



Proyecto fin de carrera

Ingeniería Química: Especialidad Medio Ambiente.

# **Calibración de modelos hidrológicos-hidráulicos y análisis de la respuesta hidrológica frente a posibles escenarios de Cambio Climático en la cuenca de Arnás.**

Autora: Ainara Soriano Pina.

Directora: Pilar Brufau García.

Codirector: Daniel López García de la Barrera.



i.

Zaragoza, Septiembre 2010

dos



## **Agradecimientos**

En primer lugar agradecer a mi coordinadora por permitirme realizar este proyecto, y por su ayuda a instruirme en el dominio de la hidrología. Agradecer al codirector del proyecto, Daniel López García de la Barrera por el interés mostrado por el proyecto, y por realizar pequeños retoques a la programación que se ha usado en el mismo. También quiero dar las gracias a la Dra. Pilar García-Navarro por permitirme acompañar a los alumnos del Postgrado en ingeniería de los recursos Hídricos a realizar una excursión por los Pirineos, para ver una serie de cuencas experimentales; entre ellas, Arnás, uno de los objetivos de estudio de este proyecto.

Por supuesto quiero dar las gracias al grupo del Instituto Pirenaico de Ecología dirigido por el Dr. García-Ruiz así como al grupo de Estadística de la Universidad de Zaragoza dirigido por el Dr. Abaurrea por los datos cedidos. También agradecer a la Confederación Hidrográfica del Ebro por participar en este proyecto colaborando con la cesión de datos.

Tengo que dar las gracias también a mis amigas de la carrera, por su apoyo en cada paso, desde el primer examen hasta el proyecto fin de carrera he podido contar con ellas. Agradecer la ayuda moral que he recibido por parte de mis amigos y familia; en especial a mi madre, que ha seguido cada paso del proyecto.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.

Ainara Soriano.

# **CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA FRENTE A POSIBLES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DE ARNÁS**

## **Resumen**

El proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación de carácter multidisciplinar financiado por la D.G.A. "Desarrollo y validación de modelos acoplados hidrológicos e hidráulicos en cuencas a diferentes escalas espaciales". Para poder realizar este proyecto se cuenta con los datos experimentales proporcionados por el Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), los programas de simulación desarrollados en el área de Mecánica de Fluidos (Universidad de Zaragoza) y los datos de precipitación en posibles escenarios de Cambio Global proporcionados por el área de Estadística (Universidad de Zaragoza).

En primer lugar se describe detalladamente la cuenca de Arnás, cuenca experimental elegida como objeto de análisis en este trabajo. Se realiza el estudio de la relación precipitación-escorrentía que se produce en esta cuenca con la ayuda de dos programas de simulación que se detallarán en la memoria. Se lleva a cabo la calibración de algunos parámetros fundamentales en cada uno de los programas de simulación para una posterior calibración/validación de los modelos y de esta forma poder elegir el programa óptimo de simulación para esta cuenca. Para ello se estudia la evolución espacio-temporal del caudal de escorrentía con cada uno de los programas y se compara con el caudal medido en la estación de aforo de la cuenca.

Por último se lleva a cabo el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca frente a diferentes escenarios de cambio climático desde el año 2030 al 2100. Interesa conocer los cambios producidos a lo largo de estos años en cuanto a caudal y a frecuencia e intensidad de avenidas.



# **MEMORIA:**

---

**CALIBRACIÓN DE MODELOS  
HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS Y  
ANÁLISIS DE LA RESPUESTA  
HIDROLÓGICA FRENTE A POSIBLES  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO  
EN LA CUENCA DE ARNÁS**

## ÍNDICE

1.	OBJETIVOS .....	1
2.	INTRODUCCIÓN .....	2
3.	LA CUENCA DE ARNÁS.....	5
4.	PRE-PROCESO DE DATOS.....	8
5.	PROGRAMAS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA .....	10
5.1	El método del número de curva (SCS) .....	10
5.2	Modelo unidimensional de flujo de superficie libre (GUAD1D).....	15
5.3	Modelo simplificado de onda difusiva .....	16
6	VALIDACIÓN/CALIBRACIÓN DE LOS PROGRAMAS .....	18
6.1	Resultados numéricos SCS-Guad1D .....	18
6.1.1	Evento del 13 octubre 2005 .....	19
6.1.2	Evento del 15 agosto 2006.....	20
6.1.3	Evento del 23 noviembre 2003 .....	21
6.1.4	Evento del 23 septiembre 2006 .....	22
6.2	Resultados numéricos obtenidos con el modelo simplificado de onda difusiva .....	23
6.3	Comparación de los programas.....	26
6.4	Conclusiones .....	27
7	ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	29
7.1	Número de curva constante 67 .....	30
7.2	Reforestación.....	31
7.3	Desertización .....	32
8	CONCLUSIONES .....	34
9	BIBLIOGRAFÍA .....	36

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 Localización de la cuenca de Arnás, líneas de nivel de la topografía de la cuenca e instrumentación necesaria para la toma de datos. ....	6
Figura 3. 2 Foto del caudal de escorrentía en una parte de la cuenca de Arnás situada en el Pinineo Aragonés. ....	7
Figura 4. 1. Vista con Saga de la altitud de las distintas zonas de la cuenca y las secciones de ésta. ....	8
Figura 4. 2. Proceso de medición de la sección 2 de la cuenca de Arnas. ....	9
Figura 5.1. 1 Variables en el método de abstracciones del SCS.....	12
Figura 5.1. 2 Hidrograma unitario triangular. ....	13



## INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. 1 Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas por el método del SCS. ....	12
Tabla 5.1. 2 Representación gráfica de la relacion entre el tiempo de concentración y el caudal de pico y el número de curva. ....	14
Tabla 6.1. 1 Evento 13 octubre 2005. Escorrentía experimental y analítica para 1,3,5 y 7 subcuencas. ....	19
Tabla 6.1. 2 Evento 15 agosto 2006. Escorrentía experimental y analítica para 1,3,5 y 7 subcuencas. ....	20
Tabla 6.1. 3 Evento 23 noviembre 2003. Escorrentía experimental y analítica para 1,3,5 y 7 subcuencas. ....	21
Tabla 6.1. 4 Evento 23 septiembre 2006. Escorrentía experimental y analítica para 1,3,5 y 7 subcuencas. ....	22
Tabla 6.2. 1 Valor numérico para los parámetros de infiltración utilizados en la simulación con el modelo simplificado de onda difusiva.....	24
Tabla 6.3 1 Comparación del caudal de escorrentía medido en la estación de aforo y calculado con los distintos métodos numéricos .....	26
Tabla 7.1. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 67 .....	31
Tabla 7.2. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 46 .....	32
Tabla 7.3. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 72 .....	33

## 1. OBJETIVOS

La variabilidad espacio-temporal de los recursos hídricos es fuertemente dependiente de las condiciones ambientales. Las fluctuaciones climáticas y los cambios de cubierta vegetal provocan importantes variaciones en la cantidad y calidad del agua disponible, así como en la frecuencia y magnitud de los eventos hidrológicos extremos. En el área mediterránea la mayor parte de tales recursos se genera en los sectores montañosos, que se comportan como auténticos “islotas” de humedad, muy sensibles, de acuerdo con algunos de los modelos climáticos, a los cambios en la circulación general atmosférica y en el grado de actividad de las bajas presiones mediterráneas. Por otro lado, esas montañas se han visto sujetas en las últimas décadas a un intenso proceso de cambio de usos del suelo que puede resumirse en una brusca contracción de los espacios cultivados en laderas y en una expansión de los ambientes forestales. Este nuevo escenario obliga a disponer de herramientas cada vez más complejas para predecir la tendencia futura de los recursos hídricos en un escenario de Cambio Global y para simular la respuesta hidrológica frente a eventos concretos, en diferentes condiciones de humedad antecedente y de capacidad de reserva de agua en el suelo. Por ello, el empleo de modelos hidrológicos se considera la estrategia más adecuada para mejorar la capacidad predictiva y de gestión.

Los objetivos de este proyecto se resumen en:

- 1.- Encontrar los parámetros de calibración en modelos de simulación hidrológicos-hidráulicos en la simulación de eventos ocurridos en el pasado.
- 2.- Comparar las medidas de precipitación-escorrentía durante eventos tomadas en una cuenca experimental (cuenca de Arnás) con los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones. La cuenca de Arnás se encuentra situada en los Pirineos centrales españoles. Fue cultivada hasta hace 40 años y posteriormente abandonada.
- 3.- Comparar los resultados numéricos que se obtienen con diferentes programas de simulación para establecer cuál es el más adecuado para representar este tipo de situaciones.
- 4.- Analizar el comportamiento hidrológico-hidráulico de la cuenca de Arnás frente a diferentes escenarios de Cambio Climático desde el 2030 al 2100 a medio y largo plazo. Además nos interesa conocer el posible cambio en el funcionamiento hidrológico de la cuenca de Arnás en cuanto a caudal y frecuencia e intensidad de avenidas cuando se producen perturbaciones ambientales como son cambios en la cubierta vegetal o usos del suelo.

## 2. INTRODUCCIÓN

La hidrología cubre todas las fases del agua en La Tierra. Las aplicaciones prácticas de la hidrología se centran en labores tales como diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión y control de sedimentos, control de salinidad, disminución de la contaminación, uso recreacional del agua. Los cambios en la distribución, la circulación o la temperatura de las aguas en la Tierra pueden tener efectos de largo alcance; las glaciaciones, por ejemplo, fueron una manifestación de tales efectos. La actividad humana también puede causar algunos cambios. Los seres humanos aran el suelo, irrigan cultivos, fertilizan tierras, deforestan bosques, bombean aguas subterráneas, construyen presas, arrojan desechos en ríos y lagos, y realizan muchas otras actividades constructivas o destructivas que afectan a la circulación y a la calidad del agua en la naturaleza. [Chow et al. 1994]

En la actualidad, la hidrología juega un papel muy importante en la planificación de los Recursos Hídricos; y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos de ingeniería que tienen que ver con el suministro de agua, drenaje, protección contra inundaciones, planes de emergencia, entre otros. En particular, la Hidrología Ambiental ha experimentado un fuerte desarrollo en los últimos años, particularmente en relación con el Cambio Global, en un intento por identificar los factores que mejor explican la respuesta hidrológica frente a eventos de tipo inundación debidos a fuertes precipitaciones durante cortos periodos de tiempo. Con el objetivo puesto en la necesidad de estudiar en profundidad la evolución y tendencia de los eventos hidrológicos extremos se plantea el análisis del efecto de las fluctuaciones climáticas sobre la generación de escorrentía en una cuenca. La escorrentía se puede definir como la cantidad de agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo [Gaspari et al. 2007]. Dentro de este contexto se hace hincapié en la dinámica de la circulación general atmosférica (temperatura y precipitaciones) y en los grandes cambios de uso del suelo y cubierta vegetal.

