

Análisis del modelo HEC-HMS para la simulación de las avenidas del río Arga en Pamplona

(C.- Agua y ciudad)

Miguel Ángel González, Anna Scaini, Mikel Goñi¹, J. Vicente Valdenebro^{1,2} y J. Javier López¹

¹Profesor; Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra.

²Área de Proyectos Estratégicos. Ayuntamiento de Pamplona.

mikel.goni@unavarra.es, jjlr@unavarra.es; j.valdenebro@pamplona.es.

Resumen

Junto a sus afluentes Ulzama y Elorz, el río Arga atraviesa y estructura el espacio urbano del municipio de Pamplona y colindantes, formando una llanura aluvial que es susceptible de inundaciones cuando se producen avenidas de una cierta magnitud. Ante esta situación es importante contar con un modelo hidrológico que permita determinar los caudales que circulan por los distintos ríos que atraviesan el núcleo urbano, a partir de los datos de los distintos pluviómetros que se encuentran en la cuenca. Con esta finalidad se ha analizado y aplicado el modelo HEC-HMS para simular las cinco avenidas de mayor importancia de las registradas en los últimos años. El modelo Hydrologic Modeling System HEC-HMS (HEC, 2010) desarrollado en el Hydrologic Engineering Center, es un modelo lluvia-escorrentía ampliamente utilizado desde hace tiempo para la simulación de avenidas. Se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial. Los métodos seleccionados han sido: el método del Hidrograma Unitario del S.C.S. para simular el hidrograma de escorrentía directa; el método de Muskingum para circular los hidrogramas por la red de cauces; el método del Número de Curva del S.C.S. para estimar el yetograma de precipitación efectiva. Finalmente, el flujo base en los hidrogramas observados se ha determinado con el filtro de Eckhardt (2005). Además de la aplicación del modelo, se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros inciertos del modelo, del que se concluye que el parámetro del Número de Curva es el más sensible. Se observa que los resultados son bastante aceptables, salvo en el evento de abril que es un hidrograma compuesto.

1 Introducción.

Junto a sus afluentes Ulzama y Elorz, el río Arga ha sido fuente de asentamientos a lo largo de la historia, éste es el caso de Pamplona y su Comarca, núcleo de población principal de Navarra. En las últimas décadas, los diferentes desarrollos urbanísticos han ejercido una cierta presión sobre las áreas pertenecientes al cauce principal de los ríos: De forma que, cuando se producen avenidas, éstas provoquen inundaciones en estas zonas urbanizadas residenciales con los consiguientes daños sobre viviendas, mobiliario, etc.

Ante esta situación y como paso previo a la simulación hidráulica que permita simular los niveles de la lámina de agua en las secciones transversales del río y, por lo tanto, las manchas o zonas inundables, es importante contar con un modelo hidrológico que permita determinar los caudales que circulan por los distintos ríos que atraviesan el núcleo urbano, a partir de los datos de los distintos pluviómetros que se encuentran en la cuenca. Con esta finalidad se ha analizado y calibrado el modelo HEC-HMS (HEC, 2010) para las cinco avenidas más importantes de los últimos años, cuyas magnitudes están comprendidas entre las correspondientes a 2 y 10 años de periodo de retorno, de las que se disponen datos de caudal y de lluvia.

El modelo hidrológico HEC-HMS, desarrollado en el Hydrologic Engineering Center, es un modelo lluvia-escorrentía ampliamente utilizado para la simulación de avenidas. El modelo se basa en una estructura de subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial de la cuenca origen. En cada subcuenca se genera el hidrograma de escorrentía directa y dichos hidrogramas se hacen circular por la red de cauces, sumándose en los distintos puntos de confluencia. HEC-HMS dispone de muchos métodos tanto para simular el hidrograma de escorrentía directa como para circular los hidrogramas por los cauces, en este caso se ha seleccionado el método

del *Hidrograma Unitario del SCS* para el primero, y el de *Muskingum* para el segundo. Los yetogramas de precipitación efectiva para cada subcuenca se han determinado, a partir de los registrados en las estaciones pluviométricas, mediante polígonos de *Thiessen*, y aplicando el método del *Número de Curva del SCS* (Mockus, 1969).

El objetivo del presente trabajo es poner a punto el modelo HEC-HMS para aplicarlo con la finalidad de simular los hidrogramas de avenida en la ciudad de Pamplona. Para ello, se ha contado con los registros diezminutales o quinceminutales de caudal en seis estaciones de aforo ubicadas en distintos puntos de la red fluvial de la cuenca del Arga hasta Pamplona. Así mismo, se ha dispuesto de los registros de precipitación diaria y cada 10 minutos, de las estaciones meteorológicas manuales (EMM) y automáticas (EMA) respectivamente, repartidas por toda la superficie de la cuenca.

2 Descripción de la cuenca.

Pamplona, localizada más o menos en el centro de Navarra, está rodeada de distintas cadenas montañosas formando lo que se denomina la Cuenca de Pamplona. Aunque de vertiente mediterránea, la cercanía a las divisorias atlánticas y la relativamente escasa altitud de las mismas, proporciona a toda la zona una situación de transición climática y biogeográfica muy fuerte.

