorno se ha aplicado la fórmula 16 y cuyos resultados se muestran en el siguiente cuadro resumen.

$$F(X) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (10)$$

Varianza (s <sup>2</sup> )	Desviación Típica (σ)	Media (μ)	α	β	sesgo (cte)
933,477	30,553	56,619	0,041978066	42,869	1,299

$$X = \beta - \frac{1}{\alpha} - \text{Ln} \left[ -\text{Ln} \left( \frac{T(x) - 1}{T(x)} \right) \right] \quad (16)$$

Período de Retorno (años)	t/t-1	Ln(t/t-1)	Ln(Ln(t/t-1))	(1/α)*Ln(Ln(t/t-1))	β-(1/α)*Ln(Ln(t/t-1))
					P <sub>d</sub> (mm)
5	1,250	0,223	-1,4999	-35,7315	78,6
10	1,111	0,105	-2,2504	-53,6082	96,5
50	1,020	0,020	-3,9019	-92,9518	135,8
100	1,010	0,010	-4,6001	-109,5846	152,5
200	1,005	0,005	-5,2958	-126,1566	169,0
500	1,002	0,002	-6,2136	-148,0203	190,9

Cuadro 11. Resultados del método de Gumbel analítico.

Período de retorno (años)	P <sub>d</sub> (mm)	
	Gumbel Gráfico	Gumbel Analítico
5	80	78,6
10	97	96,5
50	136	135,8
100	152	152,5
200	168	169,0
500	190	190,9

Los resultados en los dos procedimientos de estudio del Gumbel se observa que son prácticamente iguales. Sinembargo debido a la mayor precisión de los datos numéricos los resultados con los que se ha trabajado han sido con los obtenidos mediante el método analítico de Gumbel.

### 6.3.2. Método de regionalización de Máximas lluvias diarias en la España Peninsular

En primer lugar se ha buscado la ubicación de la zona en el anejo 1 de la Instrucción, en este caso las coordenadas son X = 671.950; Y = 4.173.161, que según la instrucción se encuentra en el plano hoja 4 - 5 Murcia, como se muestra a continuación.

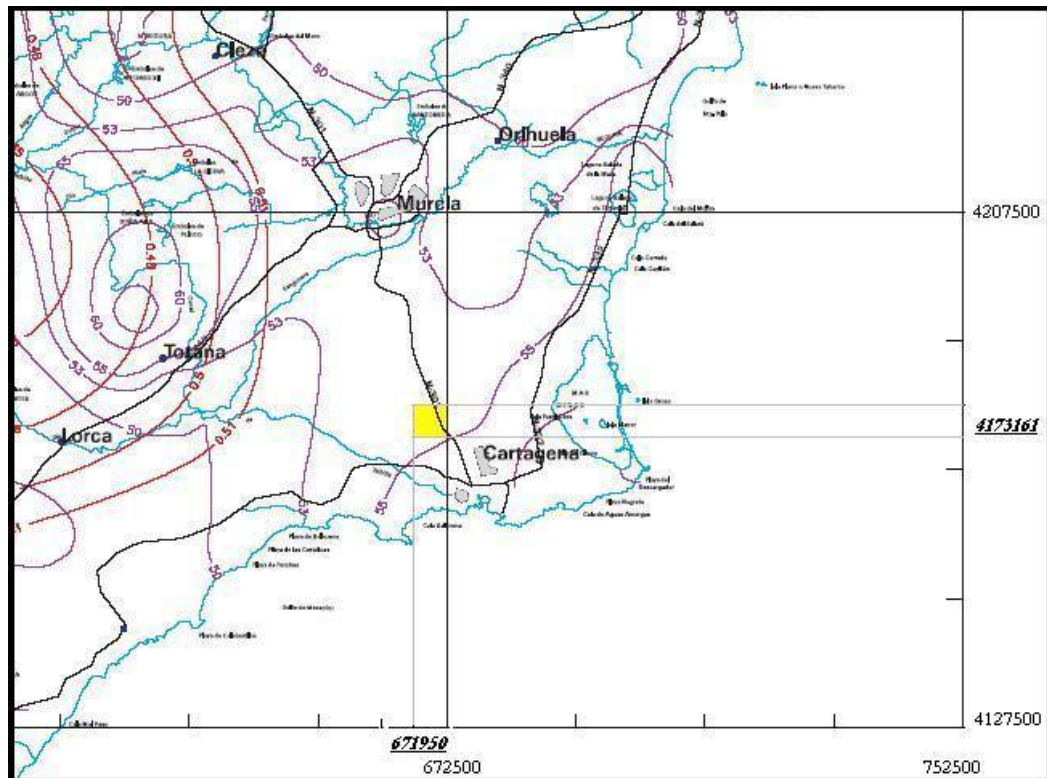


Figura 16. Localización en los planos la zona de estudio.

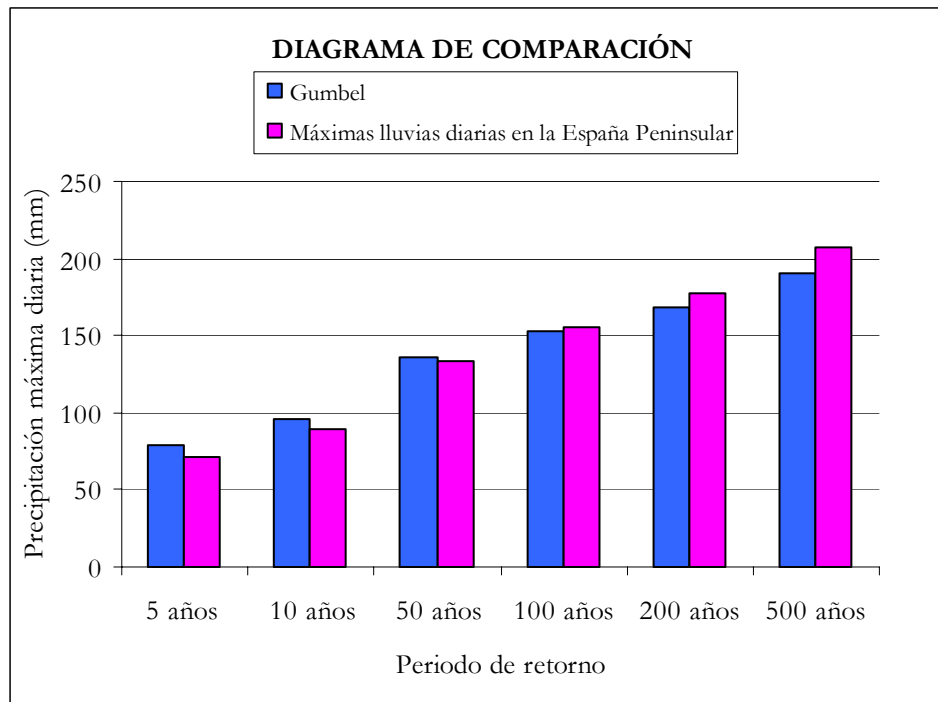
Una vez localizada la zona en los planos regionalizados, se observa que los parámetros que se definen en esta zona son para el coeficiente de variación  $C_v = 0,51$  y para el valor medio de la precipitación diaria anual  $\bar{P} = 55 \text{ mm / día}$ .

A continuación sabiendo el valor del  $C_v$  y conociendo el período de retorno deseado podemos obtener el cuantil regional  $Y_t$  mediante el cuadro 5.

Para finalizar solo hay que realizar el producto del cuantil regional  $Y_t$  por el valor medio  $\bar{P}$ , obteniéndose el cuantil local buscado  $X_t$ , en el siguiente cuadro se muestran los valores obtenidos.

Período de Retorno	$\bar{P}$ (mm/ día)	$C_v$	$Y_t$	$X_t (\text{mm / día}) = Y_t \times \bar{P}$
5 años	55	0,51	1,301	71,5
10 años	55	0,51	1,625	89,4
50 años	55	0,51	2,434	133,9
100 años	55	0,51	2,815	154,8
200 años	55	0,51	3,22	177,1
500 años	55	0,51	3,779	207,8

Si se comparan los resultados obtenidos por el método Gumbel con los obtenidos mediante la regionalización de Máximas lluvias diarias en la España Peninsular, se puede decir que estos valores son muy próximos como a continuación se muestra en el siguiente diagrama de barras.



Se puede observar que los valores obtenidos en el método de Gumbel son ligeramente superiores hasta el período de retorno de 50; sin embargo para períodos de retorno superiores, el método de regionalización de máximas lluvias es ligeramente superior lo que está de acuerdo con el literal c) del apartado 4.1.1.

#### 6.4. Caudal de referencia en el punto de desagüe

Lo que se pretende es a partir de las precipitaciones obtener el caudal pico a la salida de la cuenca, para cada período de retorno. Esto también se ha realizado para cada una de las subcuencas e intercuencas que componen la cuenca completa, que han sido analizadas como pequeñas cuencas independientes unas de otras, cada una con sus características geomorfológicas.

El procedimiento de cálculo como ya se ha indicado se ha basado en la *Instrucción de Drenaje Carreteras 5.2-IC "Drenaje Superficial"* (MOPU, 1990) con las modificaciones ya explicadas, en la que para obtener estos caudales se aplica el Método Racional.

A continuación se muestra la obtención del umbral de escorrentía para el caso concreto de esta cuenca. Para su determinación es necesario disponer de los Mapas de Cultivos y Aprovechamientos y los Geológicos, de la zona correspondiente a la cuenca.

En primer lugar lo que se ha hecho es determinar los distintos tipos de cultivos y de suelos que hay en la cuenca y la proporción de área que se tiene de cada uno de ellos. Esto resulta una tarea algo tediosa si no se dispone de Sistemas de Información Geográfica (GIS). En este estudio al no disponer de ellos se ha realizado un método semi manual utilizando hojas de cálculo Excel con el programa de dibujo AutoCad. En este procedimiento se ha obtenido un pequeño error entre el área total de la cuenca obtenida a través del Mapa de Cultivos y la obtenida con el Mapa Geológico, esto se debe a un desfase en el solape de las hojas escaneadas del Mapa de Cultivos y el error que puede introducir el obtener manualmente las áreas.

A continuación se adjuntan la codificación que tiene cada tipo de mapa (la leyenda) y la clasificación que le corresponde según el cuadro 1 de estimación del umbral de escorrentía que proporciona la Instrucción y las figuras y cuadros resumen de las áreas obtenidas.

- Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

Los mapas utilizados en este estudio pertenecen a las publicaciones del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación a escala 1: 50.000, donde las hojas que componen la cuenca de estudio son:

- 954 Totana. (año 1985)
- 955 Fuente Alamo de Murcia (año 1981)
- 976 Mazarrón (año 1982)
- 977 Cartagena (año 1982)

La codificación utilizada en estos mapas es la que a continuación se muestra en el siguiente cuadro, donde en la segunda columna encontramos la leyenda y en la tercera la clasificación que ha sido necesario asociar con dicha leyenda para el uso de la Instrucción.

<b>CODIGO</b>	<b>LEYENDA (cultivos)</b>	<b>INSTRUCCIÓN (uso de la tierra)</b>
H	Huerta	Rotación de cultivos densos
Ch	Cultivos herbáceos (regadíos)	Rotación de cultivos pobres
T	Transformación en regadío	Rotación de cultivos densos
Lb	Labor intensa (barbecho blanco)	Masa forestal (bosque, monte bajo, etc)
Ls	Labor intensa (barbecho semillado)	Masa forestal (bosque, monte bajo, etc)
Li	Limonero	Rotación de cultivos densos
Ag	Algarrobo	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal
Al	Almendro	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal
Ol	Olivar	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal
Vm	Uva de mesa	Rotación de cultivos densos
P	Pastizal	Praderas
M	Matorral	Masa forestal (bosque, monte bajo, etc)
P/M	Pastizal/matorral	Praderas
Ph	Pino carrascoso	Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal
I	Improductivo	

Cuadro 12. Leyenda del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos

Una vez solapadas y escaneadas las hojas los resultados obtenidos mediante el programa de dibujo son los que se muestran a continuación en la figura 17.

# MAPA DE CULTIVOS Y APROVECHAMIENTOS

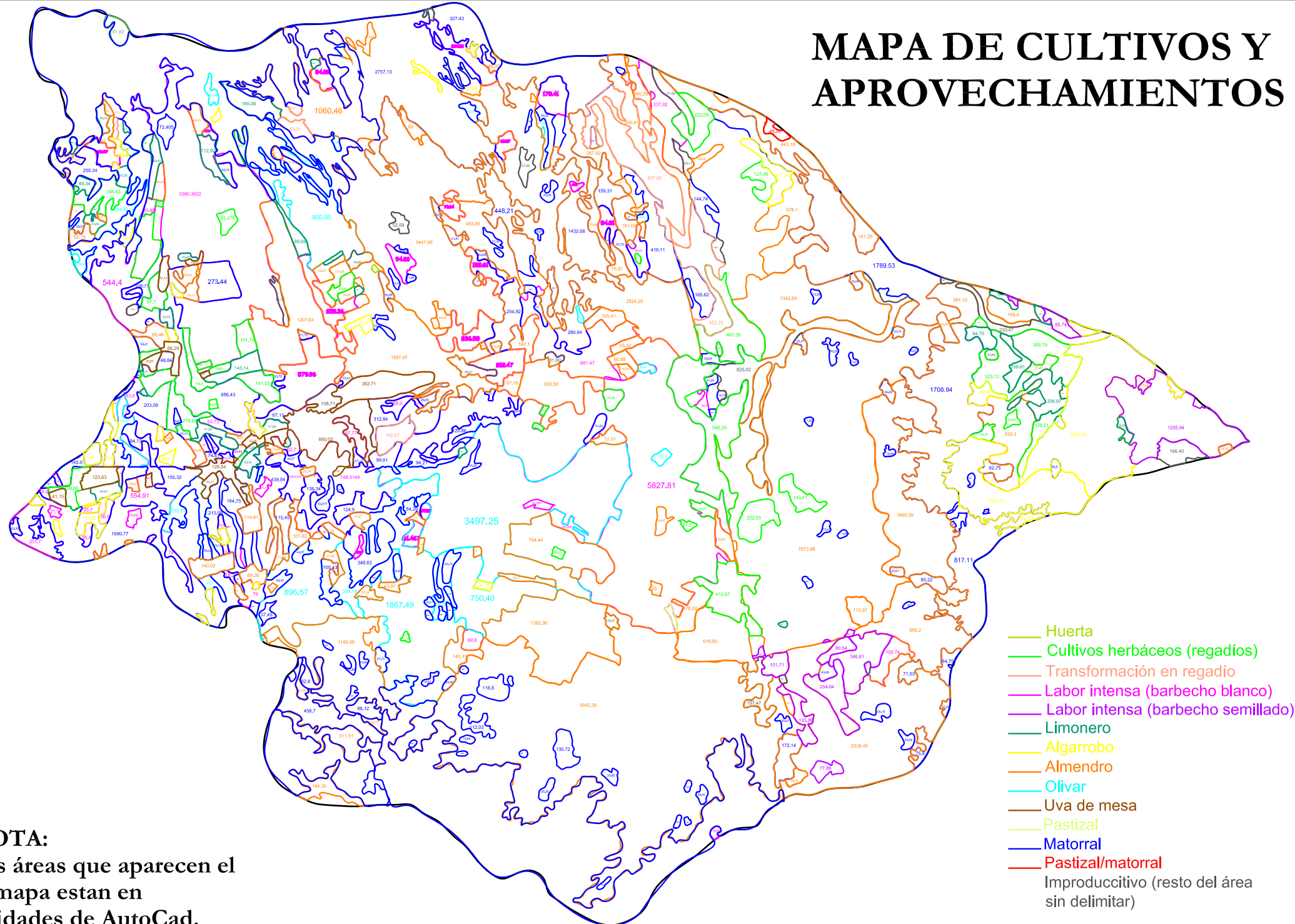


Figura 17. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos obtenido mediante AutoCad.

Una vez delimitados los distintos cultivos las áreas finales obtenidas son las que se muestran en el cuadro 14.

- Mapas Geológicos.

Los mapas geológicos utilizados pertenecen a las publicaciones del Instituto Tecnológico GeoMinero de España a escala 1: 50.000, donde las hojas que componen la cuenca de estudio son:

- 954 Totana. (año 1974)
- 955 Fuente Alamo de Murcia (año 1977)
- 976 Mazarron (año 1974)
- 977 Cartagena (año 1974)

La codificación utilizada en estos mapas es la que a continuación se muestra en el siguiente cuadro, donde en la segunda columna encontramos la leyenda y en la tercera la clasificación que ha sido necesario asociar con dicha leyenda para el uso de la Instrucción, donde los distintos grupos de suelos responden a las características descritas en el cuadro 2.



Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

CODIGO	LEYENDA (tipo de suelo)	INSTRUCCIÓN (grupo de suelo)
$\beta$	Basaltos	D
$\epsilon_4$	Metabasitas	D
$P-T_{A1}$	Cuarcitas blancas micaesquistos plateados y gneises albiticos	B
$P-T_{eA1}$	Diabasas	D
$P-T_{cA}$	Filitas con cuarcitas y yesos intercalados	A
QT	Terrazas	B
Q	Indiferenciado	C
$Q_{13}$	Conglomerados	B
QAI	Aluviones y colusiones actuales	A
QCd	Conos de deyección	A
QL	Derrubios de ladera	A
$T_{A1}^y$	Cuarcitas micaceas	D
$T_A^{\Delta}$	Mármoles calizos y dolomíticos	C
$T_{AM}^{\Delta}$	Mármoles fajeados y mármoles blancos y crema	C
$T_{eA}$	Anfibolitas epidoticas y gneises	D
$T_{A1}^{\Delta}$	Pizarras micaceas y micacitas	D
$T_{A22 A31}^r$	Rocas carbonatadas y pizarras	D
$T_{A22}^r$	Rocas carbonatadas	D
$T_{A22}^p$	Rocas carbonatadas y yesos	C
$T_{A3}^{\Delta}$	Mármoles calizo-dolomíticos blancos y crema	D
$T_{cA}^y$	Rocas carbonatadas con filitas y pizarras intercaladas	C
$T_{C2-Q}^B$	Margas rojas y caliche	A

Cuadro 13. Leyenda del Mapa Geológico.

En la figura 18 se muestra los resultados obtenidos en el mapa Geológico con el programa de dibujo.

# MAPA GEOLOGICO

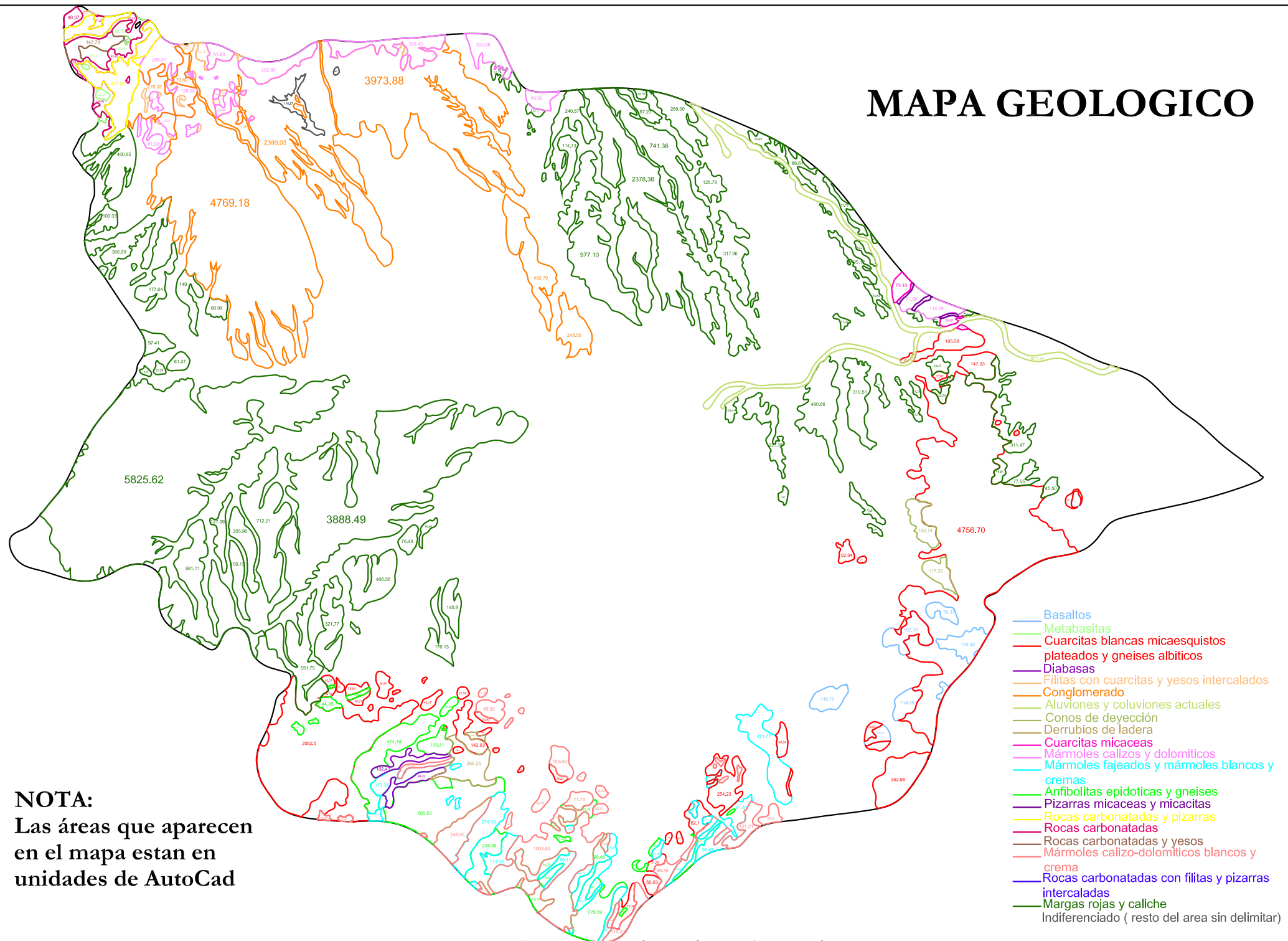


Figura 18. Mapa Geológico obtenido mediante AutoCad.

En el cuadro 15 se puede observar los distintos tipos de suelos y la proporción de área de cada uno de ellos. Si comparamos los resultados de la suma total de todas las áreas obtenidas en el mapa de Cultivos, 318,416 km<sup>2</sup> (cuadro 14) y las obtenidas en el mapa Geológico, 327,732 km<sup>2</sup> (cuadro 15), se observa un desfase en el área total de la cuenca, donde se ha considerado como correcta la obtenida en el mapa Geológico debido a la mayor precisión utilizada y al mejor ajuste de las hojas que componen la cuenca. En el Anejo 1 se muestran todos los cálculos realizados para el ajuste de este desfase tratando de no alterar la realidad de los resultados obtenidos.

RESUMEN DE LAS ÁREAS EN UNIDADES DE AutoCad															Σ
H	Ch	T	Lb	Ls	Li	Ag	Al	Ol	Vm	P	M	P/M	Ph	I	127366,28
6,82	5202,96	1732,50	16355,36	2320,35	1823,90	4284,10	43254,88	9239,87	1630,90	23,50	39113,91	49,56	91,82	2235,86	
ÁREAS DE CADA TIPO DE CULTIVO EN KILMETRO CUADRADOS															Σ
H	Ch	T	Lb	Ls	Li	Ag	Al	Ol	Vm	P	M	P/M	Ph	I	318,416
0,017	13,007	4,331	40,888	5,801	4,560	10,710	108,137	23,100	4,077	0,059	97,785	0,124	0,230	5,590	
PORCENTAJE CORRESPONDIENTE A CADA TIPO DE CULTIVO															Σ
H	Ch	T	Lb	Ls	Li	Ag	Al	Ol	Vm	P	M	P/M	Ph	I	100,00
0,01	4,09	1,36	12,84	1,82	1,43	3,36	33,96	7,25	1,28	0,02	30,71	0,04	0,07	1,76	

Cuadro 14. Áreas de los distintos tipos de cultivos

RESUMEN DE LAS ÁREAS EN UNIDADES DE AutoCad																						Σ	
β	ε <sub>4</sub>	P-T <sub>A1</sub>	P-T <sub>ε<sub>A1</sub></sub>	P-T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sub>ε<sub>AA</sub></sub>	T <sup>A</sup> <sub>AM</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22 A31</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A3</sub>	T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sup>B</sup> <sub>C2-Q</sub>	T <sup>B</sup> <sub>C2-QA</sub>	Q	QAI	QL	QT	QCd	Q13	131092,95
797,72	245,79	8759,01	200,66	197,59	2522,63	1624,33	186,25	33,89	110,44	348,27	147,73	612,57	2232,02	1560,95	7302,78	15664,70	75721,12	807,84	286,27	96,68	267,47	11366,24	
ÁREAS DE CADA TIPO DE SUELO EN KILÓMETROS CUADRADOS																						Σ	
β	ε <sub>4</sub>	P-T <sub>A1</sub>	P-T <sub>ε<sub>A1</sub></sub>	P-T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sub>ε<sub>AA</sub></sub>	T <sup>A</sup> <sub>AM</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22 A31</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A3</sub>	T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sup>B</sup> <sub>C2-Q</sub>	T <sup>B</sup> <sub>C2-QA</sub>	Q	QAI	QL	QT	QCd	Q13	327,732
1,994	0,614	21,898	0,502	0,494	6,307	4,061	0,466	0,085	0,276	0,871	0,369	1,531	5,580	3,902	18,257	39,162	189,303	2,020	0,716	0,242	0,669	28,416	
PORCENTAJE CORRESPONDIENTE A CADA TIPO DE SUELO																						Σ	
β	ε <sub>4</sub>	P-T <sub>A1</sub>	P-T <sub>ε<sub>A1</sub></sub>	P-T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sub>ε<sub>AA</sub></sub>	T <sup>A</sup> <sub>AM</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A1</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>γ</sup> <sub>A22</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A22 A31</sub>	T <sup>A</sup> <sub>A3</sub>	T <sup>C<sub>γA</sub></sup>	T <sup>B</sup> <sub>C2-Q</sub>	T <sup>B</sup> <sub>C2-QA</sub>	Q	QAI	QL	QT	QCd	Q13	100
0,61	0,19	6,68	0,15	0,15	1,92	1,24	0,14	0,03	0,08	0,27	0,11	0,47	1,70	1,19	5,57	11,95	57,76	0,62	0,22	0,07	0,20	8,67	

Cuadro 15. Áreas de los distintos tipos de suelos

Una vez determinadas las distintas áreas, para la obtención del umbral de escorrentía se ha utilizado el cuadro 1 de doble entrada. Para obtener una determinación lo más exacta posible se ha ido observando para cada cultivo en que tipo de suelo se encuentra y según la combinación que se produzca le corresponde un determinado  $Po$  que como ya se ha indicado esta tabulado por la Instrucción.