Las consecuencias del Cambio Global sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos es en la actualidad uno de los tópicos estudiados con mayor interés en todo el mundo. Una revisión de las mejores revistas de Hidrología confirma que se trata de una línea de investigación puntera y fronteriza, dada la importancia extrema del abastecimiento de agua a centros urbanos, complejos industriales y perímetros de regadío, a lo que se añade su papel como fuente de energía. Las previsiones sobre la evolución de las temperaturas y precipitaciones, basadas en modelos de diferente resolución y grado de incertidumbre, alertan sobre la posibilidad de que los recursos hídricos experimenten a corto y medio plazo importantes fluctuaciones con tendencia claramente negativa. A ello se añade la confirmación del papel de la cubierta vegetal en el ciclo del agua. Estudios recientes [García Ruiz et al. 2001; Beguería et al. 2003] han confirmado la estrecha relación que existe entre la evolución de las precipitaciones y la de los caudales. Así, la ocurrencia de ciclos húmedos y

secos da lugar a periodos de escorrentías abundantes y escasas respectivamente. Sin embargo, las relaciones entre precipitación y escorrentía no son tan sencillas como parecen reflejar las curvas pluviométricas e hidrológicas. Los trabajos citados anteriormente han demostrado que en las últimas décadas se ha producido un cambio en tales relaciones, de manera que para una misma precipitación se genera cada vez menos escorrentía. Igualmente se ha constatado que la frecuencia de avenidas es cada vez menor, sin que haya cambiado la frecuencia con la que ocurren las precipitaciones extremas [López Moreno et al. 2004]. A falta de análisis más detallados, estos cambios sólo pueden atribuirse a la evolución de los usos del suelo y de la cubierta vegetal, que habría aumentado el consumo de agua y la interceptación. Y a escala mensual, mientras las precipitaciones y la temperatura apenas muestran tendencias, los caudales se caracterizan por una tendencia regresiva, estadísticamente significativa, en buena parte de los meses del año, si bien en este caso la evolución de la innivación y de los procesos de retención y fusión nivales pueden jugar un papel aún no bien determinado [López Moreno y García Ruiz 2004]. Recientemente Andréassian (2004) y otros autores han revisado los resultados obtenidos en más de un centenar de cuencas con distinta cubierta vegetal y han comprobado la existencia de una correlación negativa entre el incremento de la densidad de la vegetación y la producción de escorrentía. En España, Gallart y Llorens (2002) han atribuido el descenso de caudal en los principales ríos ibéricos a los cambios de uso en el medio rural y, sobre todo, a la reforestación. En este proyecto se realizan conclusiones de este tipo a tiempo futuro.

Para poder estudiar los factores que influyen en la generación de escorrentía en las cuencas podemos apoyarnos en la información que nos proporcionan estaciones y cuencas experimentales donde se registran precipitaciones, temperaturas, caudal, transporte de sedimentos, humedad del suelo, altura de la capa freática e interceptación por parte de la vegetación. Esta información se utiliza en modelos hidrológicos distribuidos para identificar las áreas generadoras de escorrentía y su variabilidad espacio-temporal, con el fin de predecir la respuesta hidrológica en eventos concretos y para inferir la tendencia de los recursos hídricos a diferentes escalas temporales en función de cambios en la cubierta vegetal y en parámetros climáticos. La modelización se convierte así en un instrumento muy eficaz para facilitar la planificación y gestión de los recursos hídricos en relación con el Cambio Global.

El desarrollo de modelos hidrológicos ha experimentado un fuerte impulso en Europa durante las últimas dos décadas. Los trabajos realizados por Beven, Quine, Kirkby, Bathurst y O'Connally, entre otros, en el Reino Unido, han facilitado el desarrollo de una Hidrología más predictiva y espacialmente distribuida, rompiendo con los viejos modelos de caja negra en los que las entradas al sistema se utilizaban directamente para explicar las salidas.

La Hidrología actual tiene como principales desafíos el análisis de los procesos internos del sistema, sobre todo las diferentes particiones del agua de lluvia (evapotranspiración, trascolación, escorrentía superficial), el movimiento del agua en el suelo (infiltración,

desplazamientos horizontales), distribución espacio-temporal de la humedad e identificación de las áreas de contribución parcial, tanto de agua como de sedimento. Los modelos hidrológicos pretenden finalmente localizar esas áreas de contribución parcial, determinar su papel en el hidrograma de tormenta en diferentes condiciones de humedad y predecir cómo varía la respuesta hidrológica en escenarios cambiantes de cubierta vegetal y de clima. En España, el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) y las confederaciones hidrográficas manejan habitualmente modelos hidrológicos a nivel de grandes cuencas, y pretenden sobre todo mejorar la gestión de los recursos hídricos y no tanto entrar en el detalle del funcionamiento interno de las cuencas y las interacciones entre factores y respuestas.

Para poder realizar las simulaciones hidrológicas se ha necesitado trabajar en el pre-proceso de datos de forma que a partir de los datos disponibles podamos generar datos que los programas de simulación necesitan como condiciones iniciales o datos de base para poder operar. Para ello se ha empleado el programa Saga, que se describe en el capítulo 4 (Pre-proceso de datos). Los modelos hidrológicos que se manejan en este proyecto son el modelo del número de curva y un modelo simplificado de onda difusiva. El método del número de curva es un modelo hidrológico agregado que calcula el caudal de escorrentía producido en una cuenca por un evento de lluvia en función de la pendiente media, el área de la cuenca y el número de curva de la cuenca, un parámetro que da cuenta del uso de la tierra, la cobertura vegetal y el estado de humedad del suelo de la cuenca. El modelo difusivo es un modelo hidrológico distribuido que divide la cuenca en celdas y utiliza leyes de la física para simular el movimiento entre ellas [Beven y Kirkby 1979]. Conjuntamente con el SCS se emplea un modelo hidráulico completo de resolución del flujo de superficie libre (Guad1D) diseñado para resolver flujos transitorios y transporte con difusión en todo tipo de cauces [Burguete 2003]. Estos programas se describen en el capítulo 5.

Antes de poder realizar un estudio cualitativo y cuantitativo de escorrentía en una cuenca en diferentes escenarios de Cambio Global se ha considerado importante validar las herramientas de cálculo y al mismo tiempo poder valorar cuál de las propuestas se puede considerar óptima para realizar este tipo de estudio. Para ello se han realizado diferentes simulaciones en la cuenca experimental de Arnás donde se comparan resultados numéricos con medidas experimentales y tiempos de cálculo. Esta parte se describe detalladamente en el capítulo 6.

En el capítulo 7 se realiza el análisis de escorrentía de la cuenca frente a diferentes escenarios de cambio climático. Se va a estudiar el comportamiento de la cuenca, en caso de que no se actúe sobre ella, o actuando por medio de reforestación o desertificación.