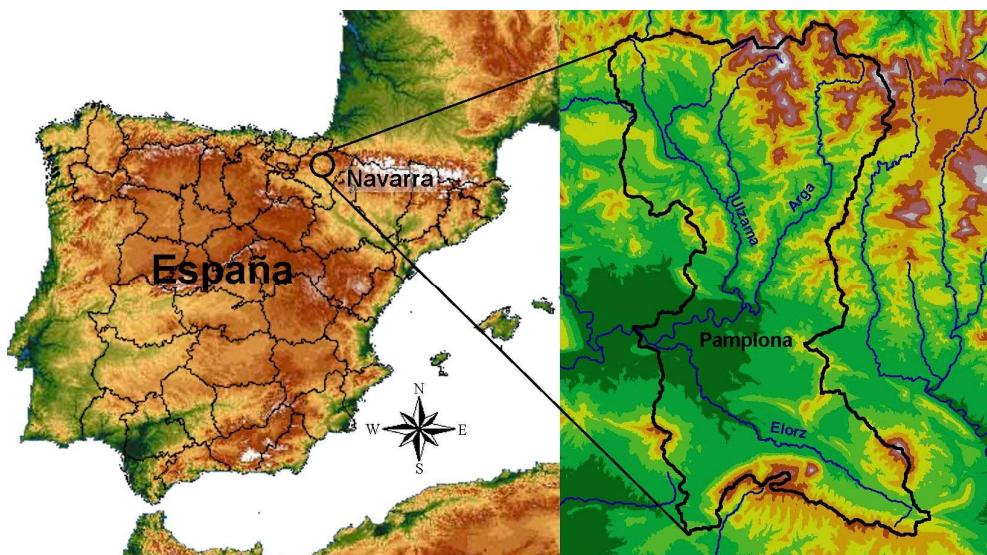


Figura 1 Localización de la cuenca del Arga en Pamplona.

El río Arga nace en los montes de Quinto Real, en la vertiente meridional del collado de Urquiaga, al norte de Navarra. Poco después toma dirección sur, siendo sus aguas represadas en el embalse de Eugui, con una capacidad de 21 Hm^3 . Atravesado éste, continúa su curso por el Valle de Esteribar hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, en donde recibe al río Ulzama en el municipio de Villava, afluente de gran importancia que duplica el caudal del Arga. El río Arga, así como el Ulzama, hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona se caracterizan por ser ríos de montaña, con pendientes acusadas que discurren por valles estrechos. Al atravesar la ciudad de Pamplona la pendiente se reduce considerablemente y adquiere un recorrido meandriforme atravesando extensas plataformas inundables asociadas al río que en momentos de riadas se ven anegadas. Poco después de recoger las aguas del Elorz, al dejar el término municipal de Pamplona, el río Arga se une al río Araquil para seguir aguas abajo hacia el Ebro.

En la Figura 2 se representa la cuenca del río Arga que vierte al punto en el que se ubica la estación de aforo de Arazuri, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro. Esta estación se localiza poco después de la confluencia del Arga con el río Elorz, cuando el Arga abandona Pamplona. La superficie de esta cuenca es de $803,49 \text{ km}^2$ y la red fluvial queda definida fundamentalmente por tres ríos: Arga, Ulzama y Elorz.

3 Descripción del modelo hidrológico HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers (USACE), que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia. En este trabajo se ha utilizado el HEC-HMS 3.5 (HEC, 2.010). La simulación de la red de drenaje de una cuenca constituye la base del modelo. Todas las demás opciones están desarrolladas sobre la capacidad de cálculo de hidrogramas en cualquier punto de la cuenca (Viessman, 1996). Los componentes del modelo se basan en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas de escorrentía: pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base, circulación del hidrograma por el cauce, etc. En este caso, hay una serie de condicionantes o limitaciones que por distintos motivos tiene el modelo aplicado:

- La simulación se limita a eventos de lluvia (modelo de eventos), consecuencia de la propia aplicación del modelo a la simulación de avenidas
- En la modelación no se incluye la escorrentía subsuperficial al no disponer de valores de los parámetros que caracterizan el mismo.
- No se tiene en cuenta la presencia de nieve, es importante, por lo tanto, conocer si en cada evento ha habido o es importante la presencia de nieve.

El punto de partida, por lo tanto, es la estructura fisiográfica de la cuenca en base a la red fluvial, considerando, por una parte, las superficies generadoras de hidrogramas de escorrentía (sistemas hidrológicos o subcuencas), y, por otra, las unidades o sistemas hidráulicos por los que circulan dichos hidrogramas (cauces, embalses, etc.). Se parte, por lo tanto, de una representación distribuida de la cuenca basada en una red ramificada de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas-embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces). Cada sistema se caracteriza fundamentalmente por dos elementos: una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo, y unas relaciones matemáticas que rigen su comportamiento.