Para obtener el  $Po_c$  final por cultivo se aplica la siguiente suma ponderada:

$$Po_c = \frac{(Po_1 \times A_A + Po_2 \times A_B + Po_3 \times A_C + Po_4 \times A_D)}{(A_A + A_B + A_C + A_D)} \quad (29)$$

y el  $Po$  total de la cuenca se obtiene de la media de los distintos  $Po_c$  obtenidos para cada cultivo.

Esto se ha realizado para la cuenca completa y posteriormente para cada subcuenca e intercuenca; de acuerdo con el cálculo hidrológico global y desagregado.

A continuación en los siguientes cuadros se muestran los distintos  $Po$  obtenidos una vez corregidos las variaciones en las áreas.

- Cuenca completa.

CULTIVOS	$Po_c$ (mm)	ÁREA (km <sup>2</sup> )
H	16,00	0,02
Ch	17,71	13,71
T	38,02	4,57
Lb	16,58	43,10
Ls	21,65	6,11
Li	28,20	4,97
Ag	24,84	11,25
Al	24,91	121,69
Ol	19,60	24,35
Vm	35,35	4,30
P	22,00	0,06
M	16,77	87,42
P/M	10,18	0,13
Ph	14,38	0,24
I	4,89	5,82
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>327,73 km<sup>2</sup></b>	
<b><math>Po</math></b>	<b>20,88 mm</b>	

- Subcuenca 1.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA(km <sup>2</sup> )
Ag	15,34	0,48
Al	24,71	21,86
Ch	18,52	2,43
H	14,00	0,02
Lb	15,17	13,71
Li	26,79	2,52
M	13,45	21,73
Ol	21,70	3,18
Ph	14,00	0,24
T	23,03	0,56
Vm	20,76	0,22
I	12,14	0,67
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>67,60 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>18,61 mm</b>	

- Subcuenca 2.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA(km <sup>2</sup> )
Ag	2,38	1,26
Al	23,17	10,60
Ch	26,12	1,84
Lb	25,44	12,98
Li	38,83	0,82
M	25,02	24,57
Ol	16,67	14,35
T	47,00	0,44
Vm	35,03	4,20
I	15,40	0,38
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>71,44 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>23,60 mm</b>	

- Subcuenca 3.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA (km <sup>2</sup> )
Al	21,58	25,87
Ch	11,00	1,63
Lb	7,99	10,34
M	7,60	12,41
Ol	19,00	6,07
P	18,00	0,06
I	18,00	0,07
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>56,45 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>15,43 mm</b>	

- Subcuenca 4.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA (km <sup>2</sup> )
Al	25,89	32,88
Ch	13,28	2,59
Lb	8,00	0,39
Li	16,00	0,05
Ls	21,57	2,60
M	14,44	6,40
I	12,76	1,72
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>46,63 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>22,73 mm</b>	

- Intercuenca 5.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
Ag	39,56	0,42
Al	24,28	11,91
Ch	15,26	0,36
Lb	15,16	3,69
M	18,03	11,99
Ol	23,92	0,40
T	43,18	0,96
I	8,78	0,32
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>30,04 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>21,21 mm</b>	

- Intercuenca 6.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA (Km2)
Ag	17,41	0,96
Al	17,79	11,12
Ch	16,95	2,89
Lb	31,62	1,23
Li	26,51	0,20
Ls	12,87	0,22
M	16,07	7,68
P/M	10,03	0,17
T	36,77	3,46
I	23,42	2,05
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>30,00 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>20,37 mm</b>	

- Intercuenca 7.

CULTIVOS	Po <sub>c</sub> (mm)	ÁREA (Km <sup>2</sup> )
Ag	23,68	8,37
Al	18,36	5,85
Ch	15,18	2,38
Li	16,70	1,23
Ls	22,15	3,24
M	19,54	3,40
I	37,47	1,11
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>25,59 km<sup>2</sup></b>	
<b>Po</b>	<b>21,19 mm</b>	

En el siguiente cuadro resumen se muestra de forma compacta los resultados finales de los distintos umbrales de esorrentía con los que se han trabajado para la aplicación del Método Racional.

	ÁREA (km <sup>2</sup> )	Po (mm)
<b>CUENCA COMPLETA</b>	<b>327,73</b>	<b>20,88</b>
<b>SUBCUENCA 1</b>	67,60	18,61
<b>SUBCUENCA 2</b>	71,44	23,60
<b>SUBCUENCA 3</b>	56,45	15,43
<b>SUBCUENCA 4</b>	46,63	22,73
<b>INTERCUENCA 5</b>	30,04	21,21
<b>INTERCUENCA 6</b>	30,00	20,37
<b>INTERCUENCA 7</b>	25,59	21,19
<b>MEDIA</b>	<b>327,73</b>	<b>20,34</b>

Cuadro 16. Valores finales del Po.

Una vez obtenidas todas las características geomorfológicas y los distintos valores del Po, solo queda aplicar la formulación modificada de la Instrucción, cuyos procedimientos de cálculo han sido explicados en el apartado 3 (fórmula de cálculo) de este texto, y cuyos resultados se muestran en los siguientes cuadros.



MÉTODO RACIONAL PARA LA CUENCA COMPLETA																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m<sup>3</sup>/s)</u>
5 años	78,6	327,7	30443,9	430	0,0141	65,4	2,73	9,04	11	6,74	20,88	1,5	31,33	0,159	1,528	149,4
10 años	96,5	327,7	30443,9	430	0,0141	80,3	3,35	9,04	11	8,27	20,88	1,5	31,33	0,217	1,528	249,9
50 años	135,8	327,7	30443,9	430	0,0141	113,0	4,71	9,04	11	11,64	20,88	1,5	31,33	0,325	1,528	526,7
100 años	152,5	327,7	30443,9	430	0,0141	126,9	5,29	9,04	11	13,06	20,88	1,5	31,33	0,364	1,528	662,1
200 años	169,0	327,7	30443,9	430	0,0141	140,7	5,86	9,04	11	14,48	20,88	1,5	31,33	0,400	1,528	805,9
500 años	190,9	327,7	30443,9	430	0,0141	158,9	6,62	9,04	11	16,36	20,88	1,5	31,33	0,443	1,528	1007,1

MÉTODO RACIONAL PARA LA SUBCUENCA 1																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m<sup>3</sup>/s)</u>
5 años	78,6	67,6	10955	335	0,0306	69,0	2,88	3,59	11	13,84	18,61	1,5	27,92	0,207	1,261	67,6
10 años	96,5	67,6	10955	335	0,0306	84,7	3,53	3,59	11	16,99	18,61	1,5	27,92	0,269	1,261	108,1
50 años	135,8	67,6	10955	335	0,0306	119,3	4,97	3,59	11	23,92	18,61	1,5	27,92	0,383	1,261	216,5
100 años	152,5	67,6	10955	335	0,0306	133,9	5,58	3,59	11	26,84	18,61	1,5	27,92	0,423	1,261	268,5
200 años	169,0	67,6	10955	335	0,0306	148,4	6,18	3,59	11	29,76	18,61	1,5	27,92	0,459	1,261	323,3
500 años	190,9	67,6	10955	335	0,0306	167,6	6,98	3,59	11	33,61	18,61	1,5	27,92	0,502	1,261	399,2

MÉTODO RACIONAL PARA LA SUBCUENCA 2																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m<sup>3</sup>/s)</u>
5 años	78,6	71,4	15180	121	0,0080	68,9	2,87	5,94	11	9,68	23,60	1,5	35,41	0,141	1,398	37,8
10 años	96,5	71,4	15180	121	0,0080	84,6	3,52	5,94	11	11,88	23,60	1,5	35,41	0,197	1,398	64,8
50 años	135,8	71,4	15180	121	0,0080	119,0	4,96	5,94	11	16,73	23,60	1,5	35,41	0,302	1,398	140,0
100 años	152,5	71,4	15180	121	0,0080	133,6	5,57	5,94	11	18,78	23,60	1,5	35,41	0,340	1,398	177,2
200 años	169,0	71,4	15180	121	0,0080	148,1	6,17	5,94	11	20,82	23,60	1,5	35,41	0,375	1,398	216,7
500 años	190,9	71,4	15180	121	0,0080	167,3	6,97	5,94	11	23,51	23,60	1,5	35,41	0,418	1,398	272,3

MÉTODO RACIONAL PARA LA SUBCUENCA 3																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m3/s)</u>
5 años	78,6	56,4	12151	406	0,0334	69,4	2,89	3,82	11	13,34	15,43	1,5	23,14	0,265	1,276	70,8
10 años	96,5	56,4	12151	406	0,0334	85,2	3,55	3,82	11	16,37	15,43	1,5	23,14	0,332	1,276	108,7
50 años	135,8	56,4	12151	406	0,0334	120,0	5,00	3,82	11	23,05	15,43	1,5	23,14	0,450	1,276	207,5
100 años	152,5	56,4	12151	406	0,0334	134,7	5,61	3,82	11	25,87	15,43	1,5	23,14	0,491	1,276	254,0
200 años	169,0	56,4	12151	406	0,0334	149,3	6,22	3,82	11	28,69	15,43	1,5	23,14	0,527	1,276	302,4
500 años	190,9	56,4	12151	406	0,0334	168,6	7,03	3,82	11	32,40	15,43	1,5	23,14	0,569	1,276	368,8

MÉTODO RACIONAL PARA LA SUBCUENCA 4																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m3/s)</u>
5 años	78,6	46,6	10877	143	0,0131	69,9	2,91	4,19	11	12,58	22,73	1,5	34,10	0,154	1,300	32,7
10 años	96,5	46,6	10877	143	0,0131	85,7	3,57	4,19	11	15,44	22,73	1,5	34,10	0,212	1,300	55,0
50 años	135,8	46,6	10877	143	0,0131	120,7	5,03	4,19	11	21,74	22,73	1,5	34,10	0,319	1,300	116,6
100 años	152,5	46,6	10877	143	0,0131	135,5	5,65	4,19	11	24,40	22,73	1,5	34,10	0,358	1,300	146,9
200 años	169,0	46,6	10877	143	0,0131	150,2	6,26	4,19	11	27,05	22,73	1,5	34,10	0,393	1,300	179,0
500 años	190,9	46,6	10877	143	0,0131	169,7	7,07	4,19	11	30,55	22,73	1,5	34,10	0,436	1,300	224,0

MÉTODO RACIONAL PARA LA INTERCUENCA 5																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m3/s)</u>
5 años	78,6	30,0	9122,6	263	0,0288	70,9	2,95	3,16	11	15,51	21,21	1,5	31,81	0,177	1,231	28,2
10 años	96,5	30,0	9122,6	263	0,0288	87,0	3,62	3,16	11	19,04	21,21	1,5	31,81	0,237	1,231	46,2
50 años	135,8	30,0	9122,6	263	0,0288	122,4	5,10	3,16	11	26,80	21,21	1,5	31,81	0,347	1,231	95,5
100 años	152,5	30,0	9122,6	263	0,0288	137,4	5,73	3,16	11	30,08	21,21	1,5	31,81	0,386	1,231	119,4
200 años	169,0	30,0	9122,6	263	0,0288	152,4	6,35	3,16	11	33,35	21,21	1,5	31,81	0,422	1,231	144,7
500 años	190,9	30,0	9122,6	263	0,0288	172,1	7,17	3,16	11	37,67	21,21	1,5	31,81	0,465	1,231	179,9

MÉTODO RACIONAL PARA LA INTERCUENCA 6																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m<sup>3</sup>/s)</u>
5 años	78,6	30,0	9864,1	109	0,0111	70,9	2,95	4,02	11	13,13	20,37	1,5	30,56	0,188	1,289	26,5
10 años	96,5	30,0	9864,1	109	0,0111	87,0	3,62	4,02	11	16,12	20,37	1,5	30,56	0,249	1,289	43,1
50 años	135,8	30,0	9864,1	109	0,0111	122,4	5,10	4,02	11	22,70	20,37	1,5	30,56	0,361	1,289	87,8
100 años	152,5	30,0	9864,1	109	0,0111	137,4	5,73	4,02	11	25,48	20,37	1,5	30,56	0,400	1,289	109,5
200 años	169,0	30,0	9864,1	109	0,0111	152,4	6,35	4,02	11	28,24	20,37	1,5	30,56	0,437	1,289	132,4
500 años	190,9	30,0	9864,1	109	0,0111	172,1	7,17	4,02	11	31,90	20,37	1,5	30,56	0,479	1,289	164,2

MÉTODO RACIONAL PARA LA INTERCUENCA 7																
PERÍODO DE RETORNO	P <sub>d</sub> (mm/día)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD (m)	DESNIVEL (m)	PENDIENTE	P <sub>d</sub> *=P <sub>d</sub> x K <sub>A</sub>	Id(mm/hora)=P <sub>d</sub> */24	t <sub>c</sub> (h)	I1/Id	It (mm/h)	Po (mm)	coeficiente corrector del Po	Po* (mm)	C	K	<u>Q(m<sup>3</sup>/s)</u>
5 años	78,6	25,6	5221,9	274	0,0525	71,2	2,97	1,85	11	22,26	21,19	1,5	31,78	0,179	1,133	32,0
10 años	96,5	25,6	5221,9	274	0,0525	87,4	3,64	1,85	11	27,32	21,19	1,5	31,78	0,238	1,133	52,4
50 años	135,8	25,6	5221,9	274	0,0525	123,1	5,13	1,85	11	38,47	21,19	1,5	31,78	0,349	1,133	108,0
100 años	152,5	25,6	5221,9	274	0,0525	138,1	5,76	1,85	11	43,18	21,19	1,5	31,78	0,389	1,133	135,0
200 años	169,0	25,6	5221,9	274	0,0525	153,2	6,38	1,85	11	47,87	21,19	1,5	31,78	0,425	1,133	163,6
500 años	190,9	25,6	5221,9	274	0,0525	173,0	7,21	1,85	11	54,06	21,19	1,5	31,78	0,467	1,133	203,4

En el siguiente cuadro resumen se muestran los resultados de los caudales picos en los distintos puntos de salida para cada período de retorno.

CAUDAL DE REFERENCIA PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO (m <sup>3</sup> /s)								
período de retorno	CUENCA COMPLETA	SUBCUENCA 1	SUBCUENCA 2	SUBCUENCA 3	SUBCUENCA 4	INTERCUENCA 5	INTERCUENCA 6	INTERCUENCA 7
5 años	149,4	67,640	37,8	70,8	32,7	28,2	26,5	32,0
10 años	249,9	108,063	64,8	108,7	55,0	46,2	43,1	52,4
50 años	526,7	216,456	140,0	207,5	116,6	95,5	87,8	108,0
100 años	662,1	268,511	177,2	254,0	146,9	119,4	109,5	135,0
200 años	805,9	323,253	216,7	302,4	179,0	144,7	132,4	163,6
500 años	1007,1	399,158	272,3	368,8	224,0	179,9	164,2	203,4

Cuadro 17. Caudales de referencia en el punto de desagüe para los distintos períodos de retorno.

### 6.5. Análisis de los hidrogramas de entrada

El hidrograma de caudal representa la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En este caso el lugar al que se hace referencia es la zona de desagüe de la cuenca, es decir, la zona final del cauce, en el caso de la cuenca completa. Pero también se han obtenido los hidrogramas de cada subcuenca e intercuenca, y en este caso el punto de evaluación del hidrograma ha sido el punto de salida de cada una de ellas. En ambos casos han sido obtenidos para cada período de retorno.

Como ya se ha indicado para la obtención de los hidrogramas se ha basado en el Hidrograma adimensional de Soil Conservation Service (SCS).

Pero en este estudio al no disponer de los hietogramas correspondientes a la zona de estudio se ha realizado una simplificación donde se ha considerado el tiempo al pico  $T_p$  igual al tiempo de concentración  $t_c$ , el tiempo base  $t_b$  a dos veces dicho tiempo de concentración y el caudal pico  $q_p$  el caudal de referencia obtenido con el Método Racional, como se puede observar en la figura 19.

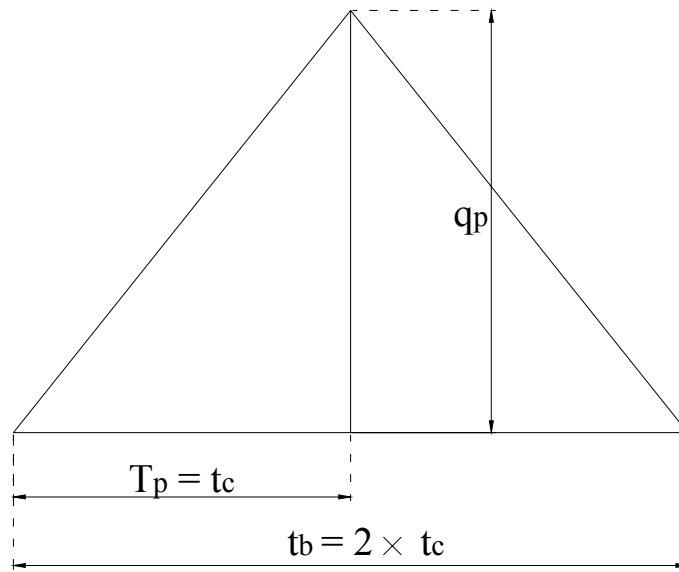
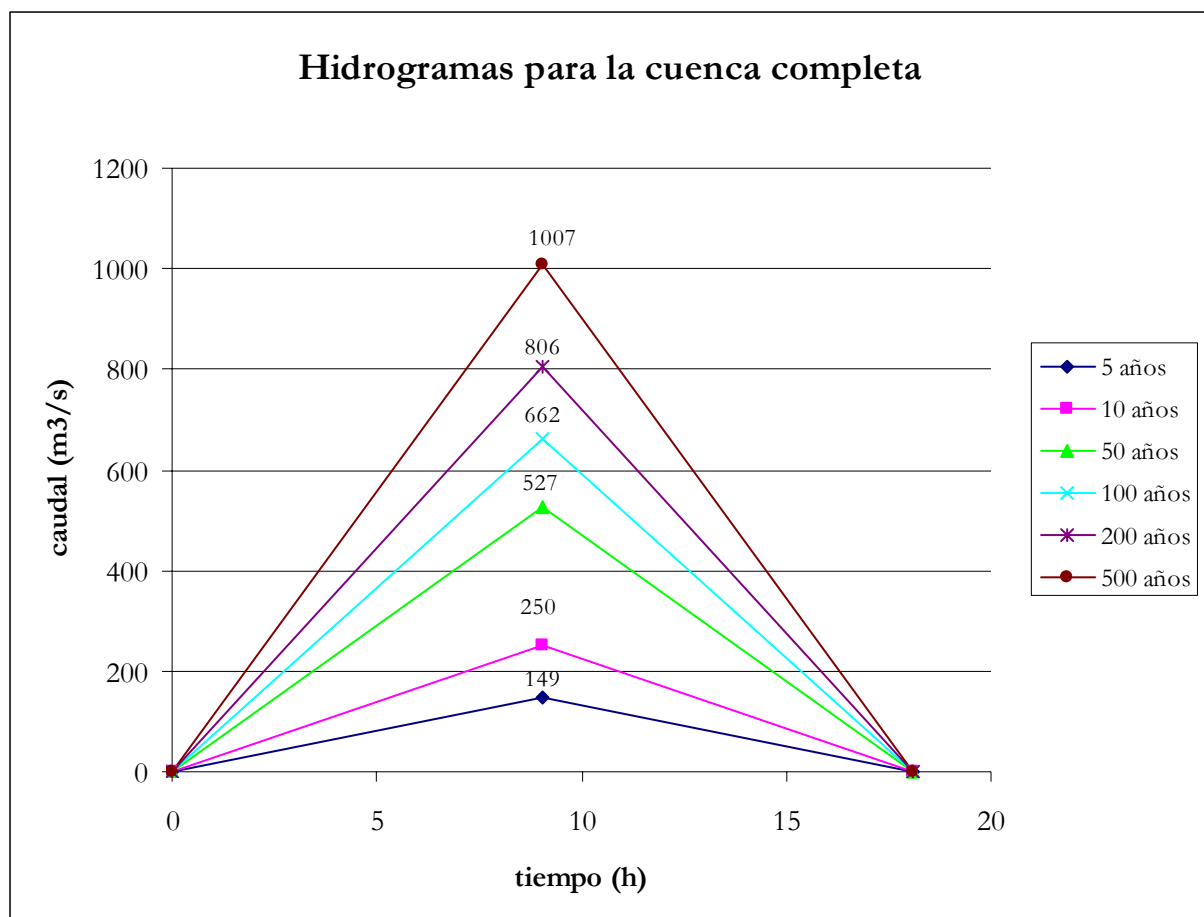


Figura 19. Simplificación del hidrograma adimensional del SCS.

Como se puede observar la base del triángulo que representa al hidrograma esta en función del tiempo de concentración, si se analiza la fórmula de este tiempo  $t_c = 0,3 \times \left[ \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \right]$ , se puede observar que los parámetros que lo definen son características geomorfológicas de la cuenca, como es la longitud del cauce principal y su pendiente media, por lo que los hidrogramas para los distintos períodos de retorno tendrán el mismo tiempo base, siempre que se refieran a la misma cuenca (subcuenca o intercuenca), donde lo que varía es el caudal pico siendo cada vez mayor para períodos de retorno superiores, como se muestra en las siguientes figuras. En el Anejo 2 se puede observar todos los hidrogramas con más detalle.

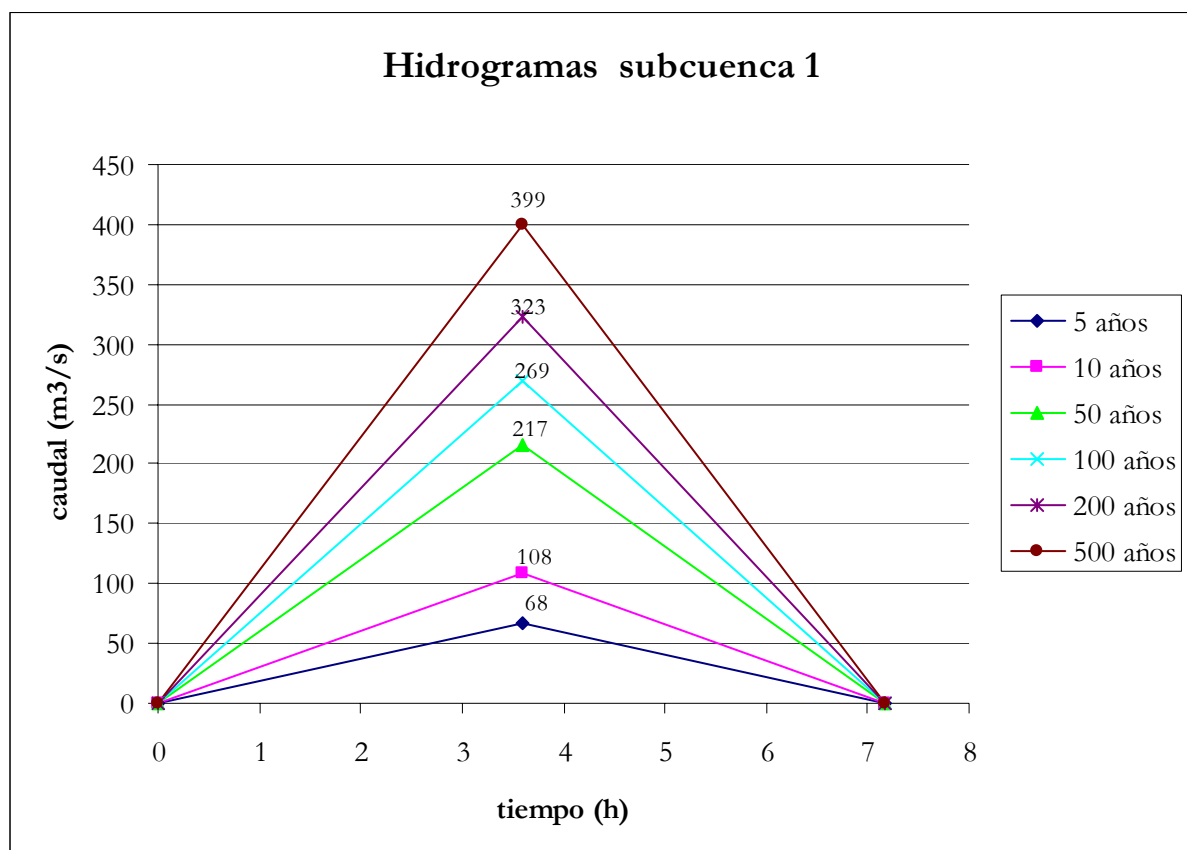
- Cuenca completa.