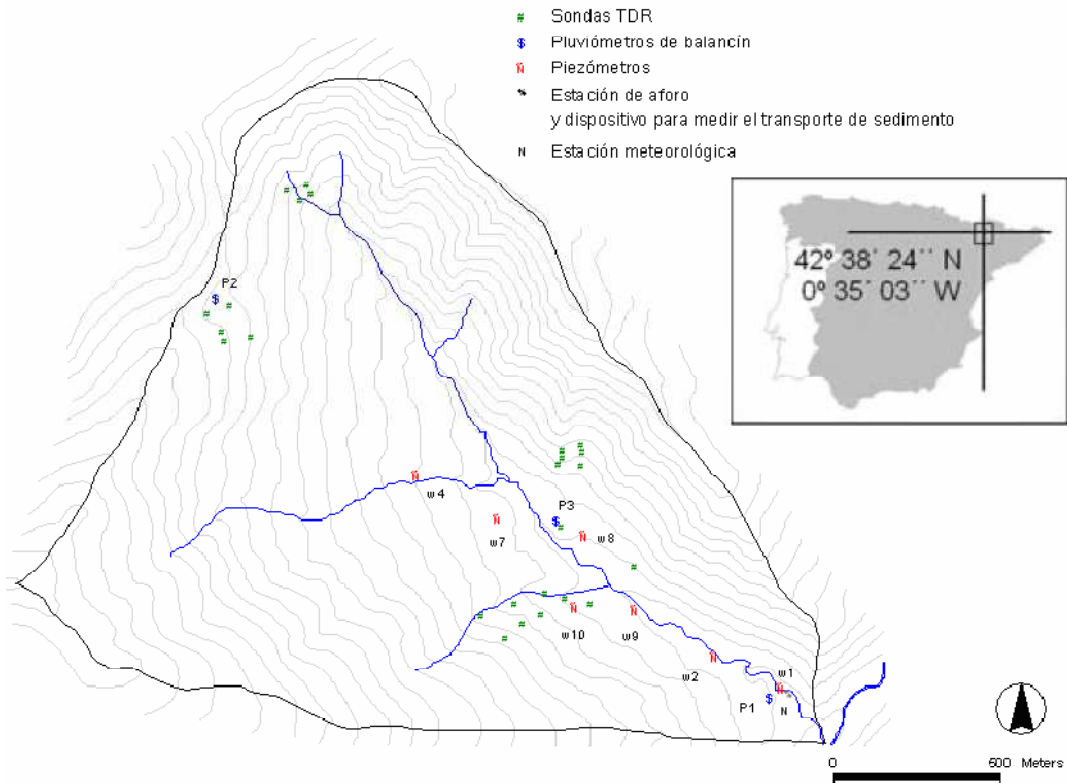
Por último, las conclusiones referidas a la validación de los modelos hidrológicos, y al análisis hidrológico de la cuenca se detallan en el capítulo 8.

### 3. LA CUENCA DE ARNÁS

A lo largo del siglo XX las áreas de montaña han experimentado profundos cambios en los usos del suelo. El uso tradicional, relacionado con una fuerte densidad de población y con la necesidad de autoabastecimiento alimentario, se basó en el aprovechamiento del suelo para el cultivo. La despoblación se acentuó a partir de los años cincuenta del siglo XX, lo que explica (junto a un profundo cambio en las relaciones de la montaña con el exterior) el intenso proceso de abandono de tierras que en la actualidad se ven afectadas por procesos de colonización de plantas. Este problema ha sido estudiado especialmente por T. Lasanta en “La evolución reciente de la agricultura de montaña: el Pirineo aragonés”, y en aproximaciones similares llevadas a cabo en el Sistema Ibérico riojano.

En la actualidad la superficie cultivada en el Pirineo se limita a los fondos de valle, ocupando pequeños retazos de terrazas fluviales en una estrecha franja paralela a los ríos. Sólo en la Depresión Interior Altoaragonesa la presencia de amplios depósitos cuaternarios (terrazas y glaciares) crea un paisaje agrícola dominado por los cultivos cerealistas y forrajeros. Las antiguas laderas cultivadas han sido completamente abandonadas y han entrado en un proceso natural de recolonización vegetal, con diferentes formaciones de matorrales densos, o bien han sido artificialmente reforestadas. Estimaciones realizadas en la cuenca alta del río Aragón permiten concluir que los campos abandonados se han transformado en prados (7 %), matorrales (28 %) y bosques (65 %). Este cambio en la cubierta vegetal y en los usos del suelo tiene, indudablemente, repercusiones de gran entidad sobre la generación de escorrentía [García-Ruiz et al. 2005].

La cuenca de Arnás se localiza en la parte alta del río Aragón, en el valle de Borau, y forma parte del Pirineo central [García-Ruiz et al. 2005] (ver Figura 3.1). Tiene un área de 284 Ha. La cota máxima se alcanza a 1330 metros de altitud y la mínima a 900 metros de altitud. El relieve alterna láminas delgadas de arenisca y margas y pendientes situadas predominantemente entre el 20 y el 40%. El barranco de Arnás circula de manera subsecuente de oeste a este, dando lugar a un fuerte contraste topográfico entre la ladera solana, correspondiente a un abrupto frente de cuesta, y la ladera umbría, de pendiente más suave, coincidiendo con un prolongado reverso de cuesta [García-Ruiz et al. 2000]. El clima predominante en esta zona es un clima sub-mediterráneo de montaña con influencias atlánticas. La precipitación anual media es de 1000 mm en la parte baja de la cuenca. Las precipitaciones máximas tienen lugar en otoño y primavera. Las tormentas estivales son muy frecuentes aunque las precipitaciones más intensas se dan durante los meses de octubre y noviembre. Las nieves son relativamente frecuentes de diciembre a abril, pero sólo permanecen unos días en el suelo [García-Ruiz et al. 2005].