La información de partida para determinar este modelo estructurado de subcuencas y canales ha sido la red fluvial del mapa cartográfico de Navarra 1:25.000 y el modelo de elevación digital MED (25x25) del Gobierno de Navarra. Se ha trabajado con el Sistema de Información Geográfica (SIG) *ArcView 3.2* (ESRI). A partir de la información tratada y generada en este soporte, *ArcView 3.2*, se ha utilizado *HEC-GeoHMS 1.1* (HEC, 2003) para volcar dicha información al HEC-HMS y construir el modelo conceptual de subcuencas y canales. De esta forma se llega a la estructura de subcuencas, que en HEC-HMS genera el modelo conceptual que se representa en la Figura 2. Las características fisiográficas esenciales de los sistemas, área de las subcuencas y longitud de los tramos de cauces de ríos, se presentan en las Tabla 1 y 2 junto con las características hidrológicas.

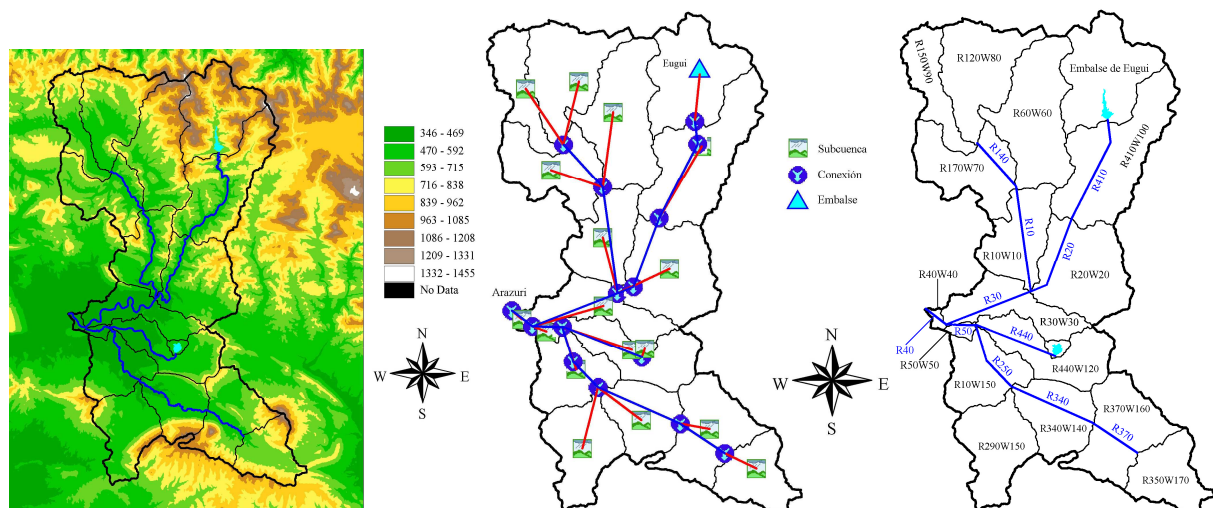


Figura 2 Representación de la cuenca del Arga en Arazuri, dividida en subcuencas y con la red fluvial, y del modelo conceptual HEC-HMS con los sistemas hidrológicos (subcuencas) e hidráulicos (cauces).

Definido y establecido el modelo conceptual morfológico de la cuenca es preciso determinar los distintos componentes de los procesos involucrados en la generación del hidrograma en el punto de salida: yetograma de precipitación total (YPT); yetograma de precipitación efectiva (YPE); hidrograma de escorrentía directa (HED); y circulación o propagación de la avenida a lo largo de la red de cauces hasta el punto de drenaje de la cuenca.

3.1 Yetograma de Precipitación Total (YPT)

El yetograma de precipitación total se introduce en el modelo para cada estación meteorológica con influencia en la cuenca objeto de estudio. En una primera aproximación, se utilizaron únicamente los registros de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) ya que aportan registros diezminutales, pero dada su escasa presencia en la zona montañosa de cabecera, se optó por introducir también las estaciones meteorológicas manuales (EMM) cuya red tiene una mayor cobertura en todas las zonas de la cuenca (Figura 3). Los registros de las EMM se han utilizado transformando el dato diario en datos diezminutales mediante la relación de la precipitación acumulada y los yetogramas de las EMAs más próximas. Introducidas todas las estaciones, las áreas de influencia de cada estación se han obtenido con el método de los Polígonos de Thiessen con *ArcView*.

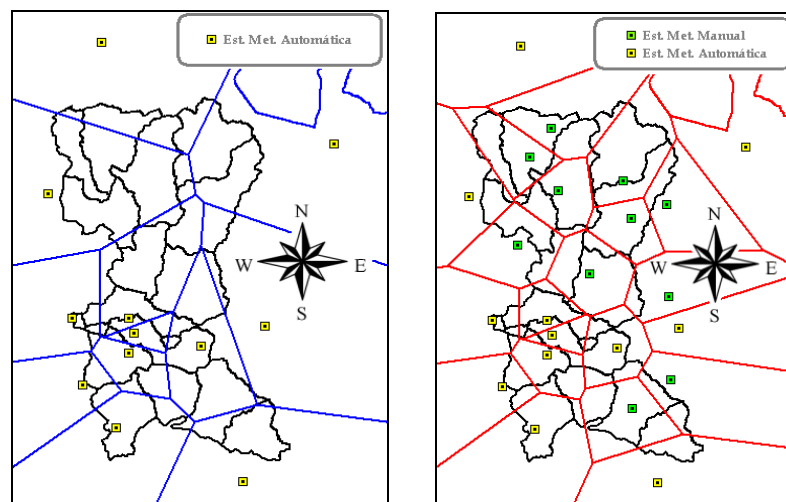


Figura 3 Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas determinadas mediante Polígonos de Thiessen.