CUENCA COMPLETA				
Período de retorno	$Q(m^3/s)$	$t_c (h)$	$T_p (h)$	$t_b (h)$
5 años	149	9,04	9,04	18,08
10 años	250	9,04	9,04	18,08
50 años	527	9,04	9,04	18,08
100 años	662	9,04	9,04	18,08
200 años	806	9,04	9,04	18,08
500 años	1007	9,04	9,04	18,08



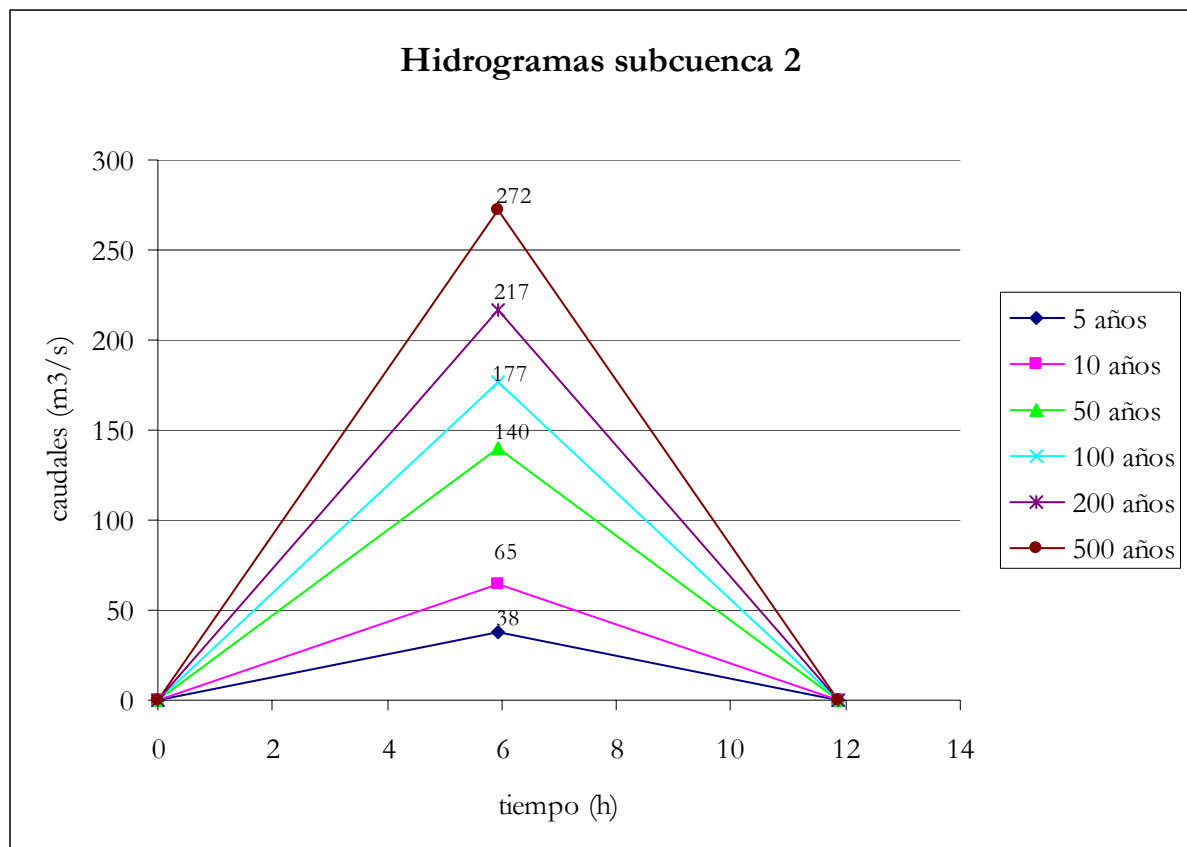
- Subcuencas e intercuencas.
  - Subcuenca 1.

SUBCUENCA 1				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	68	3,59	3,59	7,18
10 años	108	3,59	3,59	7,18
50 años	217	3,59	3,59	7,18
100 años	269	3,59	3,59	7,18
200 años	323	3,59	3,59	7,18
500 años	399	3,59	3,59	7,18



- Subcuenca 2.

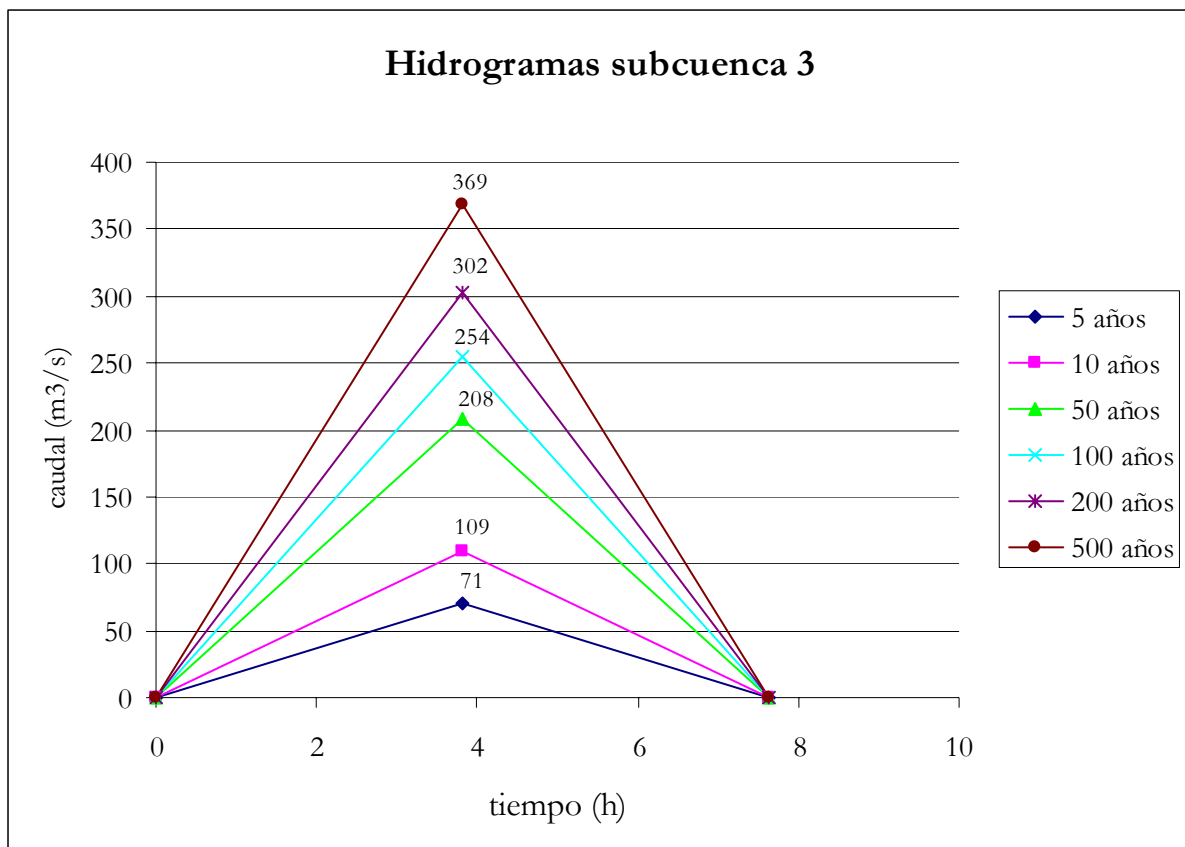
SUBCUENCA 2				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	38	5,937	5,937	11,875
10 años	65	5,937	5,937	11,875
50 años	140	5,937	5,937	11,875
100 años	177	5,937	5,937	11,875
200 años	217	5,937	5,937	11,875
500 años	272	5,937	5,937	11,875





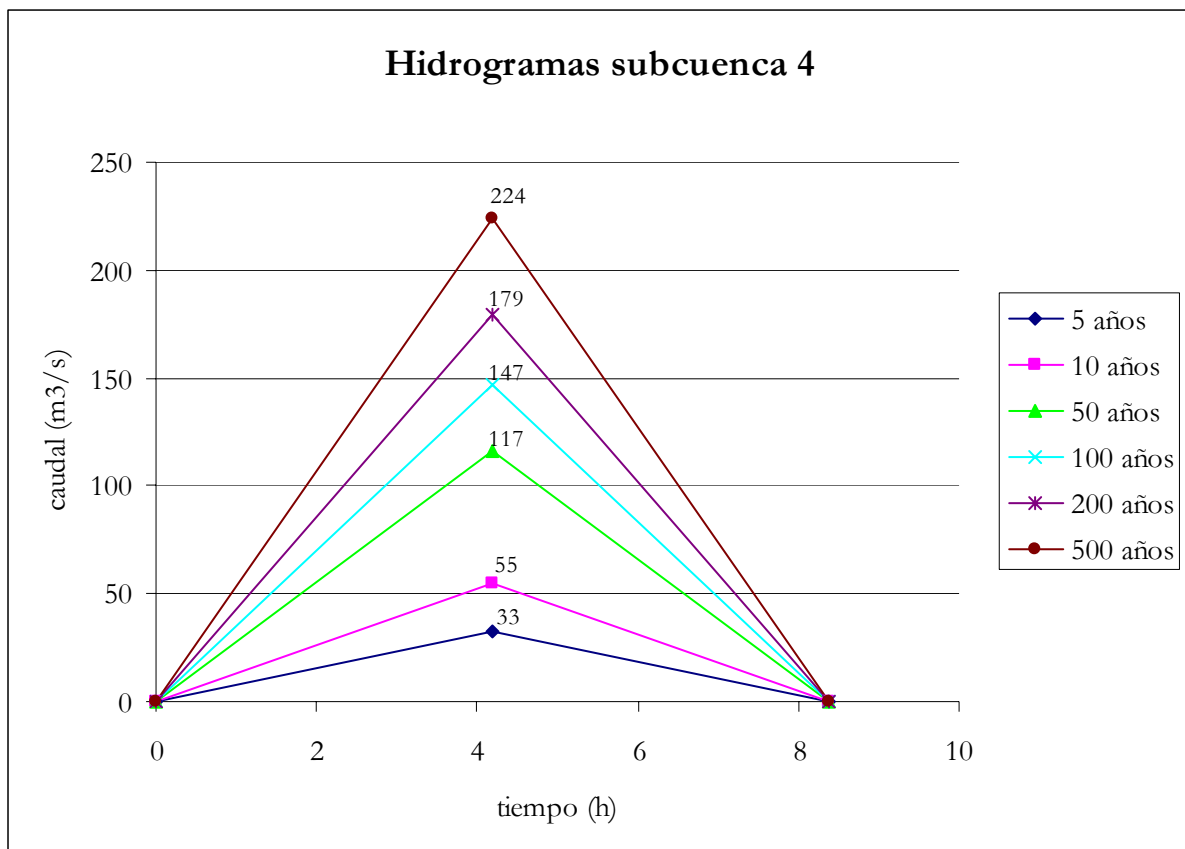
- Subcuenca 3.

SUBCUENCA 3				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	71	3,82	3,82	7,64
10 años	109	3,82	3,82	7,64
50 años	208	3,82	3,82	7,64
100 años	254	3,82	3,82	7,64
200 años	302	3,82	3,82	7,64
500 años	369	3,82	3,82	7,64



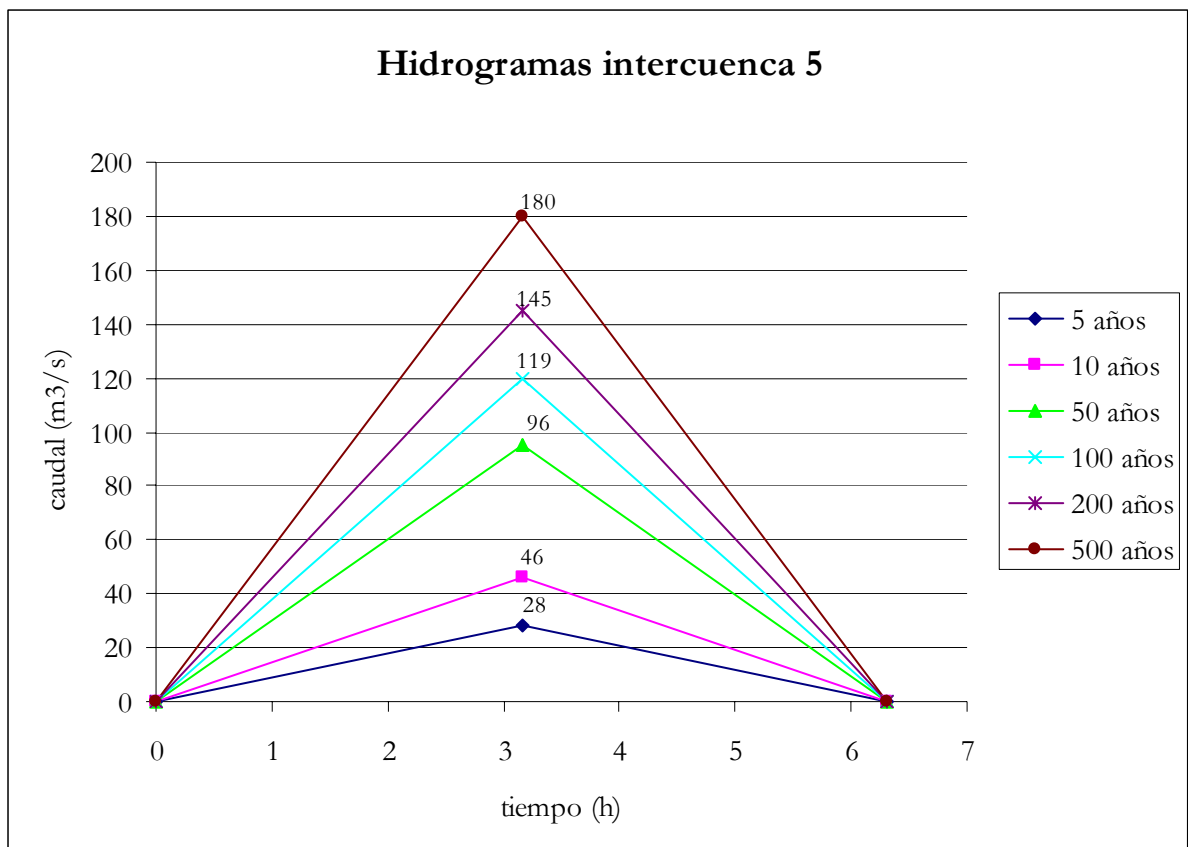
- Subcuenca 4.

SUBCUENCA 4				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	33	4,19	4,19	8,38
10 años	55	4,19	4,19	8,38
50 años	117	4,19	4,19	8,38
100 años	147	4,19	4,19	8,38
200 años	179	4,19	4,19	8,38
500 años	224	4,19	4,19	8,38



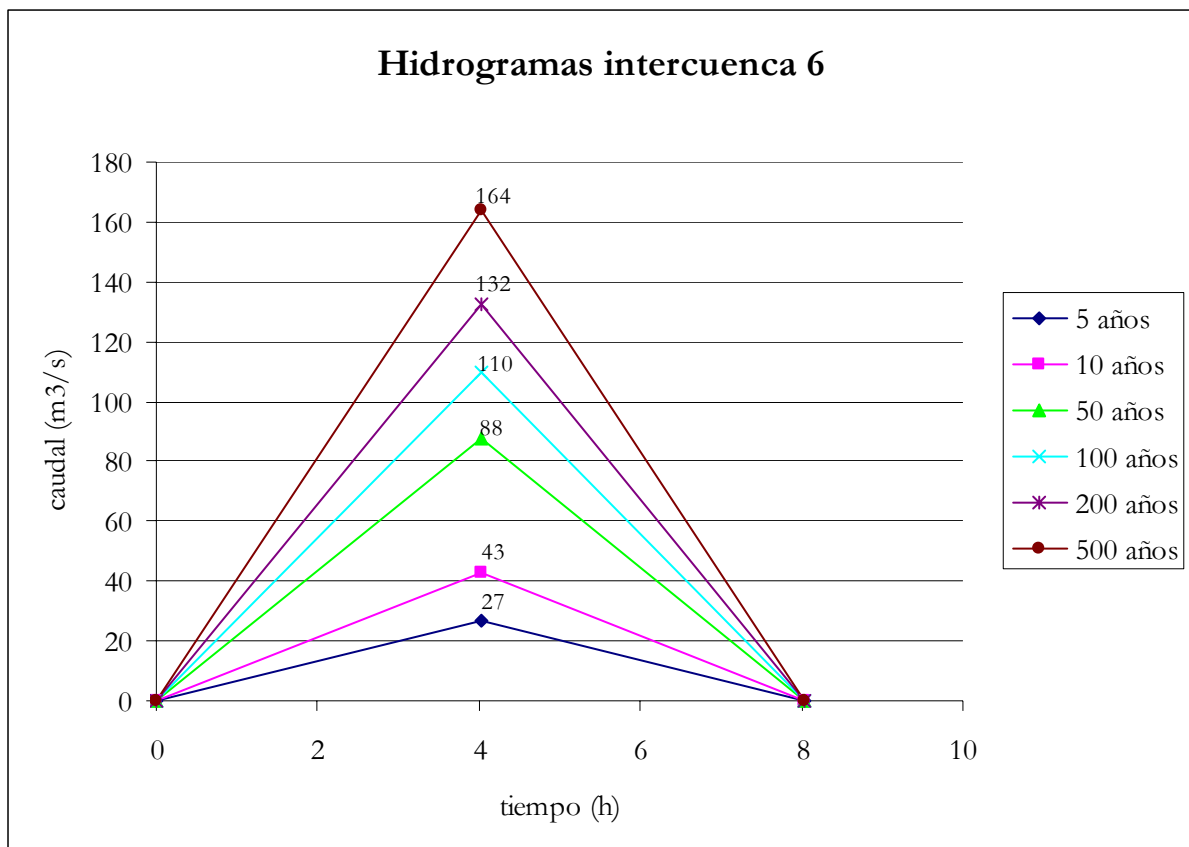
- Intercuenca 5.

INTERCUENCA 5				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	28	3,16	3,16	6,32
10 años	46	3,16	3,16	6,32
50 años	96	3,16	3,16	6,32
100 años	119	3,16	3,16	6,32
200 años	145	3,16	3,16	6,32
500 años	180	3,16	3,16	6,32



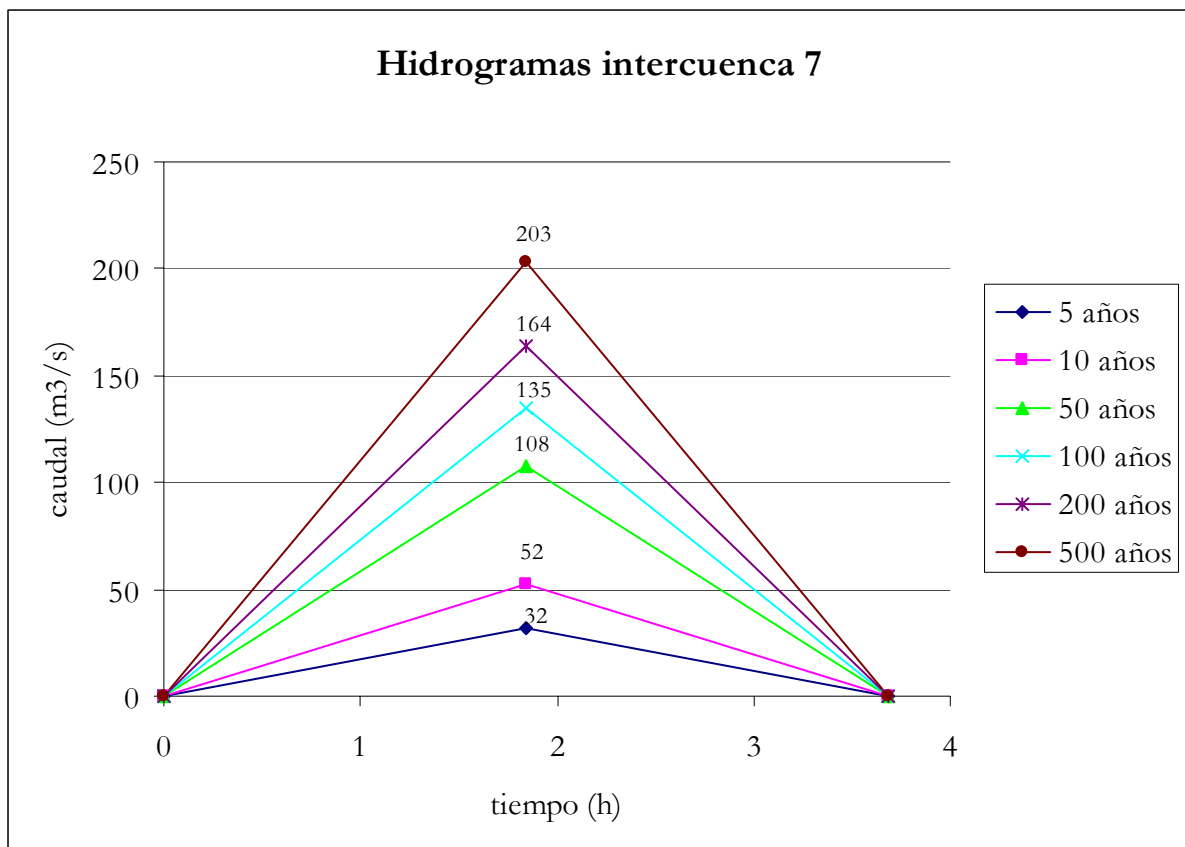
- Intercuenca 6.

INTERCUENCA 6				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	27	4.02	4.02	8.04
10 años	43	4.02	4.02	8.04
50 años	88	4.02	4.02	8.04
100 años	110	4.02	4.02	8.04
200 años	132	4.02	4.02	8.04
500 años	164	4.02	4.02	8.04



- Intercuenca 7.

INTERCUENCA 7				
Período de retorno	Q(m <sup>3</sup> /s)	t <sub>c</sub> (h)	T <sub>p</sub> (h)	t <sub>b</sub> (h)
5 años	32	1,85	1,85	3,69
10 años	52	1,85	1,85	3,69
50 años	108	1,85	1,85	3,69
100 años	135	1,85	1,85	3,69
200 años	164	1,85	1,85	3,69
500 años	203	1,85	1,85	3,69



## 6.6. Tránsito de los hidrogramas

Con el tránsito del hidrograma se obtiene la evolución del flujo a lo largo del cauce. En este estudio se ha elegido el Método de Muskingum como modelo de propagación hidrológica cuyo fundamento teórico está explicado en el apartado 5.2.

La formulación básica de este método viene definida por las ecuaciones 24, 25, 26 y 27:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (24)$$

donde:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) - \Delta t} \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (26)$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (27)$$

Nótese que  $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Si observamos las ecuaciones podemos señalar los parámetros  $X$  y  $K$ , donde  $X$  depende de la forma de almacenamiento y cuyo valor en cauces naturales se encuentra entre 0 y 0,3, con un valor medio cercano a 0,2, siendo este valor el que se ha utilizado en este estudio. Mientras  $K$  es el tiempo de tránsito de la onda de flujo a través del tramo del canal, para su determinación se necesitan hidrogramas medidos, de los que no se disponen en este estudio, por lo que se ha estimado a partir del tiempo de viaje de la onda, correspondiente a condiciones de flujo uniforme. De esta forma se ha aplicado en cada tramo la ecuación de Manning-Streckler:

$$v = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times I^{1/2} \quad (30)$$

donde:

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning ( $\sim 0,035$ ).

$R$  = radio hidráulico definido como el cociente entre el área de la sección transversal del cauce y el perímetro mojado de dicha sección.

$I$  = pendiente media del tramo de cauce evaluado.

Una vez conocida la velocidad de tránsito y la longitud del tramo del cauce tenemos que:

$$K = \frac{L_t}{v} \quad (31)$$

donde:

$L_t$  = longitud del tramo de tránsito (m).

$v$  = velocidad media del tramo en condición de flujo uniforme (m/s).

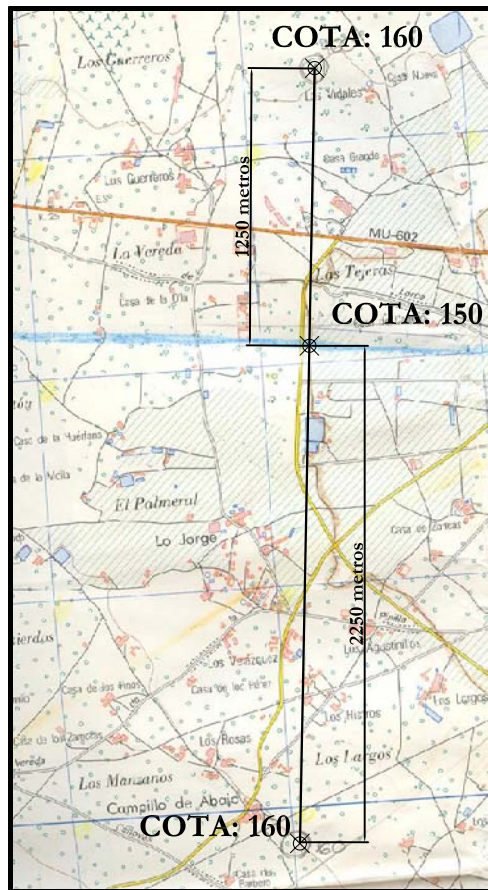
- Determinación de la sección del cauce.

Para la determinación de la velocidad se necesita saber cuáles son las secciones que el cauce presenta, por ello se ha determinado las distintas secciones que presenta el cauce principal en los distintos tramos de tránsito, para ello se ha utilizado el plano topográfico de la cuenca a escala 1: 25.000 y se han tomado las distancias en planta entre el cauce y las curvas de nivel más próximas, conociendo las cotas se ha podido hallar el perfil de la sección del cauce. Aunque la obtención de las secciones no serán muy exacta, en primer lugar, porque se ha considerado que la sección del tramo es igual a lo largo de todo su recorrido a la del punto donde se han tomado las medidas y en segundo lugar, porque es un cauce natural con todas las irregularidades que puede presentar y que no se han considerado. Pero la solución adoptada se considera valida para tener una idea aproximada y real de la forma del cauce.

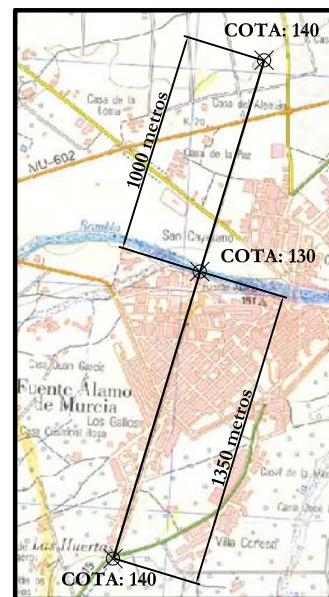
A continuación se muestran la toma de medidas realizadas sobre el mapa topográfico y las secciones obtenidas. En el Anejo 3 se puede consultar con mayor detalle.