**Figura 3. 1** Localización de la cuenca de Arnás, líneas de nivel de la topografía de la cuenca e instrumentación necesaria para la toma de datos.

Esta cuenca fue cultivada hasta hace 40 años, luego abandonada y afectada por una recolonización de plantas. En la actualidad los antiguos campos de cultivo se hallan cubiertos de matorral, con tendencia a bosque abierto (ver Figura 3.2). El suelo de la cuenca es Flysh Eoceno que consiste en capas alternas de arenisca y mármol. Sin embargo, en la solana de la cuenca domina el regosol calcáreo, con baja capacidad de retención de agua y elevada pedregosidad [García-Ruiz et al. 2000]. La baja capacidad de infiltración tiende a decrecer con la profundidad del suelo [García-Ruiz et al. 2005]. Una precipitación de pocos milímetros es suficiente para producir un repentino incremento de caudal debido probablemente a la pendiente, al pequeño tamaño de la cuenca y a las extensas áreas con baja densidad de vegetación y suelos delgados [García-Ruiz et al. 2005]. La intensidad de respuesta muestra una alta variabilidad dependiendo de la intensidad de las precipitaciones y de las condiciones de humedad del suelo antes de la inundación. La forma del hidrograma sugiere que la cuenca de Arnás es dominada por los procesos en los que el agua escurre por la superficie. Sin embargo, puede ocurrir que tormentas más intensas no generen picos de flujo, lo que lleva a pensar en la existencia de diferentes áreas generadas por infiltración [García-Ruiz et al. 2005].



**Figura 3. 2 Foto del caudal de escorrentía en una parte de la cuenca de Arnás situada en el Pinineo Aragonés.**

La cuenca experimental de Arnás ha sido equipada con una estación meteorológica (Figura 3.1) que recoge datos de temperatura y precipitación y con instrumentos para la medición continua del caudal y del sedimento transportado [García-Ruiz et al. 2000]. Los datos recogidos en la instrumentación han sido examinados y analizados por el equipo de investigación del IPE (Instituto Pirenaico de Ecología) liderado por García-Ruiz y nos han sido cedidos para poder realizar este proyecto.



#### 4. PRE-PROCESO DE DATOS

De los distintos datos que poseemos de la cuenca experimental de Arnás en forma de mapas se han empleado para este estudio el mapa de elevaciones y el mapa de secciones transversales. También se utilizará de manera ligera el mapa de vegetación. El mapa de elevaciones muestra la altura del terreno con respecto al nivel del mar de las distintas zonas de la cuenca y a partir de él queda fijada la red de canales de la cuenca. El mapa de secciones muestra las secciones trasversales que han sido medidas y que definen el cauce. El mapa de vegetación se tendrá en cuenta para fijar algunos parámetros que se utilizarán en el análisis de la cuenca.

Se dispone también de datos meteorológicos referentes a dos tipos de eventos: eventos en condiciones secas, con los piezómetros secos o con los niveles freáticos muy profundos, y eventos en condiciones húmedas. Para cada uno de los eventos disponemos de datos medidos cada cinco minutos de precipitación (mm) caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y sedimentos ( $\text{Kg/s}$ ).

El pre-proceso de datos se lleva a cabo mediante un programa llamado SAGA gratuito y libre por internet. Es un programa geo-científico sencillo que introduce a la utilización de datos geográficos y al tratamiento de ellos en el entorno de los programas denominados GIS. En este caso, los mapas de entrada al programa SAGA son un mapa de elevaciones de la cuenca y el mapa de secciones trasversales de los canales de la cuenca, datos de los que disponemos y facilitados por el grupo del IPE. Los mapas se procesan en formato de texto, como una matriz de datos, y SAGA los reproduce como muestra la figura 4.1.

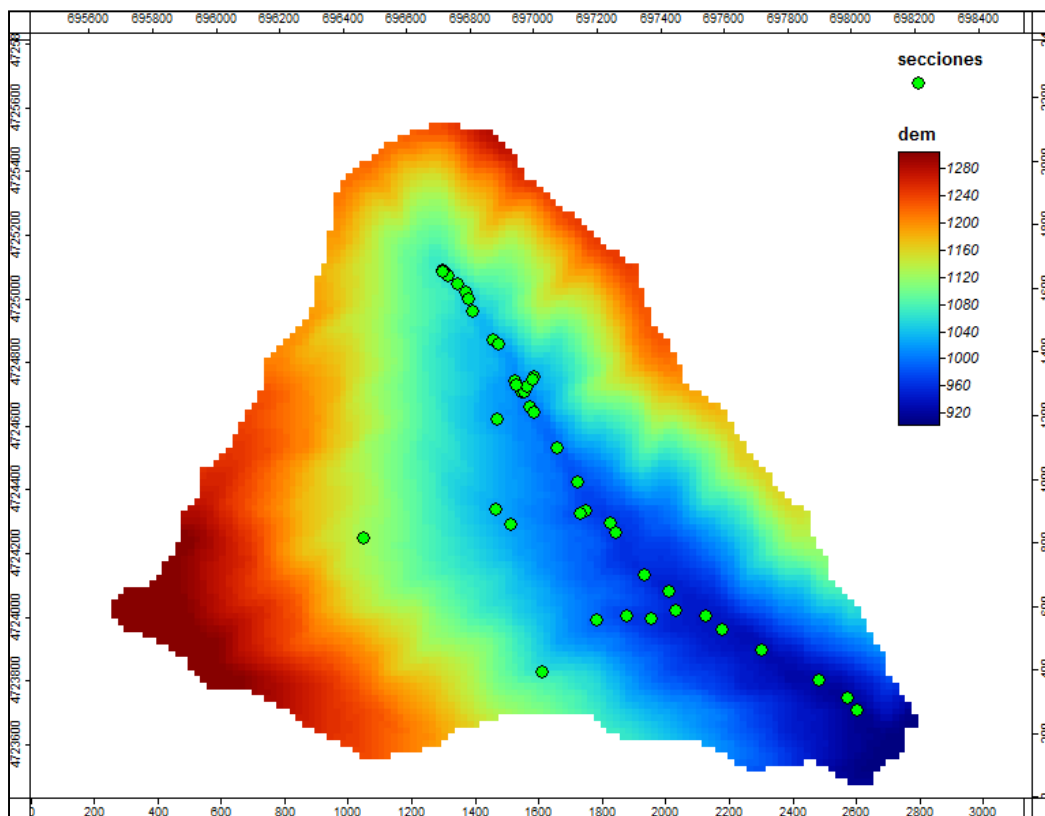


Figura 4. 1. Vista con Saga de la altitud de las distintas zonas de la cuenca y las secciones de ésta.