3.2 Yetograma de Precipitación Efectiva (YPE)

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación total que se transforma en escorrentía directa, el resto de la precipitación, que incluye la interceptación de la lluvia por la vegetación, el almacenamiento superficial en el terreno, la evaporación directa y la infiltración del agua en el suelo, es considerada como pérdidas o abstracciones. Para el cálculo de las pérdidas HEC-HMS cuenta con diferentes métodos que utilizar distintas funciones. En este caso como partimos de la información digitalizada del uso y tipo de suelo hemos elegido el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) o del número de curva (CN) que es uno de los más utilizados en el ámbito profesional.

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) para estimar las pérdidas (o abstracciones) en un evento de lluvia o aguacero (Mockus, 1969). En este método la altura de lluvia efectiva es función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado **número de curva CN**, que depende de factores que influyen en la generación de escorrentía en la cuenca: tipo hidrológico del suelo (Grupo hidrológico-Capacidad de drenaje); uso y manejo del terreno; condición superficial del suelo; y condición de humedad antecedente. El valor del CN se encuentran en el rango de 0 a 100: 100 corresponde a superficies impermeables; y, por el contrario, 0 es para superficies totalmente permeables donde la capacidad de almacenamiento es ilimitada.

Esta metodología establece que la escorrentía superficial directa comienza después de que se alcance un cierto valor de lluvia acumulada, I_a , denominada pérdida (o abstracción) inicial, que viene a representar el volumen de precipitación que queda retenido en la cuenca al inicio de la lluvia como consecuencia de la interceptación, infiltración y almacenamiento superficial. Una vez iniciada la escorrentía directa, la altura de lluvia adicional almacenada en la cuenca, que no se transforma en escorrentía superficial directa, F_a , es menor o igual a la capacidad de retención máxima de la cuenca, S . La hipótesis del método fundamentalmente consiste en combinar la relación que liga las cantidades actuales y potenciales con la ecuación de continuidad, de esta forma llegamos a la expresión de la precipitación efectiva, P_e , (1):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

Para la estimación del CN en cuencas no aforadas se parte de tablas que han sido elaboradas por diferentes Organismos de la Administración de EE.UU. disponibles en Ponce (1.989). Con estas tablas y la información digital disponible de la cuenca, el mapa de suelos 1:50.000 (Iñiguez, J. *et al.* 1982-1992) y el mapa de usos 1:25.000 (G.N., 2001), se ha elaborado el mapa de CN de la cuenca del Arga para unas condiciones de humedad de referencia medias, que ha permitido obtener los valores de CN medios de las distintas subcuencas (Tabla 1).

Tabla 1 Valores de las áreas y de los parámetros hidrológicos medios cada una de las subcuencas.

Subcuenca	Área (Km ²)	CN	I_a (mm)	T_l (min.)
R10W10	43,618	69	22,82	26,40
R20W20	67,716	69	22,82	26,04
R30W30	39,451	85	8,96	23,15
R40W40	2,341	85	8,96	6,30
R50W50	3,246	85	8,96	7,32
R60W60	74,530	62	31,14	33,30
R170W70	52,553	65	27,35	28,50
R120W80	61,437	64	28,58	32,28
R150W90	32,739	66	26,17	25,80
R410W100	83,099	62	31,14	37,38
R440W120	45,535	80	12,70	21,96
R310W130	41,029	81	11,92	16,20
R340W140	40,997	78	14,33	18,06
R290W150	50,085	76	16,04	20,22
R370W160	56,328	73	18,79	17,04
R350W170	37,076	70	21,77	16,08
R390W180	68,836	61	32,48	23,34
R420W190	2,866	81	11,92	4,50

3.3 Circulación de la lluvia efectiva a través de la cuenca.

Este proceso hace referencia a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca como consecuencia de la circulación de la lluvia efectiva a través de toda la superficie de la cuenca. En este trabajo se ha seleccionado la técnica del **hidrograma unitario** (HU) y, dentro de ésta, el **HU Adimensional del SCS** por ser un método sencillo ampliamente aplicado en multitud de casos. Este HU se desarrolló en el SCS, en la década de los 50, en base a observaciones de numerosas cuencas agrícolas repartidas a lo largo de toda la geografía de los EE.UU.. Las variables están adimensionalizadas, haciendo el mismo de ámbito universal, de forma que el caudal se representa como (q/Q_p) , siendo Q_p , el caudal punta generada en la cuenca objeto de estudio; y el tiempo como (t/T_p) , donde T_p es el tiempo al pico. Las expresiones de estas variables vienen dadas por (Chow *et al.*, 1994):