## SECCIONES EN PLANTA DE LOS TRAMOS

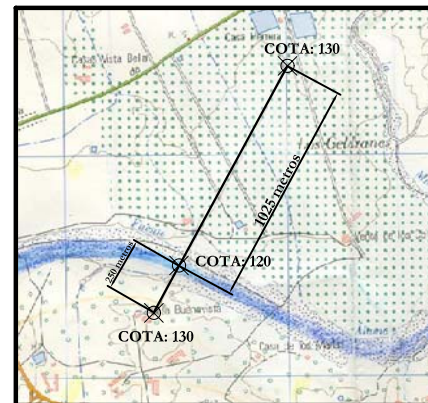
# TRAMO 5



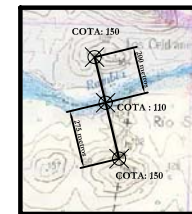
## TRAMO 6



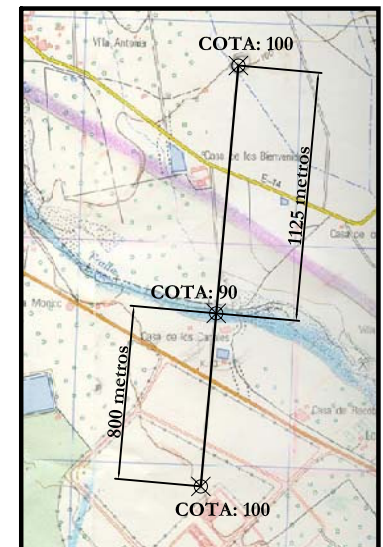
## TRAMO 7.a



## TRAMO 7.b



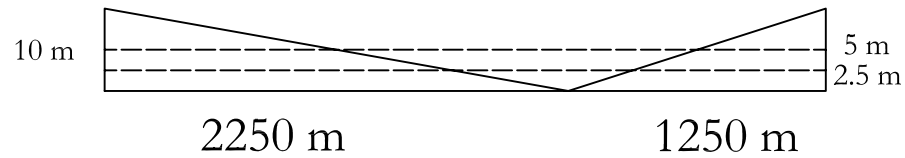
## TRAMO 7.c



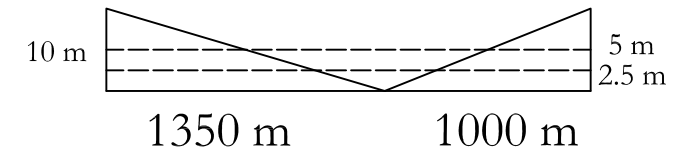


# SECCIONES DE LOS CAUCES

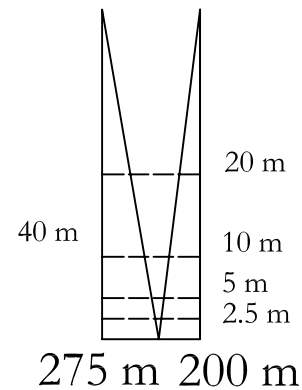
## TRAMO 5



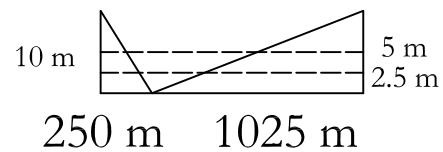
## TRAMO 6



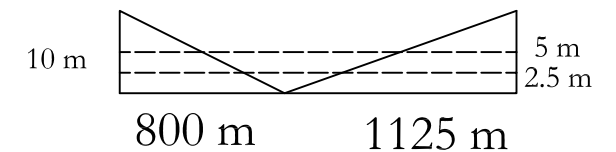
## TRAMO 7.b



## TRAMO 7.a



## TRAMO 7.c



Escala 1mm : 1 m



Escala 1mm : 40 m



Una vez conocidas las distintas secciones que presentan los tramos de tránsito, para obtener el parámetro  $K$ , se ha determinado la curva de descarga que presentan los distintos tramos para determinados calados en el cauce.

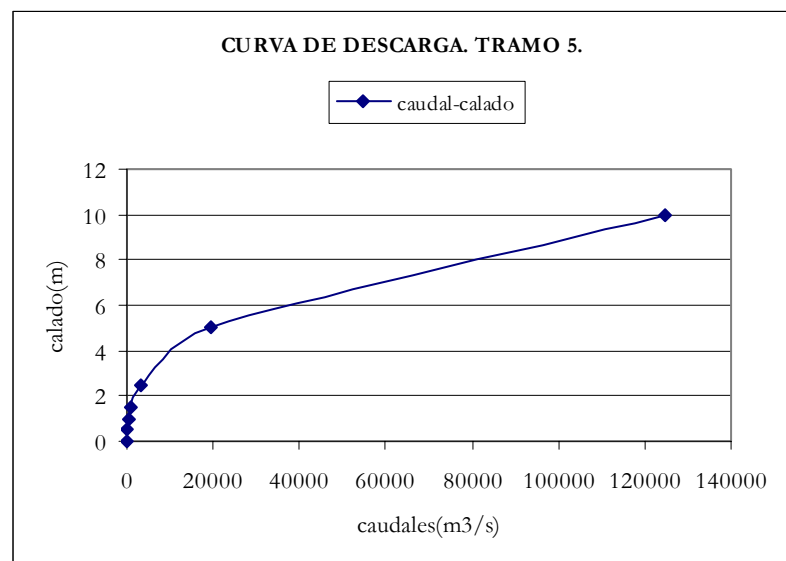
- Determinación de la curva de descarga

La curva de descarga de un cauce es la representación de los calados en función de los distintos caudales.

Conocidas las características morfológicas de las secciones de los tramos se ha supuesto distintos calados, para cada calado y aplicando la ecuación 30 se ha obtenido una determinada velocidad, y aplicando la ecuación de continuidad  $Caudal = velocidad \times \text{área}$ , se ha determinado el caudal que circula a ese calado. Aplicando el procedimiento a distintos calados, se ha obtenido la curva de descarga para cada tramo como se muestra a continuación.

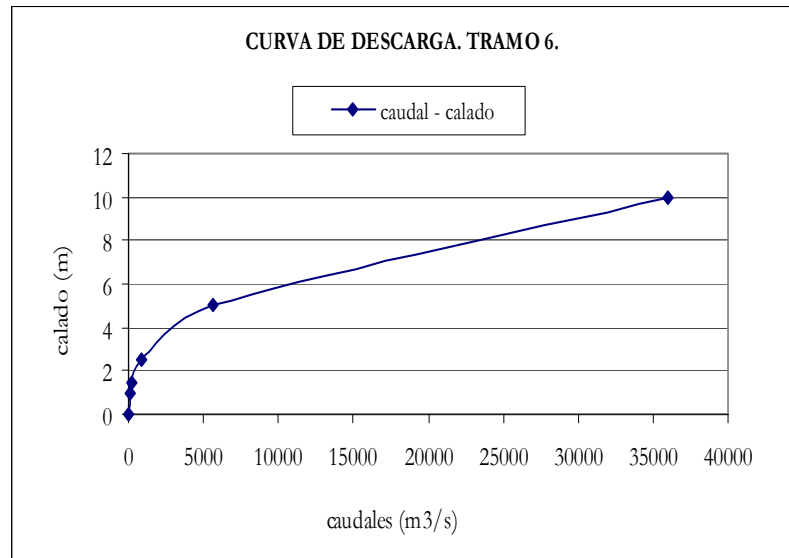
- Tramo 5.

TRAMO 5	
Calado (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
0,5	42,3
1	268,6
1,5	791,9
2,5	3092,4
5	19636,0
10	124681,2



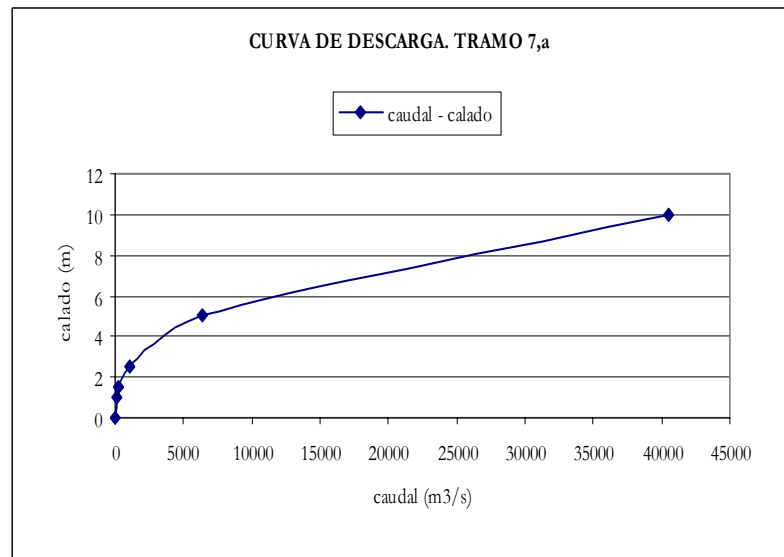
- Tramo 6.

TRAMO 6	
Calado (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
1	77,4
1,5	228,3
2,5	891,6
5	5661,2
10	35945,7



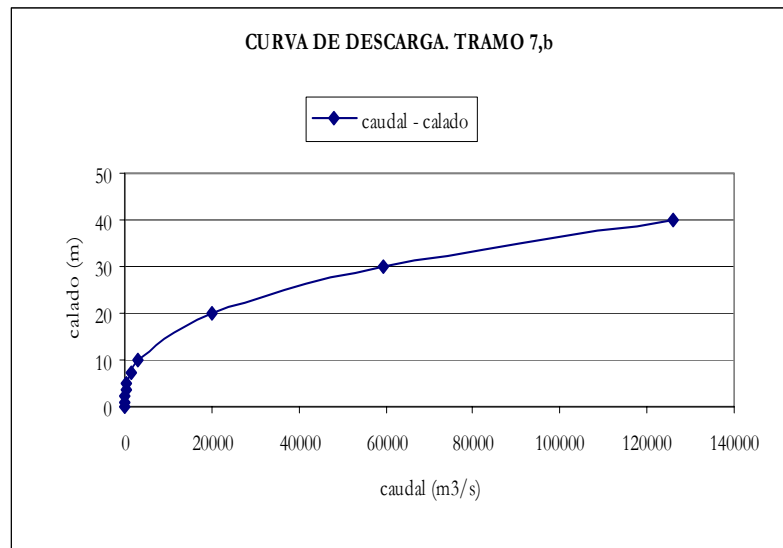
- Tramo 7.a.

TRAMO 7.a	
Calado (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
1	87,4
1,5	257,6
2,5	1005,8
5	6386,6
10	40545,4



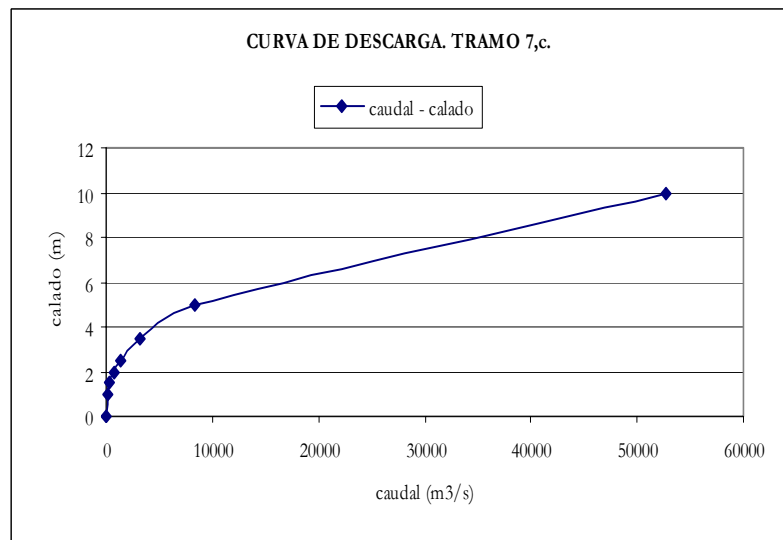
- Tramo 7.b.

TRAMO 7.b	
Calado (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0,0
1	6,8
2,5	78,7
3,5	193,2
5	500,0
7,5	1474,2
10	3175,0
20	20160,4
30	59440,3
40	126157,2



- Tramo 7.c.

TRAMO 7.c	
Calado (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
1	113,7
1,5	335,1
2	721,8
2,5	1308,6
3,5	3210,0
5	8309,6
10	52760,9



- Determinación del tiempo de tránsito.

Una vez conocida la curva de descarga se procede a determinar el valor de  $K$ , leyendo en la curva el calado correspondiente al caudal pico que se presenta en el hidrograma de entrada (hidrograma a transitar). Conocido caudal, velocidad y longitud del tramo a recorrer por la onda, se determina el tiempo que tarda en realizar ese recorrido aplicando la ecuación 31.

A continuación se indican los hidrogramas que se van a transitar y el cauce de tránsito, siguiendo el esquema del siguiente dibujo:

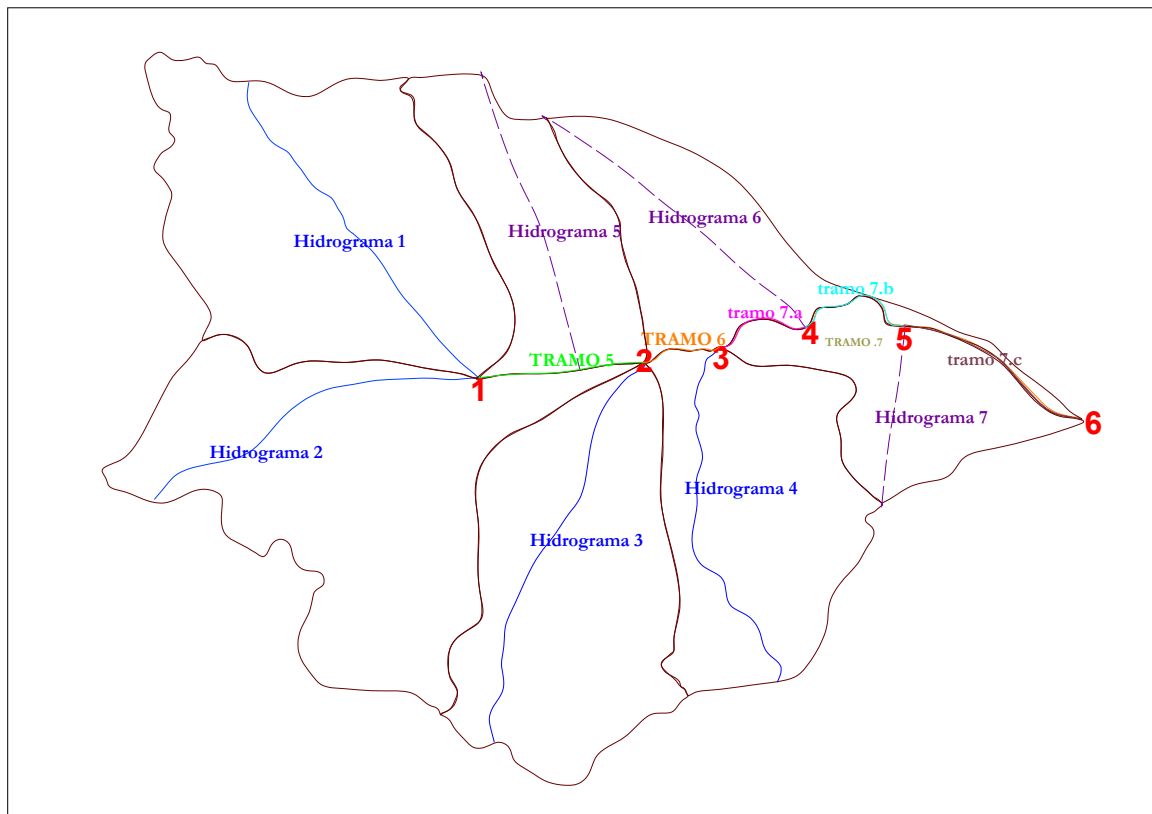


Figura 20. Esquema del tránsito en la cuenca de estudio

Los pasos seguidos son:

1. Se parte con el hidrograma 1 y se transita desde el punto 1 hasta el punto 2, es decir, a lo largo del tramo5. Obteniendo el *hidrograma tránsito 1*. (TRÁNSITO 1)
2. En el punto 2 se suman al *hidrograma tránsito 1*, el hidrograma 2, el hidrograma 3 y el hidrograma 5 y el resultado se transita desde el punto 2 hasta el punto 3, es decir a lo largo del tramo6. Obteniendo el *hidrograma transitado 2*. (TRÁNSITO 2)
3. En el punto 3 se suman al *hidrograma transitado 2* el hidrograma 4 y el resultado se transita desde el punto 3 hasta el punto 4, es decir, a lo largo del tramo7.a. Obteniendo el *hidrograma transitado 3*. (TRÁNSITO 3)
4. En el punto 4 se suman al *hidrograma transitado 3* el hidrograma 6 y el resultado se transita desde el punto 4 hasta el punto 5, es decir, a lo largo del tramo7.b. Obteniendo el *hidrograma transitado 4*. (TRÁNSITO 4)
5. En el punto 5 se suman al *hidrograma transitado 4* el hidrograma 7 y el resultado se transita desde el punto 5 hasta el punto 6, es decir, a lo largo del tramo7.c. Obteniendo el *hidrograma transitado 5*, que es el hidrograma final transitado para la cuenca de estudio. (TRÁNSITO 5)

Todos estos pasos se realizan para los distintos períodos de retorno.

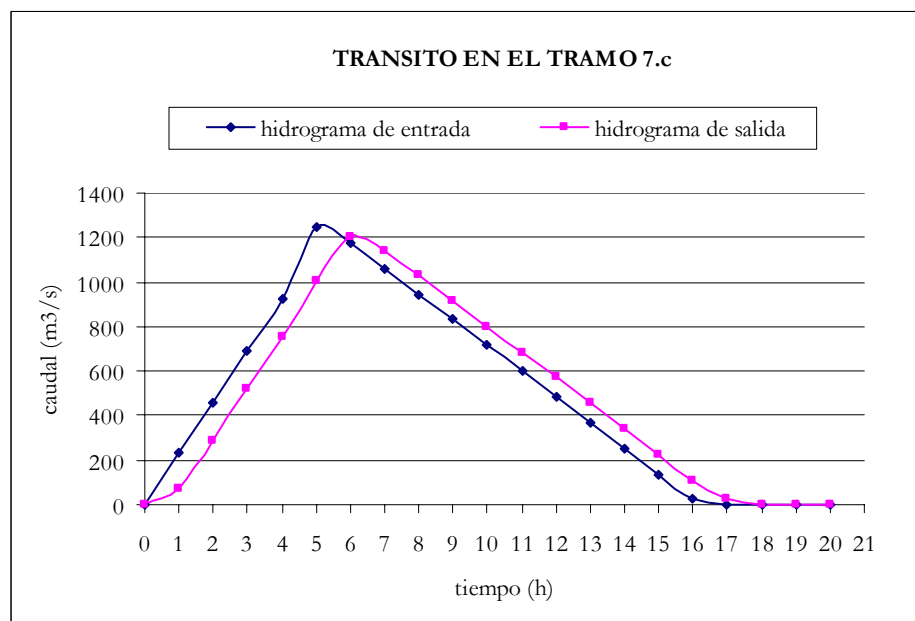
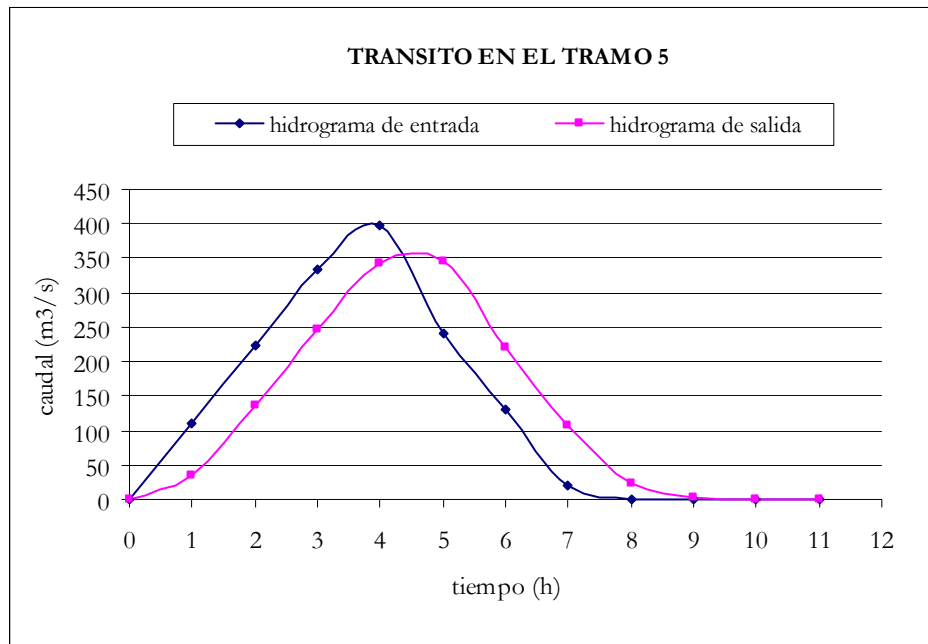
En el cuadro y gráficos adjuntos se indica el tránsito de avenidas de los tramos 5 y 7.c, correspondiente al período de retorno de 500 años.

Una vez determinado  $K$  y aplicando la formulación del Muskingum siguiendo el proceso operativo descrito, los resultado finales obtenidos para cada período de retorno se recogen en el Anejo 4 indicándose ahí todo el proceso detallado.

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

- Período de retorno de 500 años

TRÁNSITO PARA PERÍODO DE RETORNO DE 500 AÑOS									
TRÁNSITO 1		TRÁNSITO 2		TRÁNSITO 3		TRÁNSITO 4		TRÁNSITO 5	
K = 0,7890 h		K = 0,4942 h		K = 0,3109 h		K = 0,2454 h		K = 0,7508 h	
X = 0,2		X = 0,2		X = 0,2		X = 0,2		X = 0,2	
$\Delta t = 1$ h		$\Delta t = 0,7$ h		$\Delta t = 0,4$ h		$\Delta t = 0,3$ h		$\Delta t = 1$ h	
H. de entrada	H. de salida	H. de entrada	H. de salida	H. de entrada	H. de salida	H. de entrada	H. de salida	H. de entrada	H. de salida
0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0
111,21	33,64	179,82	60,59	95,43	29,31	72,89	21,24	230,68	73,32
222,42	135,86	359,65	233,16	190,86	117,56	145,77	87,21	461,36	289,62
333,63	246,03	539,47	412,54	286,28	212,21	218,66	159,17	692,04	518,98
<b>399,16</b>	343,29	719,29	592,34	381,71	307,56	291,54	231,93	922,72	749,54
242,27	<b>345,22</b>	899,12	772,16	477,14	402,98	364,43	304,80	<b>1245,68</b>	1009,54
131,06	220,57	<b>1027,58</b>	934,68	572,57	498,40	437,31	377,68	1176,46	<b>1202,09</b>
19,85	107,80	911,70	<b>982,88</b>	668,00	593,83	510,20	450,57	1061,12	1142,14
0	24,04	821,78	885,73	763,42	689,26	583,08	523,45	945,78	1031,87
0	2,79	731,87	795,37	858,85	784,69	655,97	596,34	830,44	916,99
0	0,32	641,95	705,43	954,28	880,11	728,85	669,22	715,10	801,69
0	0,04	552,04	615,51	1049,71	975,54	801,74	742,11	599,76	686,35
		462,12	525,60	<b>1168,99</b>	1078,30	874,62	814,99	484,42	571,01
		372,21	435,68	1130,41	<b>1147,29</b>	947,51	887,88	369,08	455,67
		282,29	345,77	1079,02	1116,46	1020,39	960,76	253,74	340,33
		192,38	255,85	1027,64	1067,30	1093,28	1033,65	138,40	224,99
		102,46	165,94	976,26	1016,16	1166,16	1106,53	23,06	109,65
		12,55	76,02	924,87	964,80	<b>1263,33</b>	1186,50	0	23,65
		0	12,18	873,49	913,42	1238,02	<b>1245,68</b>	0	2,16
		0	0,74	822,10	862,04	1200,12	1228,00	0	0,20
		0	0,05	770,72	810,66	1162,22	1192,81	0	0,02
				719,34	759,27	1124,32	1155,27		
				667,95	707,89	1086,42	1117,42		
				616,57	656,50	1048,52	1079,53		
				565,18	605,12	1010,62	1041,63		
				513,80	553,74	972,73	1003,73		
				462,42	502,35	934,83	965,83		
				411,03	450,97	896,93	927,93		
				359,65	399,58	859,03	890,03		
				308,26	348,20	821,13	852,13		
				256,88	296,82	783,23	814,23		
				205,50	245,43	745,33	776,34		
				154,11	194,05	707,43	738,44		
				102,73	142,66	669,53	700,54		
				51,34	91,28	631,63	662,64		
				0	39,91	593,74	624,74		
				0	4,33	555,84	586,84		
				0	0,47	517,94	548,94		
				0	0,05	480,04	511,04		
						442,14	473,14		
						404,24	435,24		
						366,34	397,35		
						328,44	359,45		
						290,54	321,55		
						252,64	283,65		
						214,75	245,75		
						176,85	207,85		
						138,95	169,95		
						101,05	132,05		
						63,15	94,15		
						25,25	56,25		
						0	22,04		
						0	2,95		



Como se puede observar en los distintos tránsitos, se produce una atenuación entre el caudal pico del hidrograma de entrada y el de salida, siendo este último siempre menor que el de entrada. También se produce un retardo en el tiempo, es decir el caudal pico de salida siempre se produce a incrementos temporales posteriores a los de entrada.



## 6.7. Estudio de las diferentes variables y parámetros del método de tránsito

En este apartado se pretende analizar las variaciones que se producen en los resultados finales del método, para distintas estimaciones del parámetro  $K$ , manteniendo constante el parámetro  $X = 0,2$ .

- Estimación de un  $K$  medio para cada tramo.
- Estimación de  $K$  con un valor igual al tiempo de concentración por la fórmula de Témez.
- Estimación de  $K$  con un valor igual al tiempo de concentración por la fórmula de Kirpich
- Estimación de  $K$  con un valor igual al tiempo de concentración por la fórmula de Giandotti.

### 6.7.1. Estimación de un $K$ medio

En este apartado lo que se ha realizado es una estimación media entre el valor máximo y el mínimo de  $K$  obtenido en cada tramo del tránsito. En el siguiente cuadro resumen se muestran los valores que  $K$  adquiere para cada tramo.

valores de $K$ (h)	tramo 5	tramo 6	tramo 7a	tramo 7b	tramo 7c
máximo	1,2299	0,777	0,4924	0,3906	1,197
mínimo	0,789	0,4942	0,3109	0,2454	0,7508
medio	1,0095	0,6356	0,4017	0,3180	0,9739

Determinado el valor de  $K$  y aplicando la formulación del Muskingum se obtienen los distintos resultados, a continuación se muestra de forma resumida los caudales picos de entrada y salida que se producen en los distintos tramos, para cada período de retorno. En el Anejo 5 se pueden consultar todos los cálculos de los distintos períodos de retorno de forma más detallada.