En la Figura 4.1, los círculos verdes corresponden a puntos que representan las secciones transversales del río. El canal principal y los canales secundarios están divididos en diferentes secciones. Estas secciones han sido medidas empleando cinta métrica normal (Figura 4.2) y empleando una mira topográfica como referencia del plano horizontal. Los puntos en los que se midieron las secciones transversales se ubicaron topográficamente mediante el empleo de un Sistema de Posicionamiento Global de mediana precisión (entre 5 y 10 m) [Vázquez Z. y Lana-Renault 2006]. El cauce principal viene definido por 27 secciones, uno de los cauces secundarios está definido con dos secciones, otros dos cauces con cinco secciones cada uno y un último, con seis.



**Figura 4. 2. Proceso de medición de la sección 2 de la cuenca de Arnas.**

Por otro lado, el mapa de elevaciones del río define perfectamente el canal principal de la cuenca al que drena el agua desde cualquier parte de la cuenca. A partir de este mapa y del mapa de secciones transversales, SAGA crea un mapa de red de canales, a partir del cual divide la cuenca en subcuencas. (Anexo II.II)

Una vez creados los mapas de red de canales y de subcuencas, para una, tres, cinco y siete subcuencas se calcula el área, la pendiente y la longitud hidráulica para cada una de las subcuencas en cada caso (una, tres, cinco y siete subcuencas).

Para una posterior utilización se necesita saber en qué sección verterá cada una de las subcuencas. Las coordenadas de las secciones se utilizarán referidas al eje del canal principal, mientras que en Saga se representan según las coordenadas X, Y. Para solucionar esta situación se calcula, dadas las coordenadas X Y, la distancia entre cada sección con la primera de ellas, siendo ésta la posición cero. Las secciones de los cauces secundarios se suprimen ya que para el estudio sólo interesan las correspondientes al canal principal. (Anexo II.II, tabla II.1)

## 5. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

En este proyecto se estudia la cuenca de Arnás analizando el flujo superficial. Existen varios modelos para estudiar el flujo superficial y los procesos de infiltración que tienen lugar en la cuenca desde el momento que ocurre una precipitación. Los modelos hidrológicos que se usan en la simulación de este tipo de procesos dependen de la información de la que se dispone y del nivel de precisión que se quiere alcanzar en los resultados. Si se trata de una cuenca extensa con poca información se necesita un modelo hidrológico con pocos datos de entrada como es el método del número de curva SCS (Soil Conservation Service) junto a un modelo hidráulico fiable y rápido como es un modelo 1D (Guad1D). El SCS es un modelo agregado en el que sólo se necesitan conocer dos parámetros de las subcuencas: el coeficiente de rugosidad del terreno y la relación entre el tipo de suelo y la vegetación que hay en él. También se ha utilizado un modelo difusivo para flujo superficial basado en un modelo hortoniano. En este caso, son muchos más los parámetros que entran en juego y que hay que estudiar con respecto a la cuenca, aunque en este proyecto sólo se analizan los referidos a la infiltración.

### 5.1 El método del número de curva (SCS)

El método del número de curva (curve number method, más conocido por SCS y desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos) es un modelo hidrológico que estima la escurrentía en función del número de curva teniendo en cuenta el área, la pendiente y la longitud hidráulica de una cuenca fluvial. Se aplica en caso de disponer de poca información de la cuenca o si se quiere llevar a cabo una simulación muy rápida. Es utilizado debido a su simplicidad y bajo coste computacional.

El SCS es un modelo hidrológico de tipo agregado; es decir, trata cada cuenca como un conjunto discreto de subcuencas y calcula los hidrogramas de salida de cada una de ellas teniendo en cuenta sólo dos parámetros de cada subcuenca (aparte de la topografía de la misma): el coeficiente de rugosidad de Manning y el número de curva. El número de curva es un parámetro adimensional tabulado que está relacionado con la cubierta vegetal del terreno, con el tipo de suelo y con la humedad del mismo. El número de Manning se utiliza para el cálculo del flujo en canales abiertos y da cuenta de la rugosidad del tipo de suelo y de la geometría.

El modelo del número de curva utilizado es una combinación del método del número de curva del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU y el método del hidrograma unitario del mismo Servicio de Conservación. El primero de ellos calcula el caudal efectivo que se produce como respuesta de un evento de precipitación, de esta manera se calcula la precipitación efectiva. El método del hidrograma unitario calcula a partir de la precipitación efectiva el caudal ( $Q(t)$ ) a la salida de la cuenca. Este modelo ha sido desarrollado en el área de Mecánica de Fluidos.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU desarrolló un método sencillo para calcular la lluvia efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad. Tomando la tormenta como un todo, la altura de precipitación efectiva o escorrentía directa ( $P_e$ ) es menor o igual a la profundidad de precipitación ( $P$ ), al igual que la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca ( $F_a$ ) es menor o igual a alguna retención potencial máxima ( $S$ ). Hay una cantidad de precipitación denominada abstracciones iniciales ( $I_a$ ) antes del encharcamiento para la cual no ocurrirá escorrentía. Así pues la relación entre las cantidades reales y las potenciales son iguales.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Si combinamos las ecuaciones anteriores y despejamos  $P_e$  resulta:

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

La siguiente relación empírica se desarrolló tras estudiar los resultados de diversas cuencas experimentales:

$$I_a = 0.2 * S$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se puede expresar la escorrentía directa en función únicamente de la retención potencial y de la profundidad de precipitación.

$$P_e = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S}$$

Al representar en gráficas la información de  $P$  y  $P_e$  para muchas cuencas, el SCS encontró curvas características. Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curva CN, tal que  $0 \leq CN \leq 100$ . Para superficies impermeables y superficies de agua  $CN = 100$ ; para superficies naturales  $CN < 100$  [Chow et al. 1994].