$$Q_p = \frac{2,08A}{T_p} \quad T_p = \frac{T_y}{2} + T_l \quad (2)$$

Donde: Q_p es el caudal punta en m^3/s por cm de lluvia efectiva; A es la superficie de la cuenca en km^2 ; T_p es el tiempo al pico en horas; T_y la duración del pulso de lluvia; y T_l el tiempo de desfase o de retardo de la cuenca (tiempo comprendido entre el centro de gravedad del pulso de lluvia y el instante del caudal máximo) que se determina mediante la expresión (3) (Ponce, 1989):

$$T_l = \frac{L^{0,8} (2540 - 22,86 CN)^{0,7}}{14104 CN^{0,7} I^{0,5}} \quad (3)$$

En la que: T_l viene dado en horas; L es la longitud hidráulica en m (longitud medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria de la cuenca); I : es la pendiente media de la cuenca en m/m ; y CN es el valor del número de curva medio de la cuenca. En la Tabla 1 se presentan los valores de este parámetro, T_l , para cada subcuenca.

3.4 Circulación de los hidrogramas a lo largo de los cauces.

La circulación de avenidas o hidrogramas hace referencia a como se propagan las avenidas a través de la red de cauces. De los diferentes métodos que HEC-HMS tiene implementados para circular los hidrogramas generados en las subcuencas a través de los cauces se ha elegido el método de **Muskingum**. Ésta es la técnica hidrológica más difundida para manejar relaciones variables de descargas-almacenamientos (Chow *et al.*, 1994). Este método modela el almacenamiento volumétrico de los hidrogramas a lo largo de los cauces de los ríos mediante la combinación de dos almacenamientos conceptuales: uno en forma de cuña y otro en forma de prisma. La ecuación fundamental de este método es:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (4)$$

En donde I_i es caudal entrante en un tramo en el instante i ; Q_i es caudal saliente del mismo tramo en el instante i ; y C_1 , C_2 , y C_3 son constantes que dependen de dos parámetros: k y x que son los parámetros del modelo, y que representan, respectivamente, un tiempo de circulación o de tránsito, con dimensiones de tiempo, y un coeficiente de almacenamiento adimensional.

El valor de x depende de la forma del almacenamiento en cuña modelado, oscila entre 0, para un embalse, y 0,5, para el caso de que exista una cuña perfectamente definida. El modelo es poco sensible al valor de x y normalmente para corrientes naturales se asume un valor medio próximo a 0,2 (Chow *et al.*, 1994). El tiempo de tránsito o circulación del hidrograma de avenida, k , en cada uno de los tramos de cauces de ríos se ha estimado a partir de la celeridad de la onda de avenida cuyo valor se ha determinado en base a estudios hidráulicos (*Estudio Hidráulico del río Arga en la Comarca de Pamplona, 1998*) realizados en el Ayuntamiento de Pamplona, y a los valores de pendiente medias de los tramos. Cada tramo se ha dividido en subtramos que se han calculado dividiendo la longitud de cada tramo por el producto de celeridad y el intervalo de tiempo de simulación elegido. En la Tabla 3 se presentan los valores de los parámetros del modelo de Muskingum para cada uno de los canales considerados en el modelo de la cuenca representado en la Figura 3.

Tabla 2 Valores de los parámetros del modelo de Muskingum de los distintos cauces.

Tramo	Longitud (m)	c (m/s)	x	k (h)	Subtramos
R10	14119,3	1,5	0,2	2,6	16
R20	4106,7	1,1	0,2	1,0	6
R40	2894,0	1,3	0,2	0,6	4
R30	14123,9	1,3	0,2	3,0	18
R50	3529,9	1,5	0,2	0,7	4
R140	6447,7	1,5	0,2	1,2	7
R200	8309,1	1,1	0,2	2,1	13
R250	4748,1	1,1	0,2	1,2	7
R280	4437,0	1,1	0,2	1,1	7
R340	15309,8	1,3	0,2	3,3	20
R370	6241,6	1,1	0,2	1,6	9
R380	10863,7	1,5	0,2	2,0	12
R410	3661,0	1,5	0,2	0,7	4
R440	10742,9	1,1	0,2	2,7	16

4 Aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.

Se han seleccionado los cinco episodios de avenida del río Arga en la cuenca de Pamplona más significativos de los últimos años, desde que se disponen datos de lluvia de las estaciones automáticas. En la Tabla 3 se muestran las fechas de los mismos, y en la Figura 4 se representan los hidrogramas. Todos los episodios elegidos han producido en mayor o menor grado daños por inundaciones en distintos sitios. Previa a la aplicación del modelo, es preciso separar el flujo base de los hidrogramas observados ya que HMS simula los hidrogramas de escorrentía directa. También se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.