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 5.</b>			
<b>L = 4812,85 m      J = 0,00727</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	67,6	58,5	1,0095
10 años	108,1	93,5	1,0095
50 años	216,5	187,3	1,0095
100 años	268,5	232,3	1,0095
200 años	323,3	279,5	1,0095
500 años	399,2	345,4	1,0095

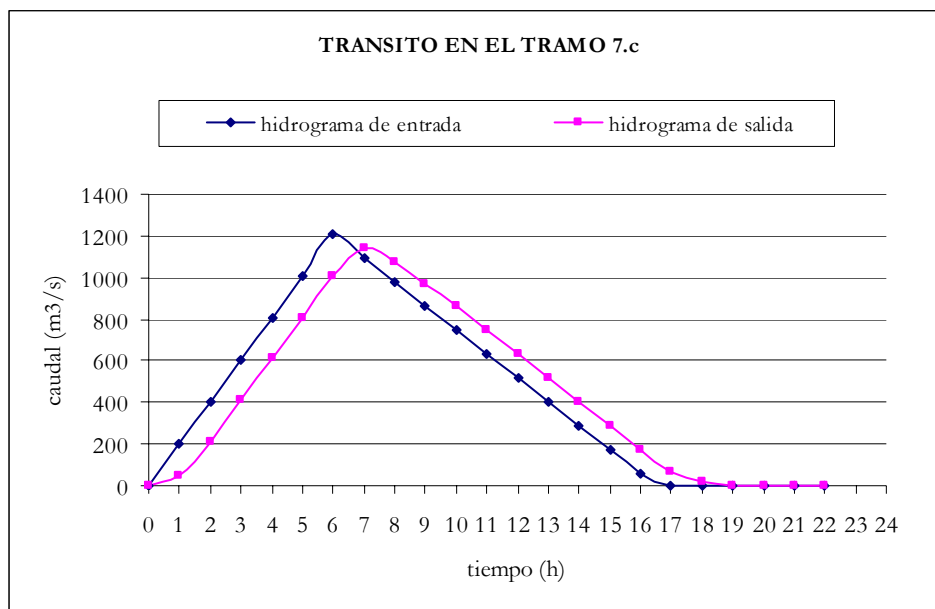
<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 6.</b>			
<b>L = 2237,44 m      J = 0,00134</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	171,6	163,8	0,6356
10 años	273,6	261,8	0,6356
50 años	546,4	524,3	0,6356
100 años	677,9	650,9	0,6356
200 años	815,7	783,7	0,6356
500 años	1006,8	968,0	0,6356

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.a</b>			
<b>L = 2932,81 m      J = 0,00580</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	190,1	186,1	0,4017
10 años	306,2	299,6	0,4017
50 años	618,4	605,2	0,4017
100 años	769,4	754,5	0,4017
200 años	928,1	910,2	0,4017
500 años	1148,7	1126,5	0,4017

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.b</b>			
<b>L = 3698,92 m      J = 0,00406</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	203,5	198,4	0,3180
10 años	337,6	325,5	0,3180
50 años	662,9	646,3	0,3180
100 años	826,5	808,2	0,3180
200 años	997,1	975,0	0,3180
500 años	1234,4	1207,0	0,3180

TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.c			
L = 5807,06 m      J = 0,00431			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado(m³/s)	K (h)
5 años	198,4	186,1	0,9739
10 años	325,5	306,6	0,9739
50 años	646,3	607,2	0,9739
100 años	808,2	761,2	0,9739
200 años	975,0	918,4	0,9739
500 años	1207,0	1136,8	0,9739

A continuación se muestra la representación gráfica del tránsito 5 (tramo 7.c) para el período de retorno de 500 años.



#### 6.7.2. Estimación de K con un valor igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Témez

En este apartado la estimación de K (horas) se ha realizado a través del tiempo de concentración definido por la fórmula de Témez.

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

Donde :

$L$  = longitud (km)

$J$  = pendiente (m/m)

En dicha fórmula los parámetros que intervienen son la longitud y la pendiente por lo que para cada tramo se ha obtenido un valor distinto para  $K$ , que será constante para los distintos períodos de retorno. A continuación se muestra los resultados obtenidos para cada tramo en el siguiente cuadro:

ESTIMACIÓN DE K CON LA FÓRMULA DE TEMEZ			
	LONGITUD (km)	PENDIENTE	K = tc (h)
TRAMO 5	4,81	0,00727	2,5237
TRAMO 6	2,24	0,00134	1,9442
TRAMO 7.a	2,93	0,00580	1,8082
TRAMO 7.b	3,70	0,00406	2,3085
TRAMO 7.c	5,81	0,00431	3,2157

Determinado el valor de  $K$  en cada tramo y aplicando la formulación del Muskingum se obtienen los distintos tránsitos. A continuación se muestra de forma resumida los caudales picos de entrada y salida que se producen en los distintos tramos para cada período de retorno. En el Anejo 6 se pueden consultar todos los cálculos de los distintos períodos de retorno de forma más detallada.

TRÁNSITO EN EL TRAMO 5.			
L = 4812,85 m      J = 0,00727			
Período de Retorno	Q. entrada(m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	67,6	46,2	2,5237
10 años	108,1	73,8	2,5237
50 años	216,5	147,8	2,5237
100 años	268,5	183,3	2,5237
200 años	323,3	220,3	2,5237
500 años	399,2	272,5	2,5237

TRÁNSITO EN EL TRAMO 6.			
L = 2237,44 m      J = 0,00134			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	147,3	123,5	1,9442
10 años	235,7	202,2	1,9442
50 años	472,3	409,9	1,9442
100 años	586,6	509,1	1,9442
200 años	706,4	613,1	1,9442
500 años	872,7	760,6	1,9442

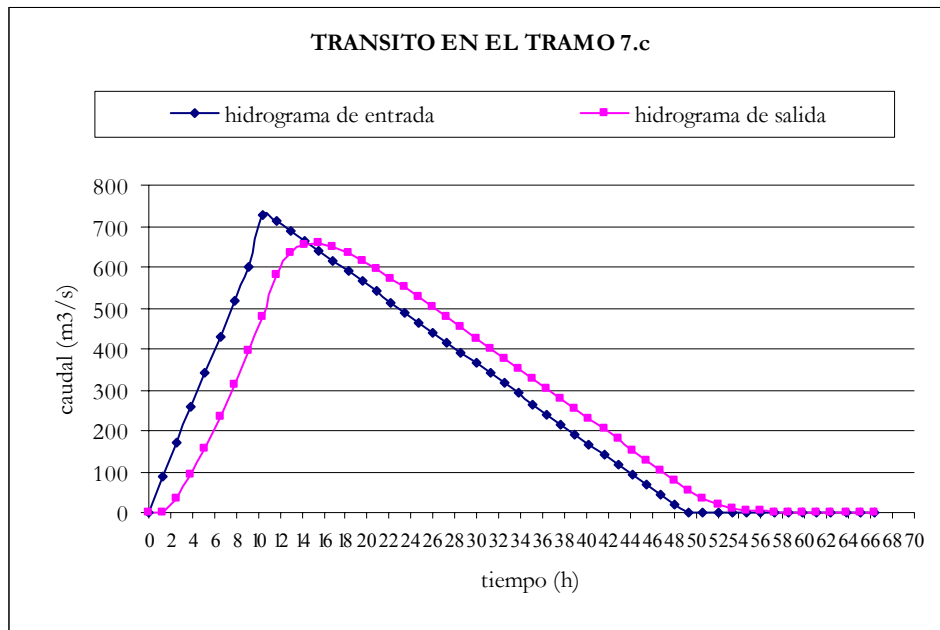
Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.a</b>			
<b>L = 2932,81 m      J = 0,00580</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	139,9	127,9	1,8082
10 años	226,5	209,6	1,8082
50 años	459,2	449,3	1,8082
100 años	571,3	529,7	1,8082
200 años	689,0	638,9	1,8082
500 años	853,9	792,5	1,8082

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.b</b>			
<b>L = 3698,92 m      J = 0,00406</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	131,1	116,6	2,3085
10 años	213,0	190,7	2,3085
50 años	473,2	422,4	2,3085
100 años	538,0	484,2	2,3085
200 años	649,3	585,2	2,3085
500 años	804,8	726,6	2,3085

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.c</b>			
<b>L = 5807,06 m      J = 0,00431</b>			
Período de Retorno	Q. entrada (m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	116,6	102,8	3,2157
10 años	190,7	169,8	3,2157
50 años	417,4	376,7	3,2157
100 años	484,2	434,5	3,2157
200 años	585,2	529,5	3,2157
500 años	726,6	658,4	3,2157

A continuación se muestra la representación gráfica del tránsito 5 (tramo 7.c) para el período de retorno de 500 años.



### 6.7.3. Estimación de $K$ con un valor igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Kirpich

En este apartado la estimación de  $K$  (minutos) se ha realizado a través del tiempo de concentración definido por la fórmula de Kirpich.

$$K = 0,0078 \times L^{0,77} \times J^{-0,385} \quad (32)$$

donde:

$L$  = longitud (pies)

$J$  = pendiente (m/m)

Al igual que en la fórmula de Témez los parámetros que intervienen son la longitud y la pendiente, obteniendo así un determinado valor de  $K$  para cada tramo, que será constante para cada período de retorno. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada tramo, en el siguiente cuadro:

ESTIMACIÓN DE K CON LA FÓRMULA DE KIRPICH				
	LONGITUD (pies)	PENDIENTE	K = t <sub>c</sub> (minutos)	K = t <sub>c</sub> (h)
TRAMO 5	15786,15	0,00727	88,7209	1,4787
TRAMO 6	7338,80	0,00134	94,3167	1,5719
TRAMO 7.a	9619,60	0,00580	66,1160	1,1019
TRAMO 7.b	12132,46	0,00406	90,7087	1,5118
TRAMO 7.c	19047,14	0,00431	125,4526	2,0909

Determinado el valor de  $K$  en cada tramo y aplicando la formulación del Muskingum se obtienen los distintos tránsitos. A continuación se muestra de forma resumida los caudales picos de entrada y salida que se producen en los distintos tramos para cada período de retorno. En el Anejo 7 se pueden consultar todos los cálculos de los distintos períodos de retorno de forma más detallada.

TRÁNSITO EN EL TRAMO 5.			
L = 4812,85 m J = 0,00727			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	67,6	56,2	1,4787
10 años	108,1	89,7	1,4787
50 años	216,5	179,8	1,4787
100 años	268,5	223,0	1,4787
200 años	323,3	268,3	1,4787
500 años	399,2	331,5	1,4787

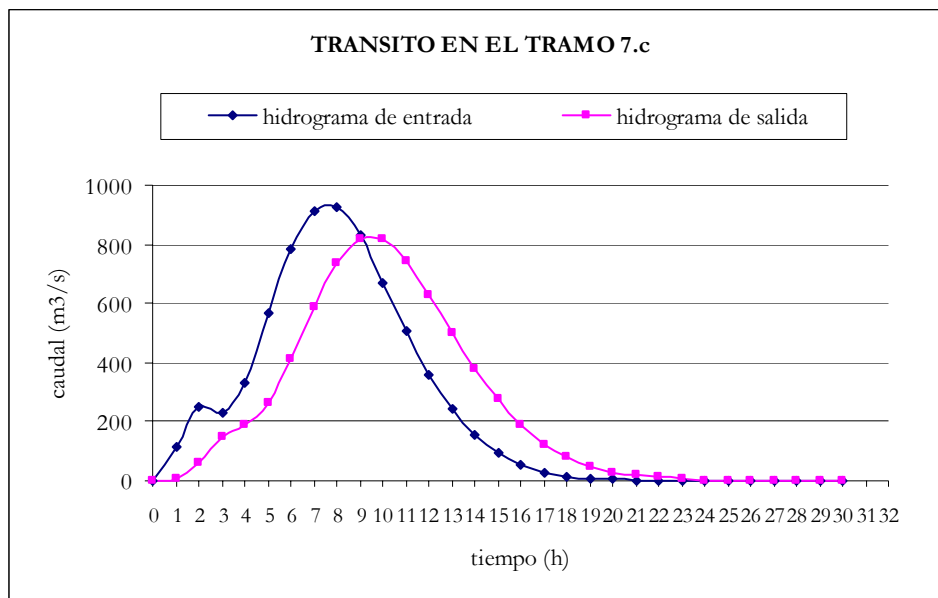
TRÁNSITO EN EL TRAMO 6.			
L = 2237,44 m J = 0,00134			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	164,2	140,5	1,5719
10 años	261,9	225,2	1,5719
50 años	523,0	452,6	1,5719
100 años	648,8	562,5	1,5719
200 años	780,7	677,6	1,5719
500 años	963,6	837,8	1,5719

TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.a			
L = 2932,81 m J = 0,00580			
Período de Retorno	Q. entrada (m³/s)	Q. transitado (m³/s)	K (h)
5 años	164,1	153,5	1,1019
10 años	264,3	247,6	1,1019
50 años	534,2	500,9	1,1019
100 años	664,6	623,4	1,1019
200 años	801,7	752,2	1,1019
500 años	992,3	931,3	1,1019

TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.b			
L = 3698,92 m      J = 0,00406			
Período de Retorno	Q. entrada (m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	167,0	151,9	1,5118
10 años	269,4	245,3	1,5118
50 años	545,5	497,0	1,5118
100 años	679,0	618,9	1,5118
200 años	819,4	747,0	1,5118
500 años	1014,7	925,4	1,5118

TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.c			
L = 5807,06 m      J = 0,00431			
Período de Retorno	Q. entrada (m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	151,9	134,3	2,0909
10 años	245,3	217,1	2,0909
50 años	497,0	440,3	2,0909
100 años	618,9	548,4	2,0909
200 años	747,0	662,0	2,0909
500 años	925,4	820,2	2,0909

A continuación se muestra la representación gráfica del tránsito 5 (tramo 7.c) para el período de retorno de 500 años.





6.7.4. Estimación de  $K$  con un valor igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Giandotti

En este apartado la estimación de  $K$  (horas) se ha realizado a través del tiempo de concentración definido por la fórmula de Giandotti.

$$K = 4\sqrt{A} + 1,5 \times L / 0,8\sqrt{\Delta H} \quad (33)$$

donde:

$A$  = área (km<sup>2</sup>)

$L$  = longitud (km)

$\Delta H$  = desnivel (m)

Si analizamos esta fórmula el parámetro del área hace referencia a que la estimación del tiempo de concentración es un único valor por unidad de estudio (cuenca, subcuenca o intercuenca), por lo que para su utilización se ha estimado un área de influencia en cada tramo como se muestra en la figura 21.

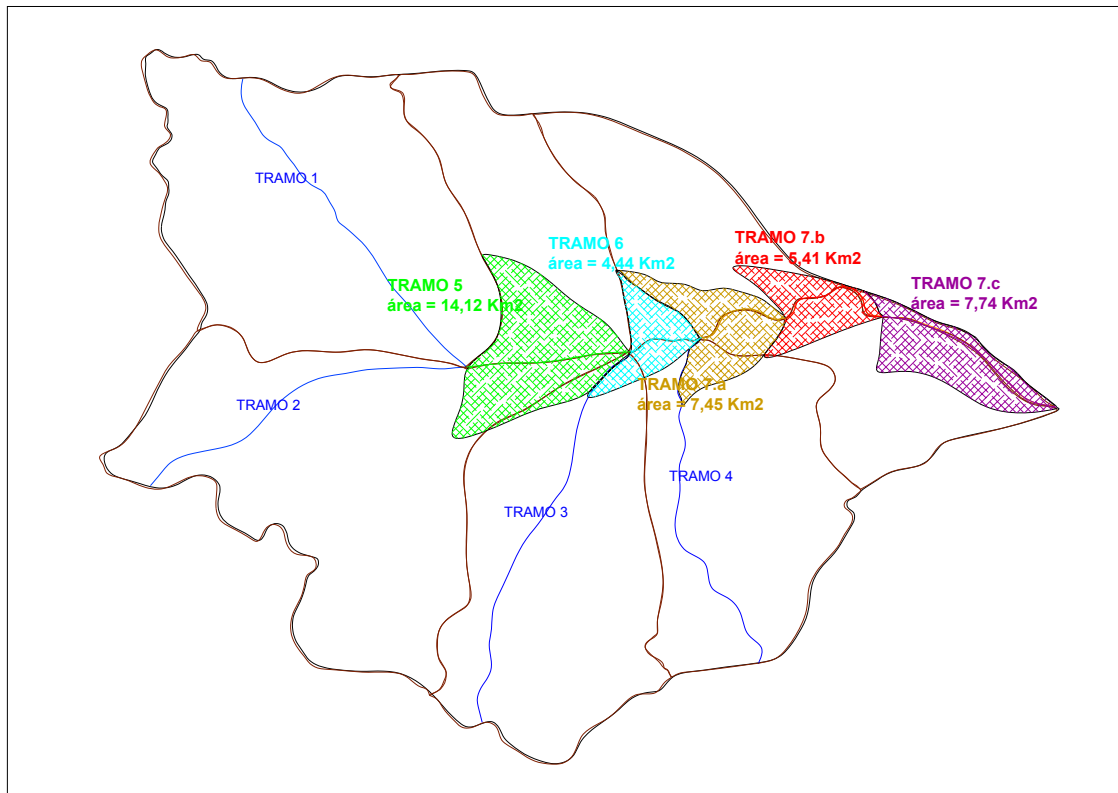


Figura 21. Áreas de influencia en los distintos tramos.

En el siguiente cuadro resumen se muestran los resultados obtenidos para cada tramo.

ESTIMACIÓN DE K CON LA FÓRMULA DE GIANDOTTI				
	ÁREA (Km²)	LONGITUD (Km)	DESNIVEL (m)	K = t <sub>c</sub> (h)
TRAMO 5	14,12	4,81	35	4,7010
TRAMO 6	4,44	2,24	3	8,5033
TRAMO 7.a	7,45	2,93	17	4,6445
TRAMO 7.b	5,41	3,70	15	4,7933
TRAMO 7.c	7,74	5,81	25	4,9595

Determinado el valor de  $K$  en cada tramo y aplicando la formulación del Muskingum se obtienen los distintos tránsitos. A continuación se muestra de forma resumen los caudales picos de entrada y salida que se producen en los distintos tramos para cada período de retorno. En el Anejo 8 se pueden consultar todos los cálculos de los distintos períodos de retorno de forma más detallada.

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 5.</b>			
<b>L = 4812,85 m      J = 0,00727</b>			
Período de Retorno	Q. entrada(m³/s)	Q. transitado(m³/s)	K (h)
5 años	67,6	37,4	4,7010
10 años	108,1	59,8	4,7010
50 años	216,5	119,7	4,7010
100 años	268,5	148,5	4,7010
200 años	323,3	178,7	4,7010
500 años	399,2	220,7	4,7010

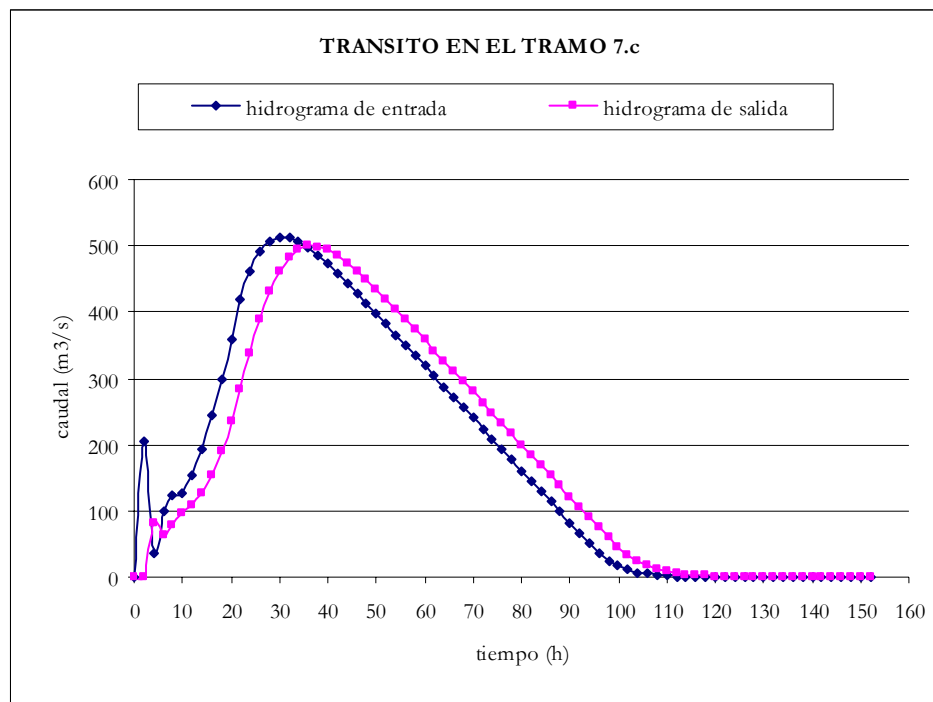
<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 6.</b>			
<b>L = 2237,44 m      J = 0,00134</b>			
Período de Retorno	Q. entrada(m³/s)	Q. transitado(m³/s)	K (h)
5 años	140,9	93,5	8,5033
10 años	224,9	151,3	8,5033
50 años	450,1	306,5	8,5033
100 años	558,2	384,1	8,5033
200 años	671,9	469,3	8,5033
500 años	829,5	579,4	8,5033

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.a</b>			
<b>L = 2932,81 m      J = 0,00580</b>			
Período de Retorno	Q. entrada(m³/s)	Q. transitado(m³/s)	K (h)
5 años	93,5	84,2	4,6445
10 años	151,3	136,6	4,6445
50 años	306,5	278,6	4,6445
100 años	384,1	350,1	4,6445
200 años	469,3	430,9	4,6445
500 años	579,4	533,0	4,6445

<b>TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.b</b>			
<b>L = 3698,92 m      J = 0,00406</b>			
Período de Retorno	Q. entrada(m³/s)	Q. transitado(m³/s)	K (h)
5 años	84,2	80,5	4,7933
10 años	136,6	131,0	4,7933
50 años	278,6	268,0	4,7933
100 años	350,1	337,2	4,7933
200 años	430,9	414,9	4,7933
500 años	533,0	513,8	4,7933

TRÁNSITO EN EL TRAMO 7.c			
L = 5807,06 m      J = 0,00431			
Período de Retorno	Q. entrada(m <sup>3</sup> /s)	Q. transitado(m <sup>3</sup> /s)	K (h)
5 años	80,5	77,8	4,9595
10 años	131,0	126,7	4,9595
50 años	268,0	259,8	4,9595
100 años	337,2	327,3	4,9595
200 años	414,9	402,8	4,9595
500 años	513,8	499,4	4,9595

A continuación se muestra la representación gráfica del tránsito 5 (tramo 7.c) para el período de retorno de 500 años.



## 6.8. Comprobación y contraste con el modelo HEC – HMS

El HEC – HMS es un programa desarrollado por el U. S. Army Corps of Engineer de los Estados Unidos, configurado como un modelo de tipo agregado, dentro de las alternativas existentes para la modelización hidrológica, capaz de simular eventos aislados o procesos continuos. Es capaz de representar esquemáticamente la morfología de la cuenca y las características de su red de drenaje, presenta diferentes posibilidades a la hora de modelar los diversos componentes que intervienen en el proceso de transferencia lluvia-caudal.

Con el programa se han calculado los distintos caudales de salida en cada período de retorno para el estudio de la cuenca completa y para una desagregación de la misma en subcuencas

#### 1. Modelado de la cuenca.

Con objeto de poder representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca, es preciso en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma, que refleje, su morfología y las características de su red de drenaje. Para los estudios realizados el esquema de la cuenca queda representado como a continuación se muestra en la figura 22 para la cuenca completa y en la figura 23 en el caso de una desagregación de la misma.

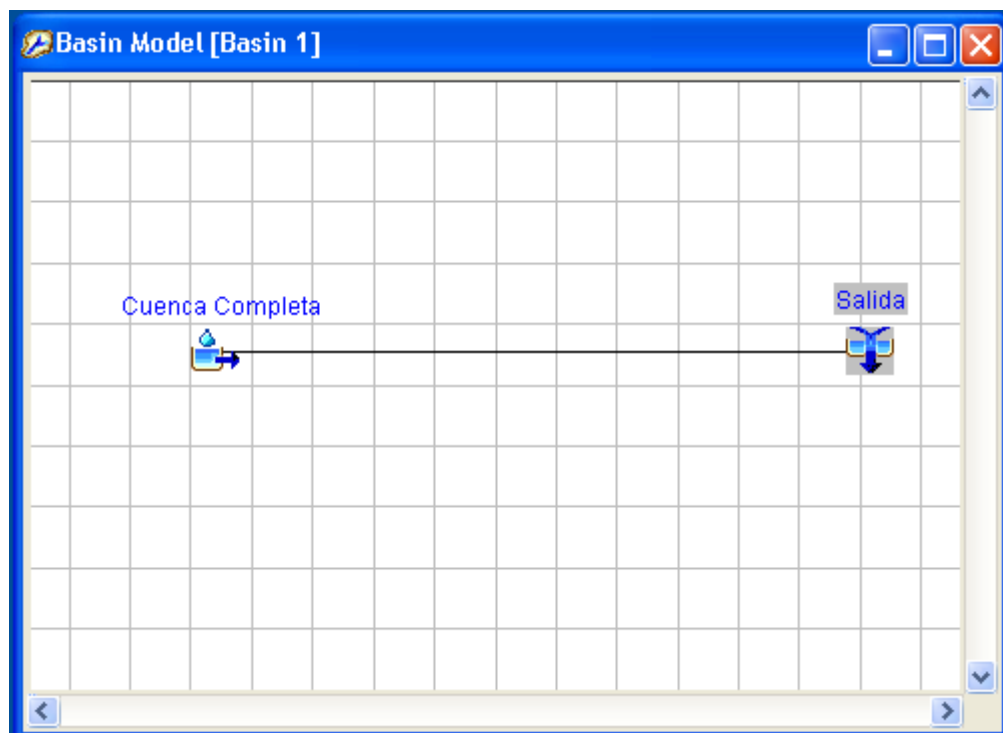
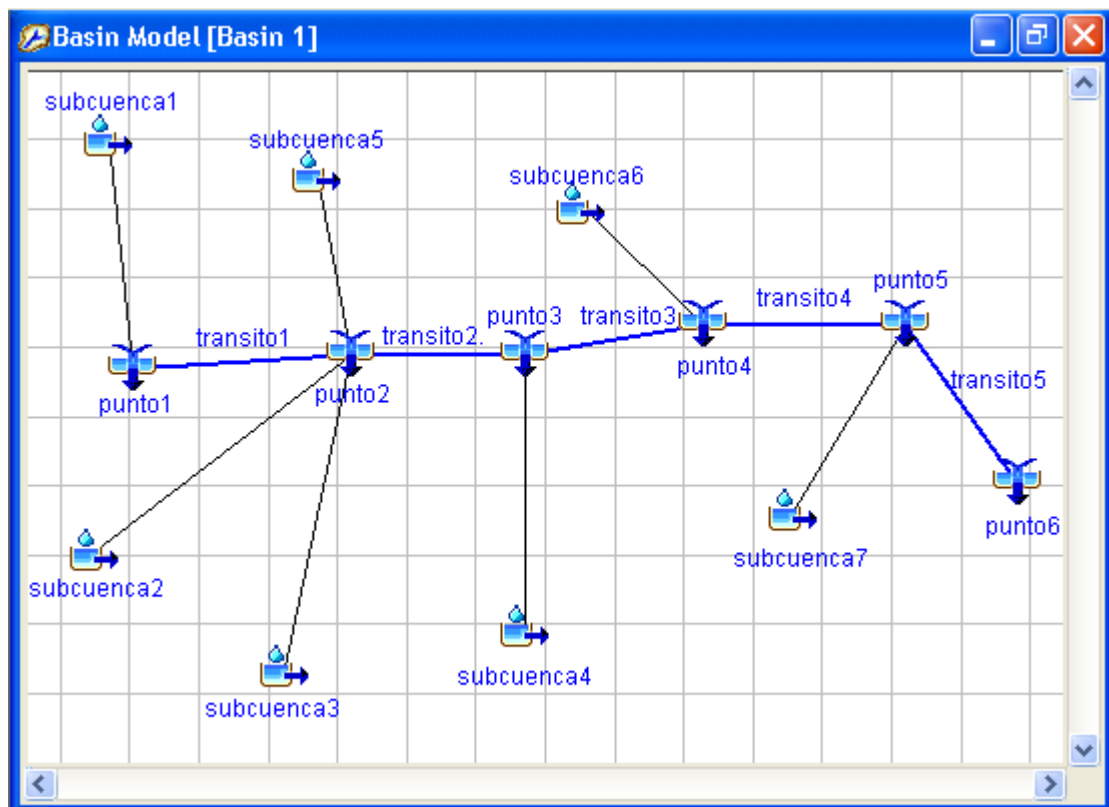


Figura 22. Esquema generado por el HEC-HMS para la cuenca completa



Nota: la intercuenca 5, 6 y 7 son las subcuencas 5, 6 y 7 en este esquema.