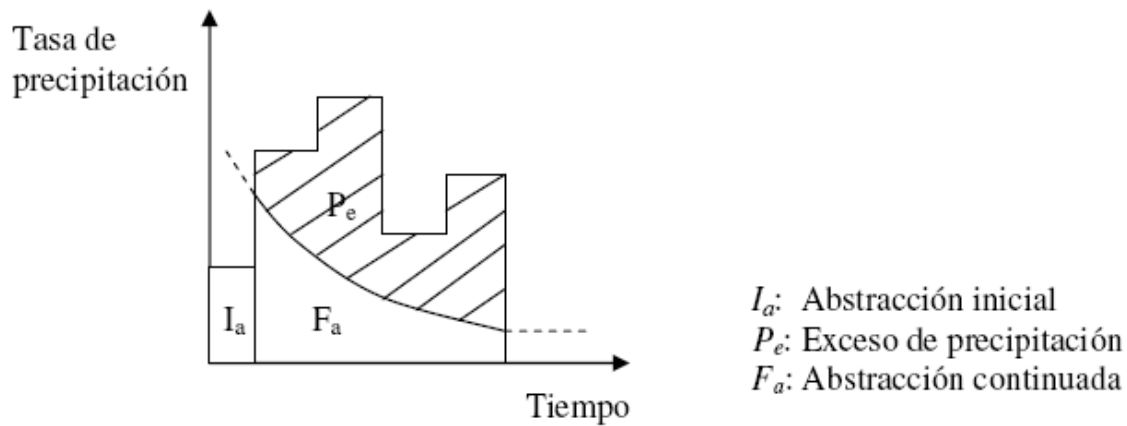


Figura 5.1. 1 Variables en el método de abstracciones del SCS

El número de curva y la retención potencial máxima  $S$  se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$S(mm) = \frac{25400}{CN} - 254$$

Como ya se ha dicho hay que tener en cuenta las condiciones antecedentes de humedad. Estas condiciones se reflejan en la tabla siguiente:

Condiciones de humedad	Grupo AMC	Lluvia antecedente total en 5 días (en pulgadas)	
		Estación inactiva	Estación activa
Condiciones secas	I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
Condiciones normales	II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
Condiciones húmedas	II	Mayor que 1.1	Mayor que 2.1

Tabla 5.1. 1 Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas por el método del SCS.

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales, y se establecen las siguientes relaciones para las otras dos condiciones [Chow et al. 1994] :

$$CN(I) = \frac{4,2CN(II)}{10 - 0,058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0,13CN(II)}$$

Una vez que se dispone de la precipitación efectiva se puede calcular el hidrograma unitario para cada uno de los pasos de tiempo en que se ha dividido cada evento de lluvia. El hidrograma final será la convolución de hidrogramas unitarios para todos los pasos de tiempo. Dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración del exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede calcularse a partir del hidrograma adimensional SCS según las ecuaciones siguientes:

$$q_p = \frac{2.08 \cdot A}{t_p}$$

$$t_p = 0.67 t_c$$

$$T_b = T_p + t_r = 2.67 \cdot T_p$$

$$t_c = \frac{L^{0.8} \cdot (S + 1)^{0.7}}{1140 \cdot Y^{0.5}}$$

$q_p$  (m<sup>3</sup>/s): pico del hidrograma unitario

$A$  (km<sup>2</sup>): área de la cuenca

$L$  (pies): Longitud hidráulica de la cuenca

$Y$  (tanto por uno): pendiente media de la cuenca

$t_c$  (h): tiempo de concentración

$T_b$  (h): tiempo base del hidrograma unitario

$T_p$  (h): tiempo al pico del hidrograma unitario

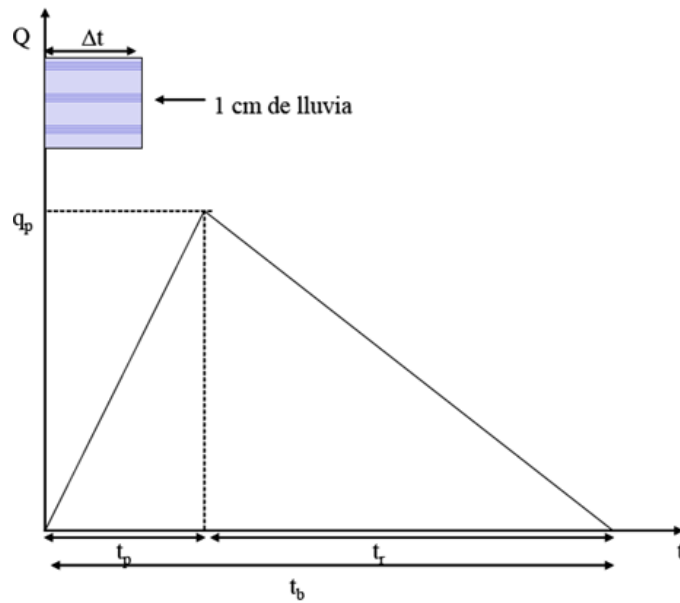


Figura 5.1. 2 Hidrograma unitario triangular.