4.1 Separación del flujo base.

Una vez seleccionados los eventos en los se va implementar en el modelo, se determina el hidrograma de escorrentía directa (HED) utilizando el método de separación del flujo base del algoritmo de Eckhardt (2005).

$$q_i = \frac{(1 - BFI_{max})}{1 - a BFI_{max}} [Q_i - a(Q_{i-1} - q_{i-1})] \quad ; \quad q_i \geq 0 \quad (5)$$

donde: q_i es la escorrentía directa en el instante i ; Q_i es la escorrentía total en el instante i ; y a y BFI_{max} son los parámetros del modelo. El primer parámetro, a , se relaciona con la recesión del flujo base, el segundo parámetro, BFI_{max} , indica la máxima proporción de flujo base, con respecto a la escorrentía total, que se alcanzaría en la condición de equilibrio, si el almacenamiento de la cuenca se mantuviese constante en un periodo de tiempo suficientemente largo. Los valores de ambos parámetros se han determinado ajustando gráficamente los hidrogramas, en la Figura 4 se pueden observar estos hidrogramas y en la Tabla 3 los valores de los parámetros.

Tabla 3 Valores de los parámetros de separación del flujo base para cada evento en Arazuri.

Evento	a	$BFI_{Máx.}$
Marzo de 2006	0,998	0,6
Abril de 2007	0,999	0,7
Enero de 2009	0,999	0,6
Febrero de 2009	0,999	0,6
Enero de 2010	0,999	0,7

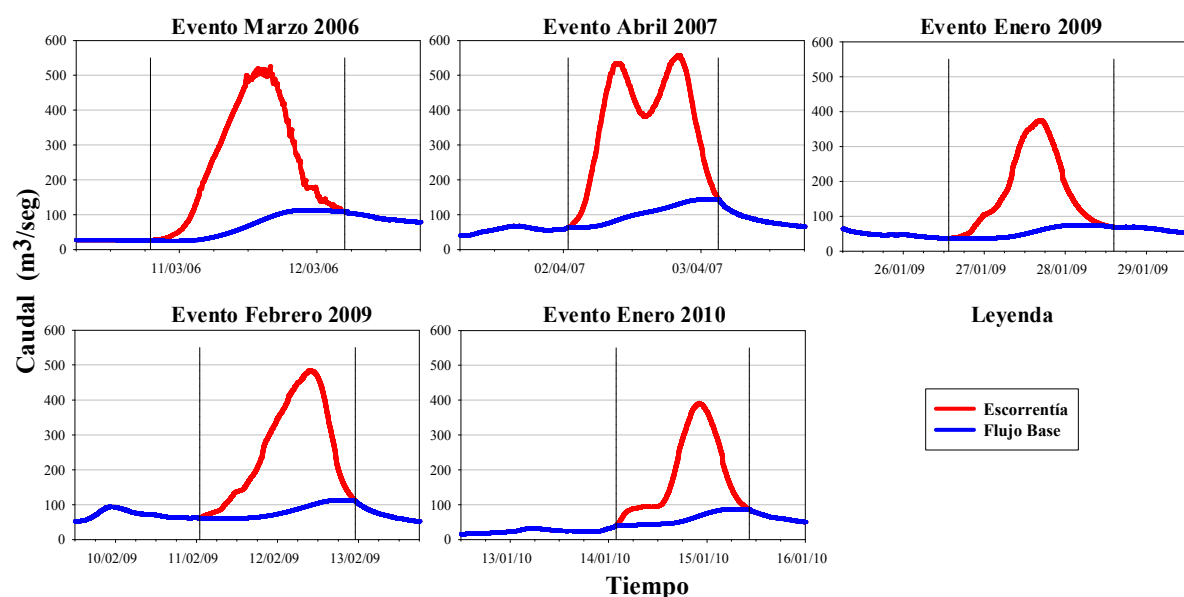


Figura 4 Separación del flujo base para cada evento en Arazuri.

4.2 Análisis de sensibilidad.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros más significativos de los métodos utilizados: número de curva (CN); pérdidas iniciales (I_a); tiempo de tránsito (k); y tiempo de desfase (T_l). Los intervalos de valores de los distintos parámetros se han establecido, partiendo del valor de referencia, incrementando o disminuyendo porcentualmente dicho valor, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Valores del Tiempo al pico y del Caudal punta para los distintos escenarios del análisis de sensibilidad.

CN		I_a (mm)		k (h)		T_l (h)	
Variación	Valor	Variación	Valor	Variación	Valor	Variación	Valor
$V_{ref}-40\%$	57	$V_{ref}=0,20$ S	22,9	$V_{ref}-0,5$ h	1,2	V_{ref}	21,3
$V_{ref}-20\%$	63						
V_{ref}	71	0,10 S	11,5	V_{ref}	1,7	$V_{ref}+20\%$	25,6
$V_{ref}+20\%$	76						
$V_{ref}+40\%$	82	0,05 S	5,7	$V_{ref}+0,5$ h	2,2	$V_{ref}+40\%$	29,9
$V_{ref}+60\%$	88						
$V_{ref}+80\%$	94						

Del análisis gráfico, parece apreciarse que el número de curva, CN , es el parámetro más sensible, su variación tiene un gran efecto sobre el valor del caudal punta simulado y sobre el volumen de escorrentía generado. El parámetro de pérdidas iniciales, I_a , aunque no tan sensible como el CN , también tiene un reflejo importante en la forma del hidrograma, fundamentalmente en el valor del caudal punta y en el volumen de escorrentía generado en la parte inicial del hidrograma. El tiempo de tránsito, k , fundamentalmente afecta al tiempo de pico, es decir, al desfase del hidrograma, y algo menos al valor del caudal punta. Por otra parte, se puede notar que el efecto de la variación del tiempo de desfase, T_l , en el hidrograma simulado es mucho menor que el de los otros parámetros analizados, es decir, es un parámetro poco sensible.