Figura 23. Esquema generado por el HEC-HMS para la cuenca desagregada

En la figura 22 se observa que el esquema esta formado por la cuenca y el punto de salida donde se evalúa el caudal de referencia. Mientras que en la figura 23 la cuenca esta formada por 7 subcuencas, 5 tramos de cauce o tránsito y 6 puntos de confluencia.

Como indican los manuales del programa las subcuencas no reciben ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformando el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadiendo el flujo base. Los tramos de tránsito se caracterizan porque reciben uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente, este tipo de elementos se suelen utilizar para representar tramos de ríos o arroyos en los que se produce el tránsito de un determinado hidrograma. Mientras que los puntos de confluencia se caracterizan porque reciben uno o varios flujos entrantes y dan lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma, permiten representar la

confluencia de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

## 2. Modelado de los componentes del proceso.

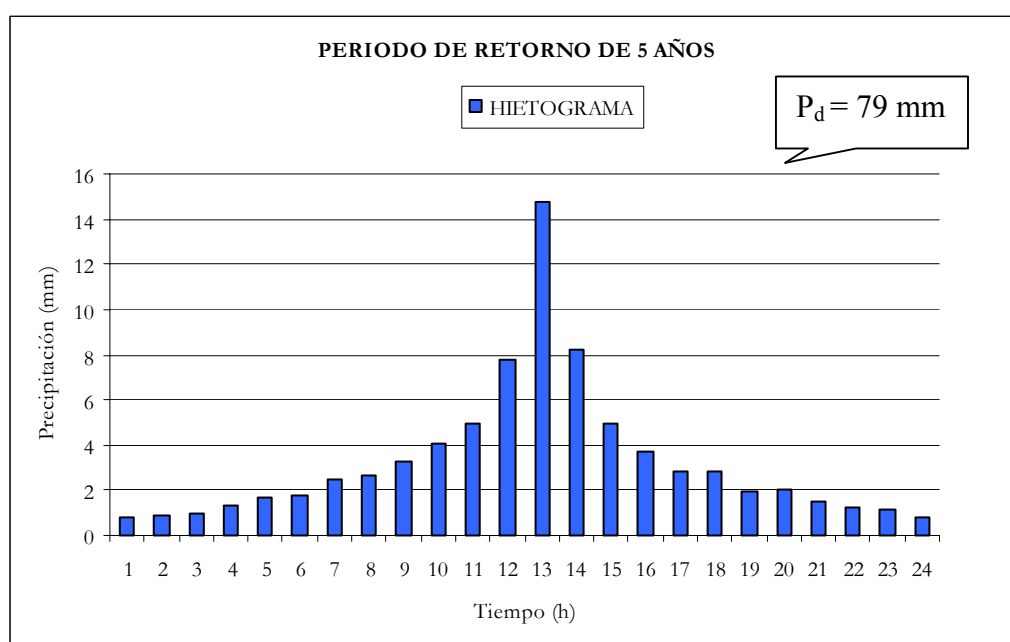
Ante la imposibilidad de abordar de manera global la modelización del proceso de transferencia lluvia-caudal, se suele optar generalmente por analizar, de manera individualizada, diferentes aspectos parciales del proceso, criterio adoptado por el HEC-HMS.

- Precipitación.

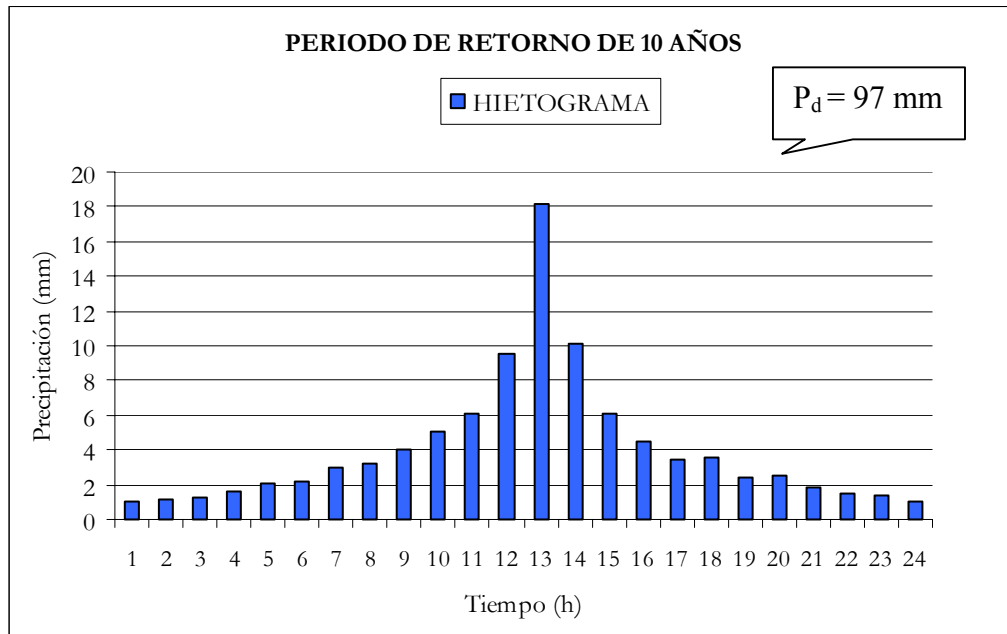
Para el establecimiento de la precipitación se ha determinado un hietograma definido por el usuario, basado en el análisis estadístico llevado a cabo sobre registros históricos en pluviómetros o pluviógrafos representativos. En este caso hemos partido de los valores de precipitación máxima diaria para cada período de retorno obtenidos en el apartado 6.3 y se ha creado una distribución de esta precipitación para obtener el hietograma conforme a uno de los patrones de distribución de Huff.

A continuación se adjunta los hietogramas correspondientes a los diferentes períodos de retorno.

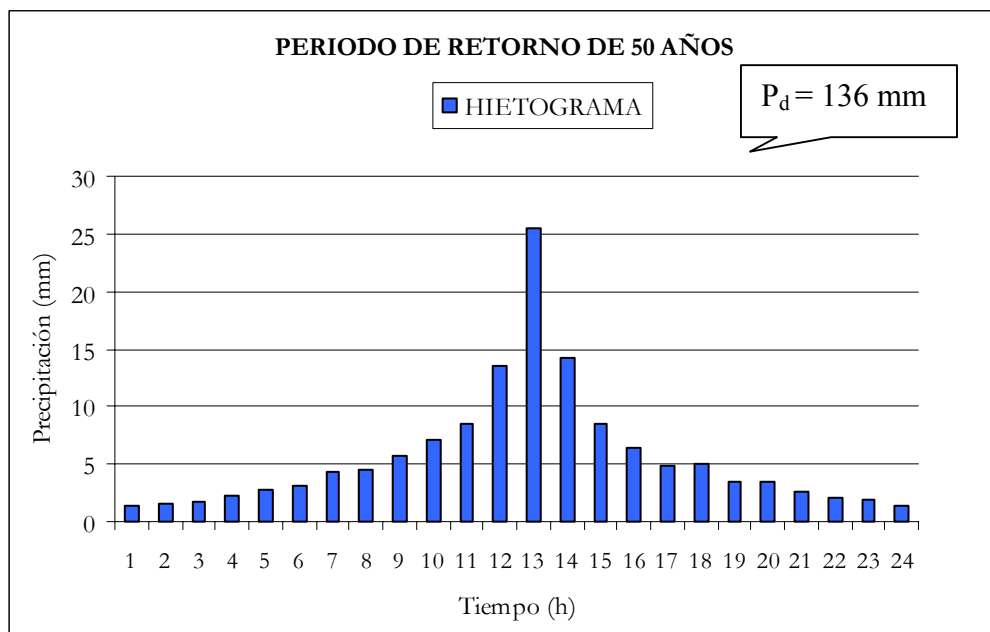
- Período de retorno de 5 años.



- Período de retorno de 10 años.

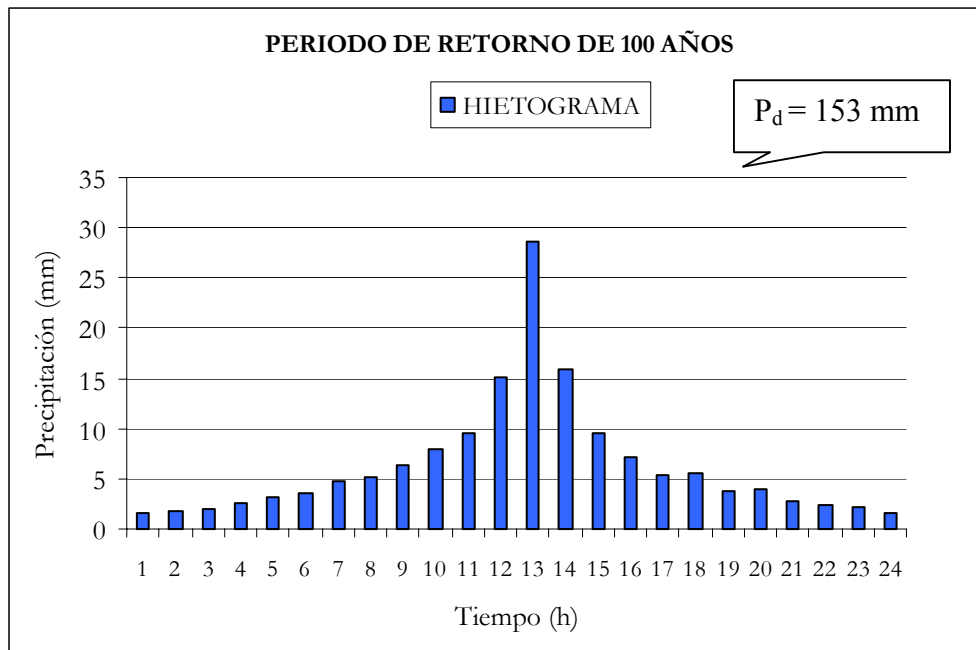


- Período de retorno de 50 años.

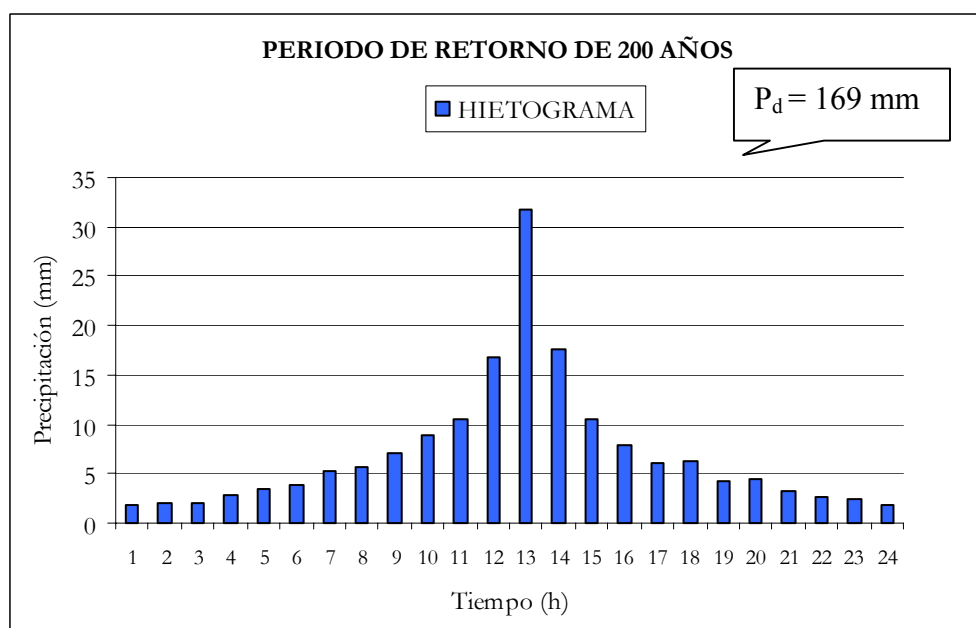




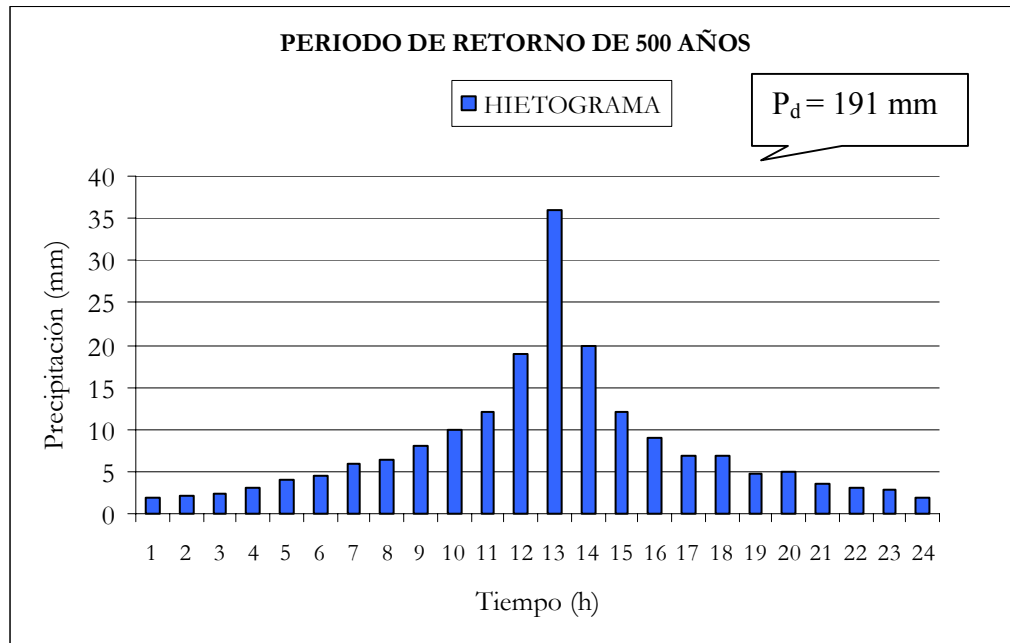
- Período de retorno de 100 años.



- Período de retorno de 200 años.



- Período de retorno de 500 años.



El hietograma por período de retorno se ha aplicado el mismo para las distintas subcuencas.

- Volumen total disponible para escorrentía.

El volumen total de agua disponible para escorrentía superficial es el resultado de descontar de la precipitación total, el agua interceptada por la vegetación, infiltrada en el suelo, almacenada en la superficie del mismo, evaporada desde diferentes superficies o transpiradas a través de las plantas.

El programa contempla diferentes alternativas a la hora de cuantificar estas pérdidas. En este estudio se ha utilizado el concepto del número de curva (CN), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de suelo y el contenido de humedad previo al episodio lluvioso que se considera.

Los parámetros que definen este método son:

- Sustracción inicial (mm)

Que se define como  $I_a = 0,2 \times S$

Siendo  $S$  el coeficiente de retención potencial máximo de la cuenca y cuya relación con el número de curva es  $S = \frac{25400 - 254 \times CN}{CN}$

Los valores obtenidos para estos parámetros en el caso de la cuenca completa y la desagregación en subcuencas son:

	CN	S (mm)	I <sub>a</sub> (mm)
<b>Cuenca Completa</b>	71	103,75	21
<b>Subcuenca 1</b>	73	93,94	19
<b>Subcuenca 2</b>	68	119,53	24
<b>Subcuenca 3</b>	76	80,21	16
<b>Subcuenca 4</b>	69	114,12	23
<b>Subcuenca 5</b>	70	108,86	22
<b>Subcuenca 6</b>	71	103,75	21
<b>Subcuenca 7</b>	70	108,86	22

- Número de Curva.

Definido como  $CN = \frac{5000}{50 + P_o}$

Siendo  $P_o$  el umbral de escorrentía definido en el apartado 6.4 de este texto.

Los valores obtenidos para este parámetro se muestran en el siguiente cuadro

	P <sub>o</sub> (mm)	CN
<b>Cuenca Completa</b>	20,88	71
<b>Subcuenca 1</b>	18,61	73
<b>Subcuenca 2</b>	23,6	68
<b>Subcuenca 3</b>	15,43	76
<b>Subcuenca 4</b>	22,73	69
<b>Subcuenca 5</b>	21,21	70
<b>Subcuenca 6</b>	20,37	71
<b>Subcuenca 7</b>	21,19	70

- Terreno impermeable (%).

Este parámetro corresponde al porcentaje de zona impermeable existente en cada subcuenca. Para este estudio se ha estimado un porcentaje del 5%, debido a que la información cartográfica de usos del suelo no esta actualizada y no recoge los cambios producidos por el aumento de urbanizaciones, carreteras, etc.

- Escorrentía superficial.

Referente a la escorrentía superficial y su concentración en un determinado punto del cauce. El programa contempla dos posibilidades, basadas en modelos de tipo empírico o conceptual. Dentro de los modelos empíricos, todos ellos en mayor o menor medida están basados en el hidrograma unitario de Sherman en 1.932, el programa permite varias opciones, pero en este estudio el modelo utilizado ha sido el Hidrograma del Soil Conservation Service.

El parámetro que pide este modelo es el tiempo de retardo que es igual a  $0,6 \times t_c$ , cuyo valor para la cuenca completa y para las distintas subcuencas se muestran en el siguiente cuadro.

Tiempo de retardo (minutos)	
Cuenca Completa	325,4
Subcuenca 1	129,2
Subcuenca 2	213,7
Subcuenca 3	137,5
Subcuenca 4	150,9
Subcuenca 5	113,7
Subcuenca 6	144,8
Subcuenca 7	66,4

- Flujo base.

Tiene su origen en la precipitación registrada sobre la cuenca en períodos precedentes, que se han almacenado temporalmente en capas más o menos profundas, e incluye el flujo subsuperficial asociado al período actual. En este estudio el flujo base no ha sido considerado, dado que el método de la Instrucción no lo considera en el cálculo.

- Tránsito del hidrograma por el cauce.

El programa presenta distintos modelos a la hora de tratar de representar la transformación que experimenta el hidrograma entre los puntos inicial y final de un tramo de cauce. En este estudio el modelo utilizado ha sido el de Muskingum-Cunge. Los parámetros que utiliza para

definir este modelo son la longitud, la pendiente, el coeficiente de Manning y la forma de la sección transversal del tramo de cauce. Esto se ha aplicado para el caso de la desagregación de la cuenca en subcuencas.

Este es el método que se ha aplicado en el modelo HEC-HMS. Combina métodos hidráulicos con la simplicidad del método de Muskingum, donde para calcular los valores de  $K$  y  $X$  se determinan en base a las características del canal y al caudal de flujo circulante. La formulación que define a estos parámetros es la siguiente:

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

donde:

$\Delta x$  = longitud del tramo de cauce considerado

$c$  = celeridad = *velocidad media*  $\times m$

$m \sim 5/3$  para cauces naturales amplios

y

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{B \times S_0 \times c \times \Delta x} \right)$$

donde:

$S_0$  = pendiente media del cauce

$Q$  = caudal

$B$  = ancho de la superficie libre del cauce.

- Resultados para la cuenca completa.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el caso de estudio de la cuenca completa (figura 22), donde en el gráfico de la cuenca aparece el hietograma correspondiente para el período de retorno calculado, las pérdidas que se producen y el hidrograma que se genera. Al no haber tránsito para este caso de estudio, el hidrograma que sale de la cuenca es el mismo que entra en el punto de confluencia

A continuación se adjunta el cuadro resumen con los cálculos por incrementos temporales y el gráfico del hidrograma para el período de retorno de 500 años.

En el Anejo 9 se adjuntan los resultados para los restantes períodos de retorno.

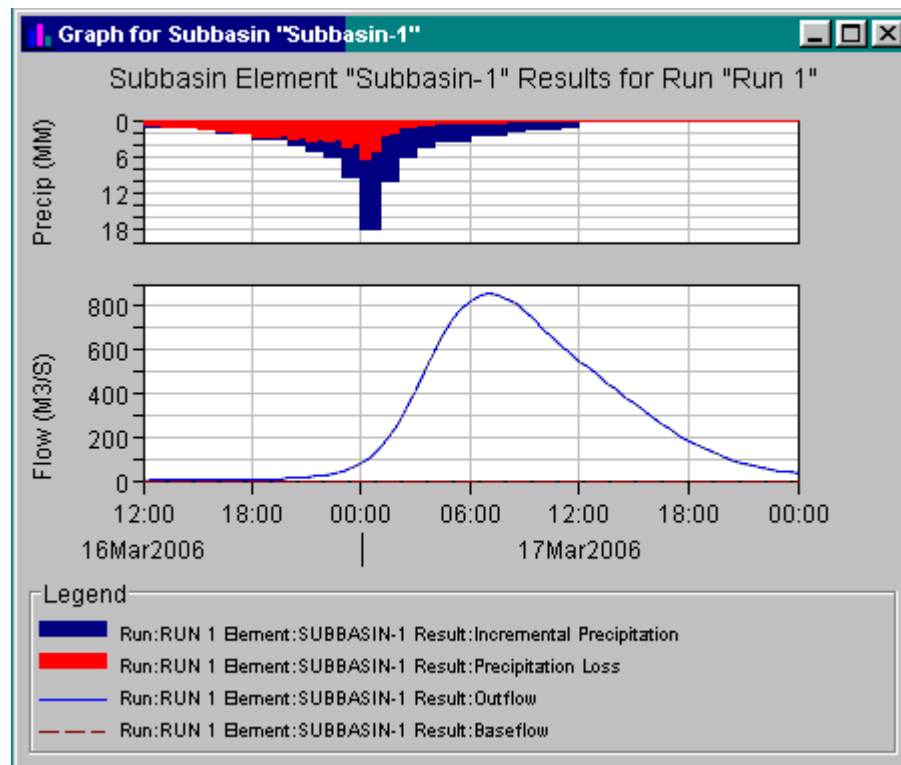
Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y  
aplicación a una cuenca mediterránea.

Período de retorno de 500 años

CUENCA COMPLETA							
Date	Time	Precip (mm)	Loss (mm)	Exceso (mm)	Direct flow (m <sup>3</sup> /s)	Base flow (m <sup>3</sup> /s)	Total flow (m <sup>3</sup> /S)
16-mar-06	12:00				0	0	0
16-mar-06	12:30	0,996	0,947	0,05	0,016	0	0,016
16-mar-06	13:00	0,996	0,947	0,05	0,066	0	0,066
16-mar-06	13:30	1,096	1,041	0,055	0,162	0	0,162
16-mar-06	14:00	1,096	1,041	0,055	0,318	0	0,318
16-mar-06	14:30	1,196	1,136	0,06	0,553	0	0,553
16-mar-06	15:00	1,196	1,136	0,06	0,887	0	0,887
16-mar-06	15:30	1,594	1,514	0,08	1,337	0	1,337
16-mar-06	16:00	1,594	1,514	0,08	1,897	0	1,897
16-mar-06	16:30	1,992	1,893	0,1	2,556	0	2,556
16-mar-06	17:00	1,992	1,893	0,1	3,303	0	3,303
16-mar-06	17:30	2,192	2,082	0,11	4,126	0	4,126
16-mar-06	18:00	2,192	2,082	0,11	5,025	0	5,025
16-mar-06	18:30	2,989	2,839	0,15	6,001	0	6,001
16-mar-06	19:00	2,989	2,754	0,235	7,081	0	7,081
16-mar-06	19:30	3,188	2,773	0,416	8,351	0	8,351
16-mar-06	20:00	3,188	2,616	0,572	9,934	0	9,934
16-mar-06	20:30	3,986	3,07	0,915	12,04	0	12,04
16-mar-06	21:00	3,986	2,868	1,117	14,946	0	14,946
16-mar-06	21:30	4,982	3,33	1,651	19,087	0	19,087
16-mar-06	22:00	4,982	3,077	1,904	24,973	0	24,973
16-mar-06	22:30	5,978	3,398	2,58	33,215	0	33,215
16-mar-06	23:00	5,978	3,114	2,864	44,417	0	44,417
16-mar-06	23:30	9,466	4,432	5,034	59,674	0	59,674
17-mar-06	0:00	9,466	3,914	5,551	80,144	0	80,144
17-mar-06	0:30	17,934	6,287	11,647	108,442	0	108,442
17-mar-06	1:00	17,934	5,148	12,786	147,585	0	147,585
17-mar-06	1:30	9,964	2,476	7,487	197,905	0	197,905
17-mar-06	2:00	9,964	2,25	7,714	259,337	0	259,337
17-mar-06	2:30	5,978	1,254	4,724	331,621	0	331,621
17-mar-06	3:00	5,978	1,188	4,79	413,332	0	413,332
17-mar-06	3:30	4,484	0,851	3,632	501,07	0	501,07
17-mar-06	4:00	4,484	0,819	3,664	588,488	0	588,488
17-mar-06	4:30	3,388	0,599	2,788	668,292	0	668,292
17-mar-06	5:00	3,388	0,583	2,805	735,757	0	735,757
17-mar-06	5:30	3,487	0,583	2,904	788,108	0	788,108
17-mar-06	6:00	3,487	0,567	2,92	825,2	0	825,2
17-mar-06	6:30	2,391	0,38	2,011	847,389	0	847,389
17-mar-06	7:00	2,391	0,373	2,018	854,696	0	<b>854,696</b>
17-mar-06	7:30	2,491	0,381	2,11	849,486	0	849,486
17-mar-06	8:00	2,491	0,374	2,117	833,72	0	833,72
17-mar-06	8:30	1,794	0,265	1,529	808,655	0	808,655
17-mar-06	9:00	1,794	0,261	1,532	775,259	0	775,259
17-mar-06	9:30	1,494	0,215	1,28	736,63	0	736,63
17-mar-06	10:00	1,494	0,213	1,282	696,899	0	696,899
17-mar-06	10:30	1,395	0,196	1,199	657,767	0	657,767
17-mar-06	11:00	1,395	0,194	1,201	620,093	0	620,093
17-mar-06	11:30	0,996	0,138	0,859	583,776	0	583,776
17-mar-06	12:00	0,996	0,137	0,86	548,967	0	548,967
17-mar-06	12:30	0	0	0	515,039	0	515,039
17-mar-06	13:00	0	0	0	481,905	0	481,905
17-mar-06	13:30	0	0	0	449,294	0	449,294
17-mar-06	14:00	0	0	0	416,852	0	416,852
17-mar-06	14:30	0	0	0	384,914	0	384,914
17-mar-06	15:00	0	0	0	353,207	0	353,207
17-mar-06	15:30	0	0	0	321,897	0	321,897
17-mar-06	16:00	0	0	0	290,903	0	290,903

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

17-mar-06	16:30	0	0	0	260,966	0	260,966
17-mar-06	17:00	0	0	0	232,52	0	232,52
17-mar-06	17:30	0	0	0	205,944	0	205,944
17-mar-06	18:00	0	0	0	181,359	0	181,359
17-mar-06	18:30	0	0	0	158,767	0	158,767
17-mar-06	19:00	0	0	0	138,379	0	138,379
17-mar-06	19:30	0	0	0	120,049	0	120,049
17-mar-06	20:00	0	0	0	103,825	0	103,825
17-mar-06	20:30	0	0	0	89,635	0	89,635
17-mar-06	21:00	0	0	0	77,5	0	77,5
17-mar-06	21:30	0	0	0	67,138	0	67,138
17-mar-06	22:00	0	0	0	58,207	0	58,207
17-mar-06	22:30	0	0	0	50,509	0	50,509
17-mar-06	23:00	0	0	0	43,837	0	43,837
17-mar-06	23:30	0	0	0	38,068	0	38,068
18-mar-06	0:00	0	0	0	33,009	0	33,009



El caudal de referencia para la cuenca completa es de 855 m<sup>3</sup>/s.

- Resultados cuenca desagregada en subcuencas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una desagregación de la cuenca en subcuencas (figura 23), para el período de retorno de 500 años, de forma representativa se va a mostrar la información que se proporciona para una subcuenca, un punto de confluencia, un tramo de tránsito y la información resultante evaluada a la salida de la cuenca.

En el Anejo 9 se muestra la información de los restantes períodos de retorno y con mayor detalle todos los cálculos que el programa proporciona para el de 500 años

Período de retorno de 500 años.

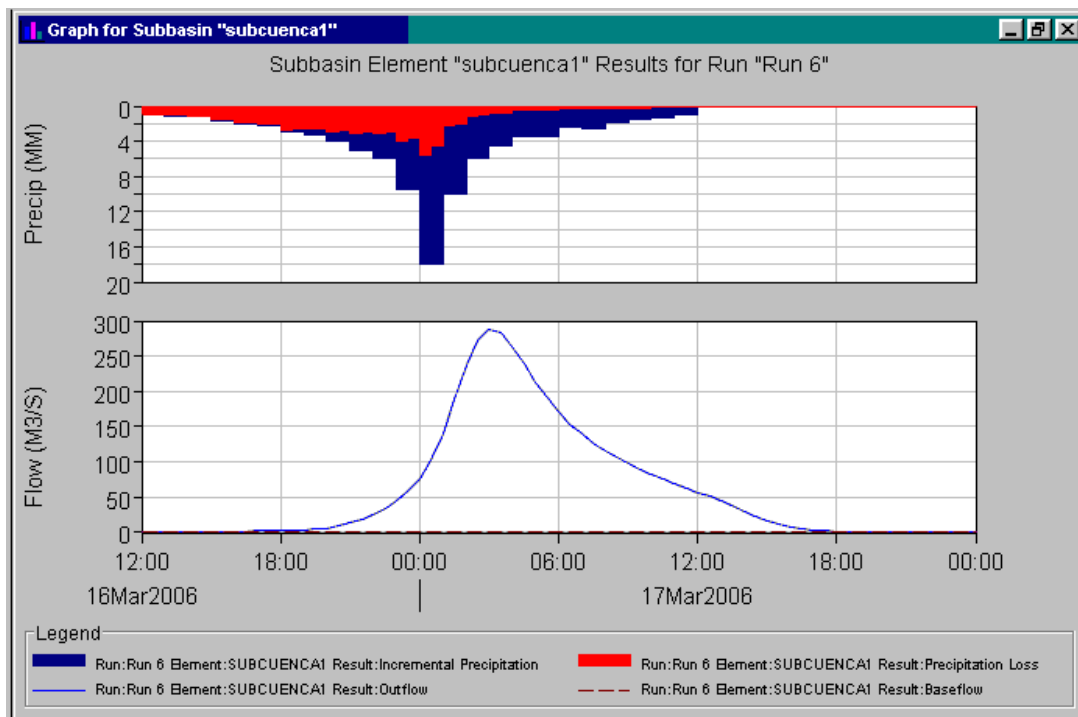
En el siguiente cuadro se muestra los cálculos que el programa proporciona para cada intervalo temporal para la subcuenca 1 y su gráfico correspondiente.

SUBCUENCA 1							
date	time	Precip (mm)	Loss (mm)	Excess (mm)	Direct flor (m <sup>3</sup> /s)	Baseflow (m <sup>3</sup> /s)	Total Flow (m <sup>3</sup> /s)
16-mar-06	12:00				0	0	0
16-mar-06	12:30	0,996	0,947	0,05	0,031	0	0,031
16-mar-06	13:00	0,996	0,947	0,05	0,129	0	0,129
16-mar-06	13:30	1,096	1,041	0,055	0,336	0	0,336
16-mar-06	14:00	1,096	1,041	0,055	0,623	0	0,623
16-mar-06	14:30	1,196	1,136	0,06	0,937	0	0,937
16-mar-06	15:00	1,196	1,136	0,06	1,235	0	1,235
16-mar-06	15:30	1,594	1,514	0,08	1,508	0	1,508
16-mar-06	16:00	1,594	1,514	0,08	1,746	0	1,746
16-mar-06	16:30	1,992	1,893	0,1	1,991	0	1,991
16-mar-06	17:00	1,992	1,893	0,1	2,254	0	2,254
16-mar-06	17:30	2,192	2,082	0,11	2,542	0	2,542
16-mar-06	18:00	2,192	2,082	0,11	2,836	0	2,836
16-mar-06	18:30	2,989	2,795	0,194	3,172	0	3,172
16-mar-06	19:00	2,989	2,634	0,355	3,687	0	3,687
16-mar-06	19:30	3,188	2,64	0,549	4,675	0	4,675
16-mar-06	20:00	3,188	2,48	0,709	6,439	0	6,439
16-mar-06	20:30	3,986	2,897	1,089	9,286	0	9,286
16-mar-06	21:00	3,986	2,693	1,293	13,353	0	13,353
16-mar-06	21:30	4,982	3,111	1,87	18,947	0	18,947
16-mar-06	22:00	4,982	2,86	2,122	26,102	0	26,102
16-mar-06	22:30	5,978	3,141	2,837	35,082	0	35,082
16-mar-06	23:00	5,978	2,864	3,114	45,791	0	45,791
16-mar-06	23:30	9,466	4,051	5,415	59,345	0	59,345
17-mar-06	0:00	9,466	3,553	5,912	76,598	0	76,598
17-mar-06	0:30	17,934	5,661	12,273	102,424	0	102,424
17-mar-06	1:00	17,934	4,593	13,341	139,925	0	139,925
17-mar-06	1:30	9,964	2,196	7,767	188,102	0	188,102
17-mar-06	2:00	9,964	1,988	7,976	237,28	0	237,28
17-mar-06	2:30	5,978	1,105	4,873	272,064	0	272,064
17-mar-06	3:00	5,978	1,045	4,933	286,934	0	286,934
17-mar-06	3:30	4,484	0,748	3,736	282,853	0	282,853
17-mar-06	4:00	4,484	0,719	3,765	264,23	0	264,23
17-mar-06	4:30	3,388	0,525	2,863	238,69	0	238,69



Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y  
aplicación a una cuenca mediterránea.

17-mar-06	5:00	3,388	0,51	2,878	213,618	0	213,618
17-mar-06	5:30	3,487	0,51	2,977	190,054	0	190,054
17-mar-06	6:00	3,487	0,495	2,992	170,066	0	170,066
17-mar-06	6:30	2,391	0,332	2,059	153,375	0	153,375
17-mar-06	7:00	2,391	0,325	2,066	139,518	0	139,518
17-mar-06	7:30	2,491	0,332	2,159	126,989	0	126,989
17-mar-06	8:00	2,491	0,326	2,165	116,016	0	116,016
17-mar-06	8:30	1,794	0,231	1,563	106,434	0	106,434
17-mar-06	9:00	1,794	0,227	1,566	97,932	0	97,932
17-mar-06	9:30	1,494	0,187	1,307	89,811	0	89,811
17-mar-06	10:00	1,494	0,185	1,31	82,294	0	82,294
17-mar-06	10:30	1,395	0,171	1,224	75,151	0	75,151
17-mar-06	11:00	1,395	0,169	1,226	68,522	0	68,522
17-mar-06	11:30	0,996	0,12	0,877	62,519	0	62,519
17-mar-06	12:00	0,996	0,119	0,878	57,237	0	57,237
17-mar-06	12:30	0	0	0	51,739	0	51,739
17-mar-06	13:00	0	0	0	45,551	0	45,551
17-mar-06	13:30	0	0	0	38,109	0	38,109
17-mar-06	14:00	0	0	0	30,14	0	30,14
17-mar-06	14:30	0	0	0	22,652	0	22,652
17-mar-06	15:00	0	0	0	16,414	0	16,414
17-mar-06	15:30	0	0	0	11,549	0	11,549
17-mar-06	16:00	0	0	0	8,182	0	8,182
17-mar-06	16:30	0	0	0	5,812	0	5,812
17-mar-06	17:00	0	0	0	4,108	0	4,108
17-mar-06	17:30	0	0	0	2,888	0	2,888
17-mar-06	18:00	0	0	0	2,03	0	2,03
17-mar-06	18:30	0	0	0	1,417	0	1,417
17-mar-06	19:00	0	0	0	0,981	0	0,981
17-mar-06	19:30	0	0	0	0,674	0	0,674
17-mar-06	20:00	0	0	0	0,46	0	0,46
17-mar-06	20:30	0	0	0	0,309	0	0,309
17-mar-06	21:00	0	0	0	0,202	0	0,202
17-mar-06	21:30	0	0	0	0,127	0	0,127
17-mar-06	22:00	0	0	0	0,071	0	0,071
17-mar-06	22:30	0	0	0	0,033	0	0,033
17-mar-06	23:00	0	0	0	0,011	0	0,011
17-mar-06	23:30	0	0	0	0	0	0
18-mar-06	0:00	0	0	0	0	0	0



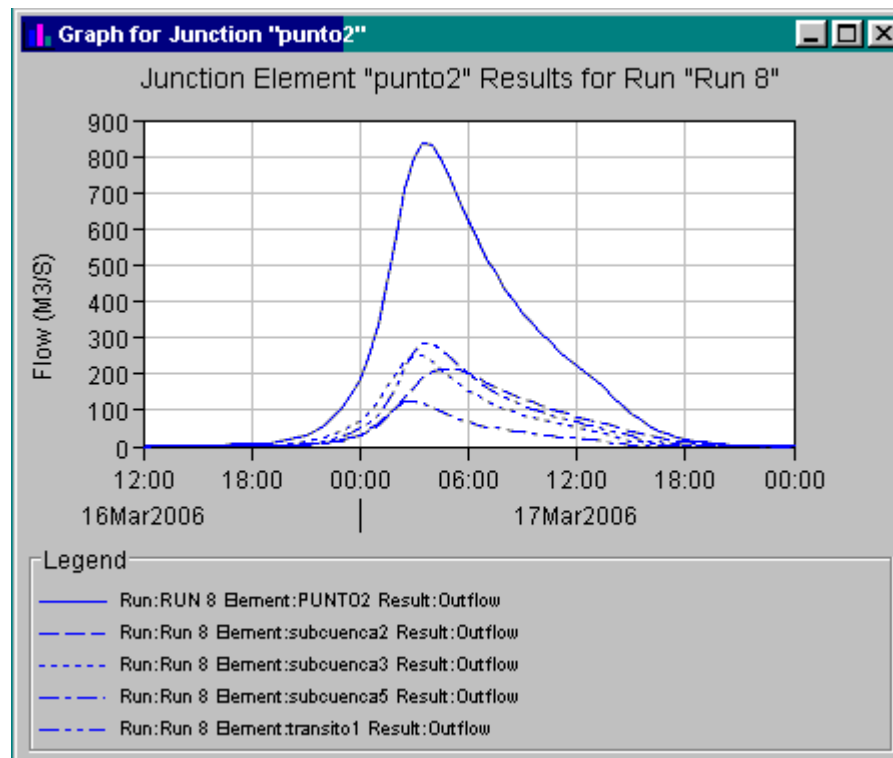
En el gráfico anterior se muestra el hidrograma que se genera en la subcuenca 1 y que va a parar al punto de confluencia 1 para ser transitado a lo largo del tránsito 1 (como ya se ha indicado el proceso detallado para el período de retorno de 500 años puede consultarse en el Anejo 9).

A continuación se muestra los valores que se producen para el punto 2 de la figura 23 en forma de cuadro y de gráfico.

PUNTO 2						
Date	time	Inflow from subcuenca2 (m³/s)	Inflow from subcuenca3 (m³/s)	Inflow from subcuenca5 (m³/s)	Inflow from tránsito1 (m³/s)	Outflow (m³/s)
16-mar-06	12:00	0	0	0	0	0
16-mar-06	12:30	0,01	0,022	0,019	0,003	0,054
16-mar-06	13:00	0,04	0,092	0,079	0,008	0,219
16-mar-06	13:30	0,1	0,242	0,199	0,031	0,573
16-mar-06	14:00	0,204	0,459	0,349	0,119	1,131
16-mar-06	14:30	0,356	0,706	0,501	0,305	1,868
16-mar-06	15:00	0,547	0,951	0,634	0,579	2,71
16-mar-06	15:30	0,764	1,181	0,744	0,891	3,579
16-mar-06	16:00	0,997	1,388	0,844	1,197	4,426
16-mar-06	16:30	1,241	1,591	0,956	1,477	5,266
16-mar-06	17:00	1,496	1,807	1,078	1,732	6,112
16-mar-06	17:30	1,76	2,04	1,212	1,985	6,998
16-mar-06	18:00	2,028	2,306	1,346	2,254	7,934
16-mar-06	18:30	2,304	2,717	1,483	2,541	9,046
16-mar-06	19:00	2,597	3,482	1,649	2,848	10,575
16-mar-06	19:30	2,923	4,896	1,931	3,225	12,975
16-mar-06	20:00	3,335	7,128	2,454	3,835	16,753
16-mar-06	20:30	3,934	10,306	3,421	4,966	22,627

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y  
aplicación a una cuenca mediterránea.

16-mar-06	21:00	4,852	14,458	4,961	6,957	31,227
16-mar-06	21:30	6,303	19,798	7,244	10,109	43,453
16-mar-06	22:00	8,519	26,344	10,291	14,656	59,81
16-mar-06	22:30	11,748	34,325	14,223	20,814	81,111
16-mar-06	23:00	16,201	43,712	18,957	28,712	107,582
16-mar-06	23:30	22,318	55,369	25,07	38,474	141,231
17-mar-06	0:00	30,522	69,959	33,105	50,46	184,046
17-mar-06	0:30	42,139	91,243	45,581	65,727	244,689
17-mar-06	1:00	58,734	121,723	64,148	86,866	331,47
17-mar-06	1:30	80,249	160,737	87,691	118,373	447,05
17-mar-06	2:00	106,558	201,98	109,493	165,168	583,198
17-mar-06	2:30	135,961	233,087	121,844	218,427	709,319
17-mar-06	3:00	164,345	248,702	124,522	260,47	798,04
17-mar-06	3:30	187,826	248,669	118,011	282,052	836,559
17-mar-06	4:00	204,302	235,731	106,939	283,653	830,625
17-mar-06	4:30	213,151	215,11	95,291	269,827	793,38
17-mar-06	5:00	214,742	193,023	84,24	247,306	739,311
17-mar-06	5:30	210,358	172,332	74,541	222,877	680,108
17-mar-06	6:00	201,181	154,147	66,61	199,677	621,615
17-mar-06	6:30	188,761	138,8	60,356	178,98	566,896
17-mar-06	7:00	175,782	125,939	55,109	161,446	518,277
17-mar-06	7:30	163,373	114,477	50,285	146,717	474,851
17-mar-06	8:00	151,775	104,362	46,03	133,938	436,105
17-mar-06	8:30	141,017	95,583	42,345	122,339	401,284
17-mar-06	9:00	130,851	87,818	39,063	112,039	369,771
17-mar-06	9:30	121,482	80,472	35,918	102,973	340,844
17-mar-06	10:00	112,703	73,62	32,846	94,681	313,85
17-mar-06	10:30	104,416	67,284	29,841	86,869	288,411
17-mar-06	11:00	96,528	61,429	27,162	79,556	264,676
17-mar-06	11:30	89,027	56,045	24,912	72,672	242,657
17-mar-06	12:00	82,077	51,239	22,893	66,335	222,543
17-mar-06	12:30	75,539	46,388	20,613	60,648	203,188
17-mar-06	13:00	69,064	41,052	17,804	55,319	183,238
17-mar-06	13:30	62,527	34,867	14,3	49,634	161,327
17-mar-06	14:00	55,818	28,167	10,712	43,105	137,801
17-mar-06	14:30	48,946	21,74	7,596	35,674	113,957
17-mar-06	15:00	42,132	16,164	5,151	28,099	91,545
17-mar-06	15:30	35,65	11,677	3,489	21,221	72,037
17-mar-06	16:00	29,662	8,379	2,379	15,533	55,953
17-mar-06	16:30	24,313	6,058	1,613	11,163	43,147
17-mar-06	17:00	19,684	4,382	1,088	8,029	33,184
17-mar-06	17:30	15,79	3,146	0,731	5,783	25,451
17-mar-06	18:00	12,635	2,256	0,488	4,154	19,533
17-mar-06	18:30	10,136	1,613	0,325	2,974	15,047
17-mar-06	19:00	8,098	1,147	0,213	2,124	11,583
17-mar-06	19:30	6,464	0,811	0,138	1,511	8,923
17-mar-06	20:00	5,153	0,568	0,086	1,068	6,875
17-mar-06	20:30	4,104	0,394	0,051	0,75	5,299
17-mar-06	21:00	3,273	0,271	0,026	0,523	4,093
17-mar-06	21:30	2,605	0,182	0,011	0,36	3,158
17-mar-06	22:00	2,072	0,118	0,003	0,244	2,436
17-mar-06	22:30	1,644	0,07	0	0,16	1,874
17-mar-06	23:00	1,302	0,036	0	0,099	1,437
17-mar-06	23:30	1,029	0,015	0	0,056	1,1
18-mar-06	0:00	0,807	0,003	0	0,027	0,837



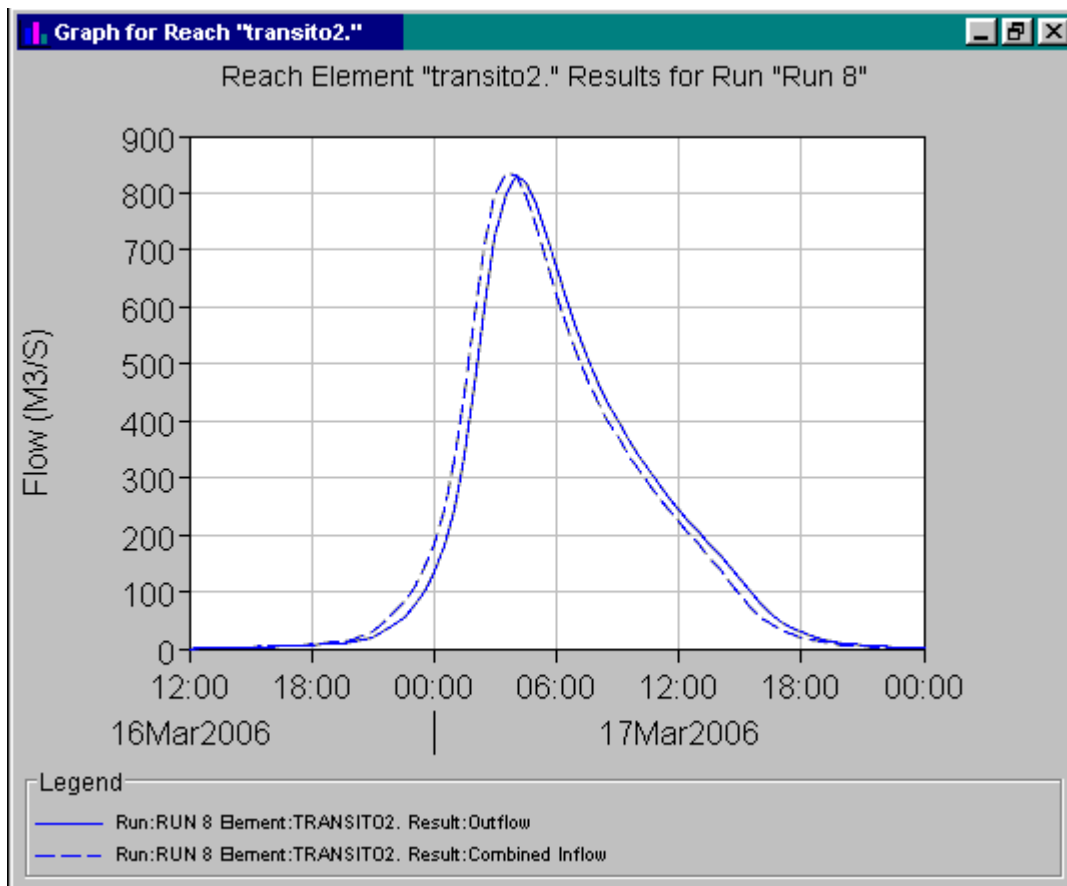
Como se observa la suma de todos los hidrograma que confluyen en el punto 2 da lugar a un hidrograma resultante que será transitado a lo largo del tránsito 2, cuyos resultados se muestran a continuación:

TRÁNSITO 2			
Date	Time	Inflow (m³s)	Outflow (m³s)
16-mar-06	12:00	0	0
16-mar-06	12:30	0,054	0,01
16-mar-06	13:00	0,219	0,037
16-mar-06	13:30	0,573	0,155
16-mar-06	14:00	1,131	0,43
16-mar-06	14:30	1,868	0,902
16-mar-06	15:00	2,71	1,563
16-mar-06	15:30	3,579	2,361
16-mar-06	16:00	4,426	3,222
16-mar-06	16:30	5,266	4,083
16-mar-06	17:00	6,112	4,934
16-mar-06	17:30	6,998	5,787
16-mar-06	18:00	7,934	6,666
16-mar-06	18:30	9,046	7,596
16-mar-06	19:00	10,575	8,662
16-mar-06	19:30	12,975	10,071
16-mar-06	20:00	16,753	12,233
16-mar-06	20:30	22,627	15,654
16-mar-06	21:00	31,227	20,965
16-mar-06	21:30	43,453	28,826
16-mar-06	22:00	59,81	40,003
16-mar-06	22:30	81,111	55,119
16-mar-06	23:00	107,582	74,936

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

16-mar-06	23:30	141,231	100,164
17-mar-06	0:00	184,046	134,327
17-mar-06	0:30	244,689	180,263
17-mar-06	1:00	331,47	245,66
17-mar-06	1:30	447,05	339,17
17-mar-06	2:00	583,198	462,062
17-mar-06	2:30	709,319	600,41
17-mar-06	3:00	798,04	721,8
17-mar-06	3:30	836,559	800,236
17-mar-06	4:00	830,625	829,801
17-mar-06	4:30	793,38	818,69
17-mar-06	5:00	739,311	780,165
17-mar-06	5:30	680,108	727,3
17-mar-06	6:00	621,615	669,849
17-mar-06	6:30	566,896	613,359
17-mar-06	7:00	518,277	560,944
17-mar-06	7:30	474,851	513,897
17-mar-06	8:00	436,105	471,757
17-mar-06	8:30	401,284	433,964
17-mar-06	9:00	369,771	399,888
17-mar-06	9:30	340,844	368,93
17-mar-06	10:00	313,85	340,519
17-mar-06	10:30	288,411	314,055
17-mar-06	11:00	264,676	289,188
17-mar-06	11:30	242,657	265,939
17-mar-06	12:00	222,543	244,357
17-mar-06	12:30	203,188	224,379
17-mar-06	13:00	183,238	205,229
17-mar-06	13:30	161,327	185,759
17-mar-06	14:00	137,801	164,853
17-mar-06	14:30	113,957	142,716
17-mar-06	15:00	91,545	120,368
17-mar-06	15:30	72,037	98,551
17-mar-06	16:00	55,953	78,408
17-mar-06	16:30	43,147	61,297
17-mar-06	17:00	33,184	47,461
17-mar-06	17:30	25,451	36,643
17-mar-06	18:00	19,533	28,239
17-mar-06	18:30	15,047	21,747
17-mar-06	19:00	11,583	16,771
17-mar-06	19:30	8,923	12,938
17-mar-06	20:00	6,875	9,98
17-mar-06	20:30	5,299	7,7
17-mar-06	21:00	4,093	5,955
17-mar-06	21:30	3,158	4,615
17-mar-06	22:00	2,436	3,578
17-mar-06	22:30	1,874	2,771
17-mar-06	23:00	1,437	2,141
17-mar-06	23:30	1,1	1,649
18-mar-06	0:00	0,837	1,267

En la siguiente imagen se muestra el efecto del tránsito a lo largo del tránsito 2.