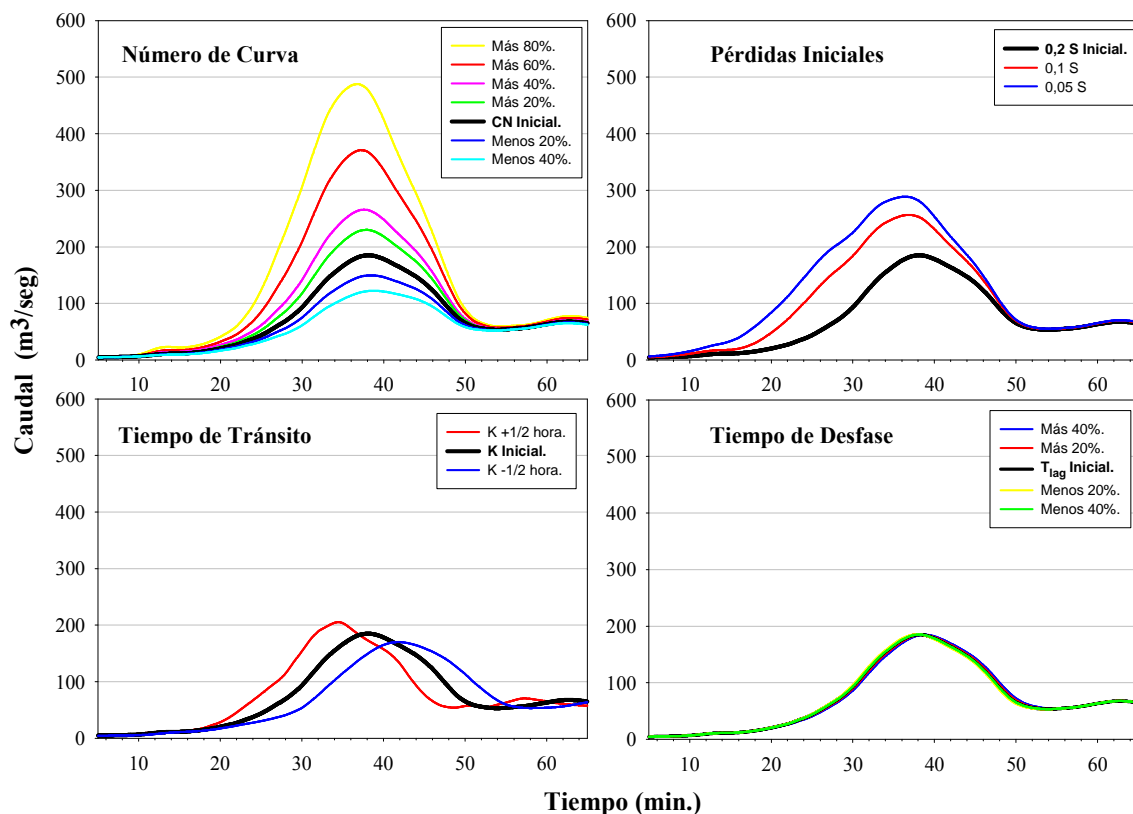


Figura 5 Representación gráfica del análisis de sensibilidad.

5 Resultados.

Se han realizado dos simulaciones, ambas con mismos parámetros, a excepción del tipo de estaciones meteorológicas utilizadas para la división areal de cuenca: en el primer caso solo con las estaciones automáticas (EMAS), y en el segundo caso utilizando también las manuales (EMMs), tal como se ha indicado. Éste último caso es el que proporcionó mejores resultados. En la Figura 6 se representan los hidrogramas observados y simulados para los cinco eventos seleccionados, se observa el modelo simula aceptablemente los hidrogramas observados. Para ver la bondad del ajuste se ha utilizado el Índice de Eficiencia de Nash y Sutcliffe, E , (1.970), índice que representa el grado de semejanza entre ambos hidrogramas, cuyo valor se encuentra entre 0 ó 1:

$$E = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - Q_{sim,j}]^2}{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (6)$$

En donde; Q_{sim} es el caudal simulado; Q_{obs} es el caudal observado y \bar{Q}_{obs} es el caudal medio observado. En la Tabla 5 se muestran los valores para cada evento, que aportan valores de eficiencia elevados, buenos resultados como los resultados gráficos. También se presentan los valores de las diferencias de volumen de los hidrogramas de escorrentía simulados y observados, en tanto por ciento. Dado que son resultados de la aplicación del modelo sin calibrar, dichas diferencias se pueden considerar aceptables, salvo el caso del episodio compuesto del 2007.