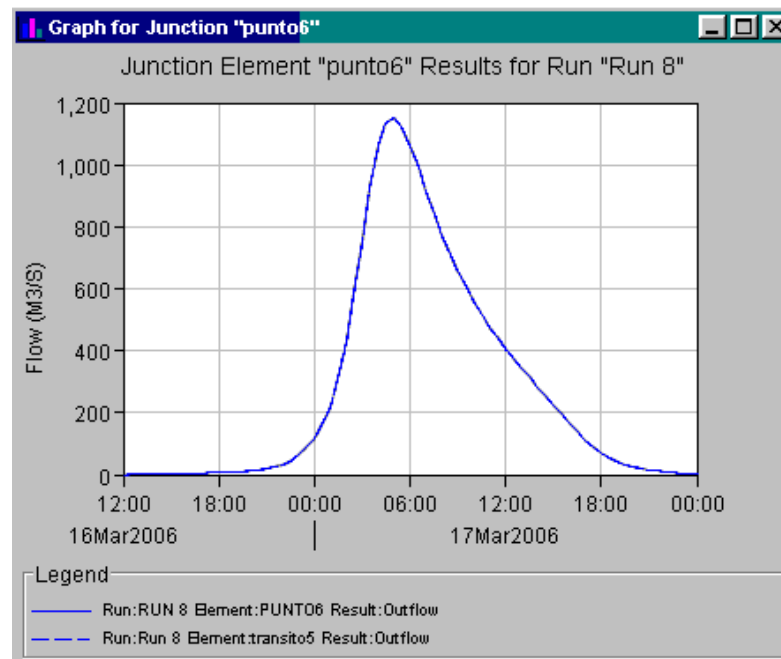
A continuación se muestran los resultados finales evaluados en el punto 6 de salida de la cuenca:

PUNTO 6			
Date	Time	Inflow from tránsito 5 (m³/s)	Outflow (m³/s)
16-mar-06	12:00	0	0
16-mar-06	12:30	0,006	0,006
16-mar-06	13:00	0,017	0,017
16-mar-06	13:30	0,081	0,081
16-mar-06	14:00	0,253	0,253
16-mar-06	14:30	0,537	0,537
16-mar-06	15:00	0,938	0,938
16-mar-06	15:30	1,501	1,501
16-mar-06	16:00	2,279	2,279
16-mar-06	16:30	3,275	3,275
16-mar-06	17:00	4,446	4,446
16-mar-06	17:30	5,719	5,719
16-mar-06	18:00	7,027	7,027
16-mar-06	18:30	8,332	8,332
16-mar-06	19:00	9,648	9,648
16-mar-06	19:30	11,043	11,043
16-mar-06	20:00	12,695	12,695
16-mar-06	20:30	14,963	14,963
16-mar-06	21:00	18,462	18,462
16-mar-06	21:30	23,998	23,998
16-mar-06	22:00	32,48	32,48

Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea.

16-mar-06	22:30	45,041	45,041
16-mar-06	23:00	62,813	62,813
16-mar-06	23:30	86,869	86,869
17-mar-06	0:00	118,834	118,834
17-mar-06	0:30	161,695	161,695
17-mar-06	1:00	221,196	221,196
17-mar-06	1:30	307,86	307,86
17-mar-06	2:00	427,944	427,944
17-mar-06	2:30	582,727	582,727
17-mar-06	3:00	755,744	755,744
17-mar-06	3:30	925,462	925,462
17-mar-06	4:00	1059,442	1059,442
17-mar-06	4:30	1134,417	1134,417
17-mar-06	5:00	1151,12	1151,12
17-mar-06	5:30	1121,228	1121,228
17-mar-06	6:00	1062,49	1062,49
17-mar-06	6:30	990,594	990,594
17-mar-06	7:00	915,488	915,488
17-mar-06	7:30	841,691	841,691
17-mar-06	8:00	772,526	772,526
17-mar-06	8:30	710,17	710,17
17-mar-06	9:00	654,606	654,606
17-mar-06	9:30	604,158	604,158
17-mar-06	10:00	557,897	557,897
17-mar-06	10:30	515,431	515,431
17-mar-06	11:00	476,487	476,487
17-mar-06	11:30	440,692	440,692
17-mar-06	12:00	407,026	407,026
17-mar-06	12:30	374,879	374,879
17-mar-06	13:00	344,128	344,128
17-mar-06	13:30	313,978	313,978
17-mar-06	14:00	284,162	284,162
17-mar-06	14:30	254,824	254,824
17-mar-06	15:00	225,495	225,495
17-mar-06	15:30	195,826	195,826
17-mar-06	16:00	166,366	166,366
17-mar-06	16:30	138,129	138,129
17-mar-06	17:00	112,115	112,115
17-mar-06	17:30	89,273	89,273
17-mar-06	18:00	70,155	70,155
17-mar-06	18:30	54,693	54,693
17-mar-06	19:00	42,473	42,473
17-mar-06	19:30	32,95	32,95
17-mar-06	20:00	25,557	25,557
17-mar-06	20:30	19,838	19,838
17-mar-06	21:00	15,397	15,397
17-mar-06	21:30	11,945	11,945
17-mar-06	22:00	9,278	9,278
17-mar-06	22:30	7,211	7,211
17-mar-06	23:00	5,615	5,615
17-mar-06	23:30	4,372	4,372
18-mar-06	0:00	3,398	3,398

En la siguiente figura se muestra la representación gráfica de de los hidrogramas anteriores.



El caudal punta resultante es 1151 m<sup>3</sup>/s.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el HEC-HMS para los dos casos de estudio realizados:

CAUDALES OBTENIDOS CON EL HEC-HMS (m <sup>3</sup> /s)		
Período de Retorno	Cuenca Completa	Desagregación en subcuencas
5 años	176,3	232,5
10 años	267,2	356,4
50 años	495,9	666,0
100 años	600,9	809,1
200 años	708,5	953,8
500 años	854,7	1151,1

Como se puede observar los caudales obtenidos en los distintos períodos de retorno para la cuenca completa son inferiores a los obtenidos para la cuenca desagregada.

## 6.9. Comparación de resultados de caudales

En el cuadro 18 y la figura 24 se muestran los resultados obtenidos con los distintos métodos de cálculo:

- *Cuenca Completa*; aplicando directamente la Instrucción.



- *Subcuenca sin tránsito*; se aplica la Instrucción en cada una de la subcuencas, obteniendo dos resultados dependiendo de la forma de hacer la suma de los caudales pico obtenidos:
  - *Sin desfase temporal*; correspondiente a la suma directa de los distintos caudales pico de cada subcuenca. Puede consultarse los cálculos en el Anejo 10.
  - *Con desfase temporal*; correspondiente a la suma de los hidrogramas de cada subcuenca con sus correspondientes intervalos temporales, (los caudales pico para las distintas subcuencas no coinciden en el mismo tiempo). Los cálculos se encuentra recogidos en el Anejo 10.
- *Subcuencas con tránsito*; se aplica el método de tránsito del Muskingum con una determinación del tiempo de tránsito  $K$  en cada tramo.
- *Subcuencas con tránsito  $K$  medio*; se aplica el método de tránsito del Muskingum con una determinación de un tiempo de tránsito medio para cada tramo.
- *Subcuencas con tránsito  $K = t_c$  (TÉMEZ)*; se aplica el método de tránsito del Muskingum con una estimación del tiempo de tránsito igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Témez.
- *Subcuencas con tránsito  $K = t_c$  (KIRPICH)*; se aplica el método de tránsito del Muskingum con una estimación del tiempo de tránsito igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Kirpich.
- *Subcuencas con tránsito  $K = t_c$  (GIANDOTTI)*; se aplica el método de tránsito del Muskingum con una estimación del tiempo de tránsito igual al tiempo de concentración dado por la fórmula de Giandotti.
- *HEC-HMS cuenca completa*; se aplica el programa HEC-HMS para el caso de la cuenca completa.
- *HEC-HMS cuenca desagregada*; se aplica el programa HEC-HMS para una desagregación de la cuenca en subcuencas con sus correspondientes tránsitos.

RESUMEN GENERAL DE CAUDALES PARA LOS DISTINTOS MÉTODOS DE CÁLCULO (m <sup>3</sup> /s)										
Período de retorno	cuenca completa	Sub. sin tránsito		Sub. con tránsito	Sub.con tránsito <i>K</i> medio	Sub.con tránsito <i>K</i> = <i>t<sub>c</sub></i> (TEMEZ)	Sub.con tránsito <i>K</i> = <i>t<sub>c</sub></i> (KIRPICH)	Sub.con tránsito <i>K</i> = <i>t<sub>c</sub></i> (GIANDOTTI)	HEC-HMS cuenca completa	HEC-HMS cuenca desagregada
		Sin desfase temporal	Con desfase temporal							
<b>5</b>	149	296	244	178	186	103	134	78	176	<b>232</b>
<b>10</b>	250	478	392	295	307	170	217	127	267	<b>356</b>
<b>50</b>	527	972	793	654	607	377	440	260	496	<b>666</b>
<b>100</b>	662	1211	986	771	761	435	548	327	601	<b>809</b>
<b>200</b>	806	1462	1189	937	918	530	662	403	708	<b>954</b>
<b>500</b>	1007	1812	1472	1202	1137	658	820	499	855	<b>1151</b>

Cuadro 18. Resumen general de caudales para los distintos estudios.

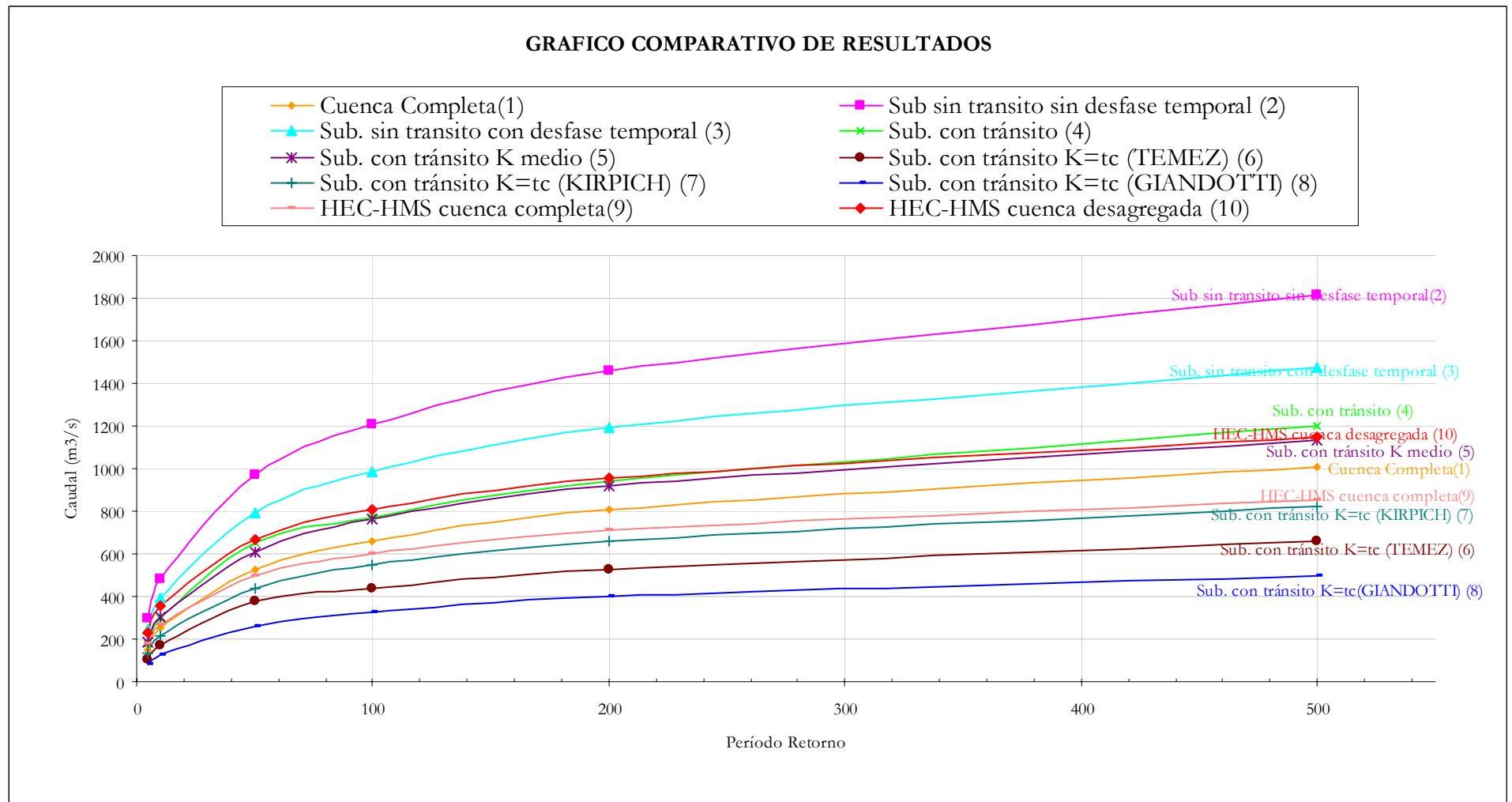


Figura 24. Gráfico comparativo de caudales para los distintos métodos de cálculo.

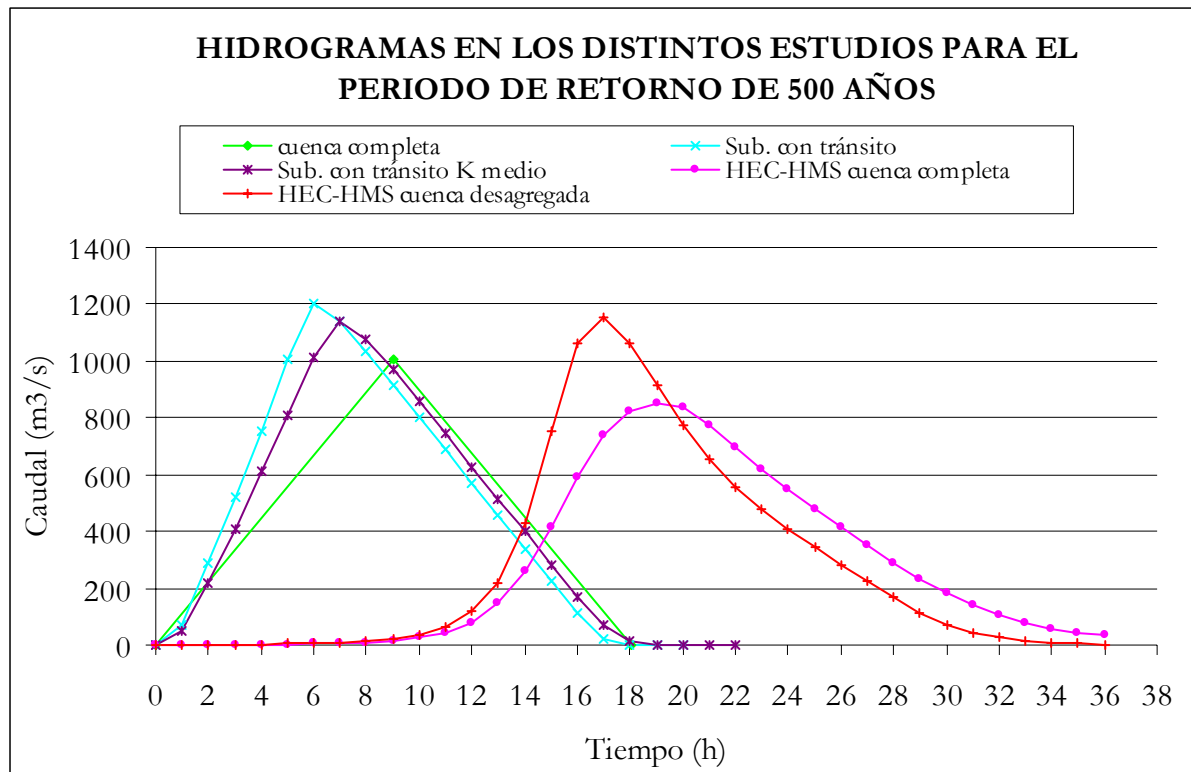
A continuación se van a comparar los distintos resultados con los obtenidos con el HEC-HMS para la cuenca desagregada (curva 10), al considerar que estos resultados son los que mejor representan la realidad de la cuenca.

- En el caso de aplicación del HEC-HMS como cuenca completa (curva 9), los resultados son bastante inferiores al caso de aplicar el modelo con una cuenca desagregada en 7 subcuencas (curva 10). Esto indica que en este método no se debería aplicar el modelo a cuencas con superficie superior a  $100 \text{ km}^2$ .
- En cuanto a los resultados de la Instrucción aplicada a la cuenca completa (curva 1) se observa que quedan por debajo de los obtenidos con el HEC-HMS desagregado, siendo inferiores entorno al 13 % para el período de retorno de 500 años y del 36 % para el período de retorno de 5 años. Podemos concluir que el método de la Instrucción no debería aplicarse a cuencas de estas características con superficies superiores a unos  $250 \text{ km}^2$ , ya que la aplicación con la cuenca completa ( $\sim 300 \text{ km}^2$ ) el error llega a ser apreciable.
- En el caso de subdividir la cuenca en subcuencas y aplicar la Instrucción a cada una de ellas se obtienen dos resultados y ambos con caudales superiores a los obtenidos del HEC-HMS. En subcuencas sin tránsito y sin desfase temporal (curva 2), se estarían sumando los caudales pico de cada subcuenca directamente, produciéndose los mayores caudales de los distintos estudios realizados, superiores a los obtenidos en la curva 10 en un 27 % para el período de retorno de 5 años y del 57 % para el período de 500 años.  
En el caso de subcuencas sin tránsito con desfase temporal (curva 3) se estarían produciendo caudales inferiores a los obtenidos en la curva 2 pero aun así serían superiores a los obtenidos con el HEC-HMS entorno al 5 % para el período de retorno de 5 años y del 28 % para el período de 500 años. En este caso se estarían sumando los distintos hidrograma de cada subcuenca con sus caudales pico en sus correspondientes intervalos temporales por lo que es lógico que los caudales sean menores a los obtenidos sin desfase temporal, pero aun así en ambos casos se estaría sobreestimando caudales.
- Para el estudio de subcuencas con tránsito y  $K$  variable (curva 4), se producen unos valores muy próximos a los obtenidos con el HEC-HMS para la cuenca desagregada, siendo inferiores en casi todos los períodos de retorno entorno al 23 % para el período de 5 años y del 2 % para los períodos de 50 y 200 años, mientras que para el período de 500 años se obtiene un caudal superior al obtenido en la curva 10 en un 4 % y del lado de la

seguridad. Siendo este uno de los estudios que mejores resultados proporciona pero también de los más laboriosos.

- En el caso de subcuencas con tránsito con  $K$  medio (curva 5) los caudales son inferiores a los obtenidos en la curva 10, en un 20 % para el período de retorno de 5 años y de un 1 % para el período de 500 años, pero al igual que para la curva 4 los resultados son muy próximos a los del HEC-HMS, siendo uno de los estudios que mejores resultados proporcionan, sin embargo con un ahorro considerable de trabajo.
- Para el estudio de subcuencas con tránsito con  $K = t_c$  por la fórmula de Témez (curva 6) los caudales obtenidos son inferiores a los que el HEC-HMS proporciona, en un 56 % para el período de retorno de 5 años y en un 43 % para el período de 500 años.
- Mientras que para el caso de subcuencas con tránsito con  $K = t_c$  por la fórmula de Kirpich (curva 7) se obtienen caudales superiores a los de la curva 6 estos siguen siendo inferiores a los obtenidos con el HEC-HMS en un 42 % para el período de retorno de 5 años y en un 29 % para el período de 500 años.
- En el caso de subcuencas con tránsito con  $K = t_c$  por la fórmula de Giandotti (curva 8), se producen los caudales más bajos de todos los estudios realizados, inferiores a la curva 10 en un 67 % y un 57 % para los períodos de retorno de 5 y 500 años respectivamente, es decir que en este caso se estarían obteniendo la mitad de los caudales que el HEC-HMS proporciona. En este caso cabe destacar la estimación que se ha considerado para la fórmula de Giandotti, considerando un área de influencia en cada tramo de tránsito, pero como se indicó esta fórmula está pensada para la obtención de un único valor por unidad de estudio, por lo que sus resultados pueden ser cuestionados para la consideración de igualar el tiempo de tránsito al tiempo de concentración que la fórmula de Giandotti proporciona.
- De forma general se puede decir que pese al ahorro de trabajo que supone el igualar el tiempo de tránsito al tiempo de concentración por las distintas fórmulas, los resultados obtenidos no son satisfactorios ya que todos los caudales son inferiores a los obtenidos con el HEC-HMS con cuenca desagregada (curva 10) e incluso inferiores a los de la Instrucción (curva 1), por lo que se estaría corriendo el riesgo de estar subestimando de una forma importante los caudales.

A continuación se muestra de forma comparativa en el siguiente gráfico los distintos hidrogramas de los estudios para el período de retorno de 500.



Se puede observar que los resultados con el HEC-HMS (cuenca completa y desagregada) se encuentran desplazados hacia la derecha en un tiempo de unas 10 horas debido a que se tiene en cuenta la distribución temporal de la precipitación a través del hietograma de precipitación de cálculo.

Sin embargo, los tiempos de los caudales punta de todos los métodos de cálculo son del orden del tiempo de concentración de la cuenca ( $t_c \approx 9 \text{ horas}$ ).

En el caso de los métodos con el HEC-HMS, en las primeras 10 horas de los hidrogramas de salida, los caudales son muy pequeños (inferiores a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## 7. CONCLUSIONES

El método de la Instrucción de 5.2–IC es un buen método para cálculos con poca información, de los caudales de avenida en cuencas pequeñas.

En cuanto a su aplicación al tipo de cuencas mediterráneas, se ha observado que aunque la Instrucción admite como límite de aplicación cuencas con superficie de hasta 3000 km<sup>2</sup>; sin embargo, recomendamos que no se aplique directamente a cuencas con superficie mayor de 250 km<sup>2</sup>, debiendo por tanto subdividirse la cuenca en unidades menores a este valor.

Adicionalmente, se debe realizar los tránsitos correspondientes, aplicando el método de Muskingum, para lo cual el tiempo de tránsito  $K$  es suficiente estimarlo a partir de un flujo uniforme entre el caudal de período de retorno inferior ( $Q_5$ ) y el período de retorno superior ( $Q_{500}$ ).

Con respecto a la precipitación se ha observado que los dos métodos analizados (método de Gumbel y método de la Instrucción de Máximas lluvias diarias en la España peninsular) dan resultados muy próximos, por lo que se recomienda la utilización de la Instrucción debido a su mayor fiabilidad y comodidad de cálculo.

En relación a los análisis de los caudales y comparando con los resultados obtenidos con el HEC-HMS para la cuenca desagregada, las principales conclusiones son:

- La aplicación de la Instrucción de Drenaje para la cuenca completa, genera una subestimación de caudales con respecto a los del HEC-HMS. Para el caso de subcuencas sin tránsito, es decir aplicando la Instrucción en cada subcuenca y sumando los caudales obtenidos se estarían sobrestimando caudales de una forma indiscriminada.
- Para el caso de subdividir en subcuencas y aplicar un método de tránsito, los resultados obtenidos pueden llegar a ser bastante satisfactorios, siempre que la estimación del tiempo de tránsito se haga adecuadamente, ya que los resultados obtenidos varían bastante, dependiendo de dicha estimación realizada. Se obtienen caudales muy próximos a los del HEC-HMS, cuando la determinación del tiempo de tránsito se realiza para condiciones de flujo uniforme.

Mientras que para tiempos de tránsito iguales al tiempo de concentración los caudales obtenidos son muy inferiores a los obtenidos por los restantes estudios.

- La aplicación del HEC-HMS para la cuenca completa, no proporciona resultados satisfactorios, obteniendo caudales inferiores incluso a los obtenidos por la Instrucción de Drenaje para la cuenca completa. Por esta razón no se debe aplicar dicho modelo a cuencas con superficie superior a  $100 \text{ km}^2$ .

A continuación se realizan las consideraciones más importantes y se sugieren las posibles mejoras:

- Los límites de aplicación que considera la instrucción para cuencas con tiempos de concentración del orden de  $0,25 \text{ h} \leq t_c \leq 24 \text{ h}$  o áreas  $A \leq 3000 \text{ km}^2$ , son límites excesivamente grandes ya que se estaría subestimando caudales, recomendando que para cuencas superiores a los  $250 \text{ km}^2$  sería conveniente hacer subdivisiones en subcuencas y aplicar algún método de tránsito.
- El método de tránsito de Muskingum da resultados buenos con valores en su parámetro  $K$  obtenidos en función de condiciones de flujo uniforme.
- En relación a la Instrucción sería conveniente mejorar la estimación del umbral de escorrentía  $P_o$ , unificando las clasificaciones que ésta hace de los distintos tipos de cultivos y suelos, con los métodos de consulta de los que se disponen; es decir, los mapas de cultivos y aprovechamientos y los mapas geológicos.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- CASTILLO-E, L.G. (2002). “Apuntes de obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. UPCT.
- FERRER, M; RODRÍGUEZ, J. y ESTRELA, T. (1995). “Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica”. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num.4.
- LINSLEY, K., KOHLER, M. & PAULUS, J. (1988). “Hydrology for Engineers”. McGraw-Hill.
- MAIDMENT, D.R. (1992). “Handbook of hydrology”. McGraw-Hill.
- MINISTERIO DE FOMENTO (Ex MOPU) (1990). “Instrucción 5.2-IC. Drenaje superficial”. Tecnología. Carreteras.
- MINISTERIO DE FOMENTO (Ex MOPU) (2001). “Máximas lluvias diarias en la España peninsular”. Dirección General de Carreteras.
- TEMEZ, J. R. (2002) “Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España”. Ingeniería Civil, Nº 82. CEDEX. Madrid.
- XXIV IAHR Congreso. Madrid. 1991.
- VEN TE CHOW (1988) “Applied Hydrology” Ed. McGraw-Hill.
- WANIELISTA, M., KERSTEN, R. & EAGLIN, R. (1997). “Hydrology”. John Wiley & Sons, Inc.