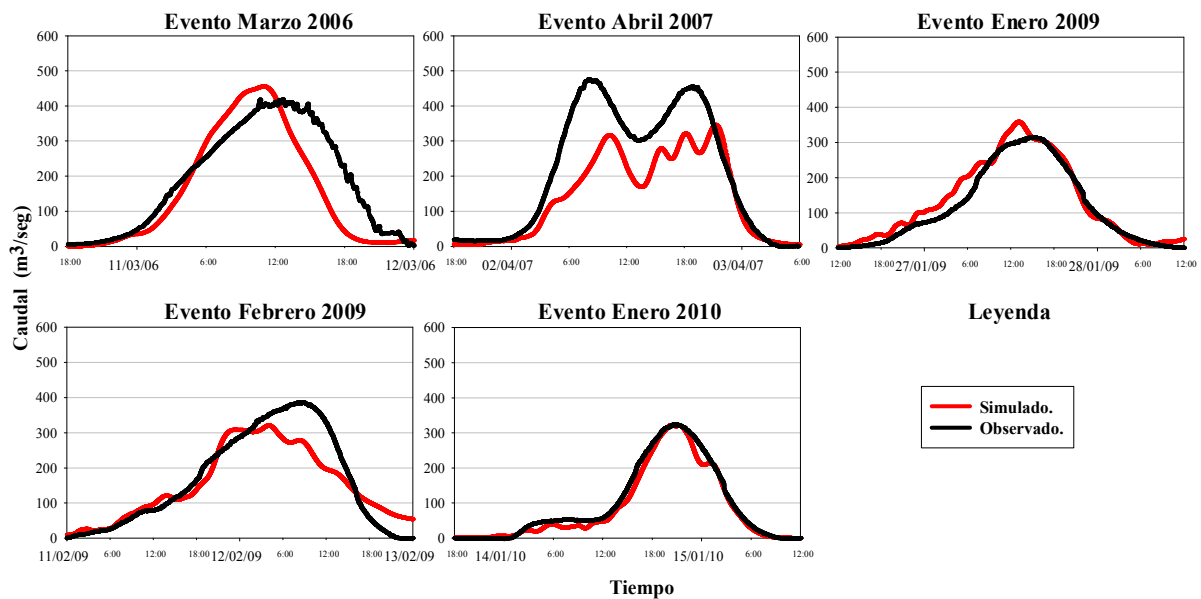


Figura 6 Resultados definitivos para Arazuri.

Tabla 5 Valores de las eficiencias y de las diferencias de volumen de escorrentía.

Evento	Marzo 2006	Abril 2007	Enero 2009	Febrero 2009	Enero 2010
Eficiencia (E)	0,84	0,78	0,93	0,90	0,98
Dif. Vol.(%)	16,6	34,7	-13,4	-4,7	10,3

6 Conclusiones.

Del análisis de sensibilidad se puede afirmar que el parámetro *CN* (Número de Curva) es el más sensible.

En general, los resultados de la aplicación del modelo hidrológico *HEC-HMS*, con las consideraciones adoptadas, son bastante aceptables, por lo que, a priori, los valores asignados a los parámetros del modelo se pueden considerar también aceptables. La incorporación de las estaciones manuales mejoran la simulación.

7 Agradecimientos.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a todas las Instituciones que han colaborado en este trabajo, en concreto: a la Confederación Hidrográfica del Ebro, Área de Hidrología y Cauces, por la disponibilidad para facilitar los datos de aforo necesarios, así como para resolver las distintas cuestiones surgidas; al Gobierno de Navarra, Servicio del Agua, por habernos facilitado toda la información meteorológica y territorial necesaria; y al Ayuntamiento de Pamplona, Área de Proyectos Estratégicos, por la financiación de una beca para realizar el estudio y por la disponibilidad para facilitar cualquier tipo de información.

8 Referencias.

- Chow, V.T., Maidment D.R., Mays L.W., (1994): Hidrológica aplicada. McGraw-Hill. Stª Fe de Bogotá.
- Eckhardt K. (2005): How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Wiley Inter Science, Hydrological Processes, 19, 507-515.
- HEC, 2003. Geospatial Hydrologic Modeling Extension: HEC-GeoHMS User's Manual, Version 1.1, December 2003. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- G.N., 2001. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 1:25.000. Gobierno de Navarra, Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Sección de Suelos y Climatología. Pamplona.
- HEC-HMS (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 3.5, August 2010. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California.
- Iñiguez, J. et al. 1982-1992. Mapa de Suelos de Navarra, escala 1: 50.000. Departamento de Edafología. Universidad de Navarra. Pamplona.
- Mockus V., 1969. National Engineering Handbook, section 4: Hydrology. Soil Conservation Service. Washington, DC.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles, Journal of Hydrology 10, 282-290.
- Ponce, V.M. (1989): Engineering Hydrology: Principles and Practices. Prentice Hall. New Jersey.
- Viessman, W. y Lewis, G.L. (1996): Introduction to Hydrology. Harper Collins. New York.