Para una mayor comprensión de los resultados, en primer lugar se va a estudiar la relación que guarda el número de curva con el caudal y con el tiempo de concentración combinando las ecuaciones anteriores.

$$t_c = \frac{L^{0.8} \cdot \left( \frac{25400}{CN} - 254 + 1 \right)^{0.7}}{1140 \cdot Y^{0.5}}$$

$$q_p = \frac{2.08 \cdot A}{t_p} = \frac{2.08 \cdot A}{0.67 \cdot t_p}$$

Conocida el área, la pendiente y la longitud hidráulica quedan el tiempo de concentración y el caudal pico dependientes del número de curva. Así, dando valores al número de curva se ve la tendencia que tiene cada uno.

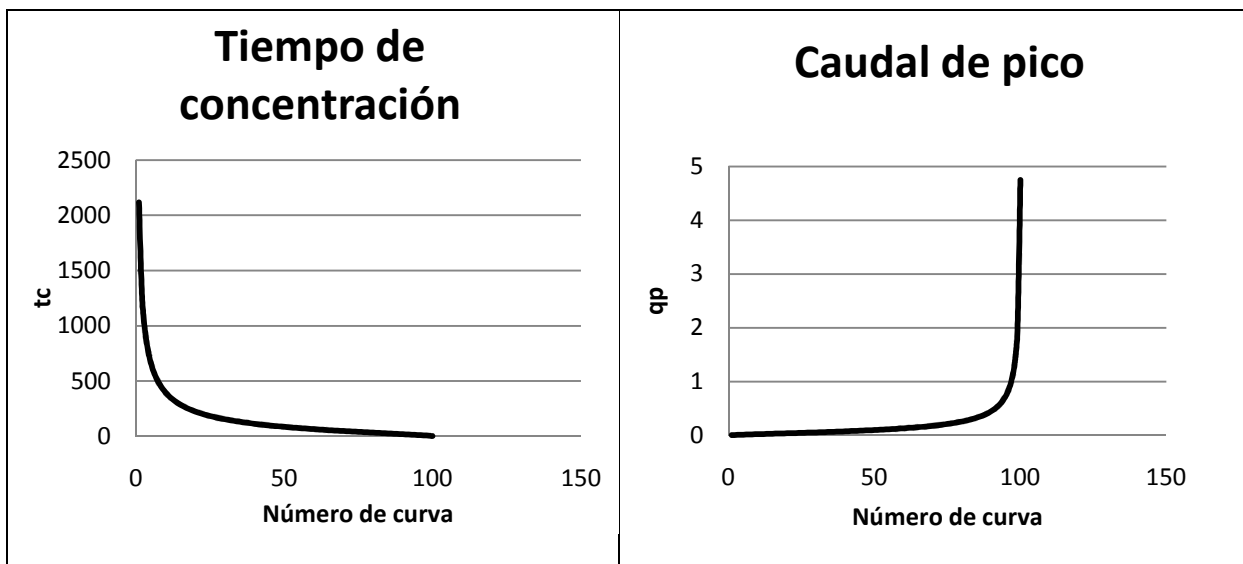


Tabla 5.1. 2 Representación gráfica de la relación entre el tiempo de concentración y el caudal de pico y el número de curva.

Se puede observar en la gráfica que al aumentar el número de curva disminuye el tiempo de concentración. Como ya se ha dicho, el número de curva está relacionado con la vegetación y con el tipo de suelo. Así, si aumenta la vegetación, el número de curva disminuye y aumenta el tiempo de concentración, lo que es lógico al haber un mayor rozamiento. En cambio, solo si el suelo es compacto, si disminuye la vegetación aumenta el número de curva y disminuye el tiempo de concentración ya que el rozamiento es menor. Recordamos que el tiempo de concentración es el tiempo que tarda una partícula de agua desde que cae a la cuenca hasta que llega al punto de interés [Mays 2001].

El caudal pico aumenta con el número de curva, si la vegetación es menor la escorrentía será mayor. Además como el tiempo de concentración disminuye con el número de curva es lógico que el caudal pico aumente ya que son inversamente proporcionales.

Se va a llevar a cabo el análisis de la cuenca de Arnás, tratándola como una sola cuenca y como un conjunto de tres, cinco y siete subcuencas. Como ya se ha dicho será el programa Saga el que se encargará de la división en subcuencas y de dar las medidas de cada una.

Los datos de precipitación entran en el programa en formato “.dat”. El primer dato corresponde al número de datos que aparecen en el archivo de precipitación. Así para cada subcuenca tendremos un archivo de precipitación. En el caso de Arnás, este archivo será igual para cada subcuenca ya que solo se tienen datos de precipitación a partir de un pluviómetro para toda la cuenca.

En el archivo de entrada correspondiente a “config.dat” se escribe el número de subcuencas, la pendiente, longitud hidráulica y el área, así como el número de curva asignado a cada subcuenca. El resultado es un archivo en que aparece el caudal correspondiente en el tiempo a cada dato de precipitación. Con estos datos se comparará el caudal obtenido para diferentes números de curva con el caudal real medido, así se elegirá el número de curva más adecuado para cada subcuenca según las condiciones de humedad del suelo de los distintos eventos analizados.

### **5.2 Modelo unidimensional de flujo de superficie libre (GUAD1D)**

GUAD1D es un módulo de cálculo hidráulico creado para resolver numéricamente flujos transitorios unidimensionales y transporte con difusión en cauces de geometría arbitraria, desarrollado en el área de Mecánica de Fluidos [Burguete 2003]. El modelo de simulación combina la resolución por métodos numéricos precisos de alto orden el sistema de ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento del flujo de superficie libre. El programa conecta los datos o previsiones de lluvia o caudal de las diferentes subcuencas dando como resultado un único hidrograma de salida para la cuenca. Este programa de simulación de flujos unidimensionales GUAD1D fue desarrollado en el área de Mecánica de Fluidos.

La entrada de datos se ejecuta a partir del archivo “.xml” en el que se anotan el caudal que vierte en cada una de las secciones correspondientes a cada una de las subcuencas a diferentes tiempos. En este archivo se anota también la distancia entre cada una de las 27 secciones de la cuenca. Guad1D representa una convolución de la escorrentía para todas las subcuencas. El resultado es conocer en el último punto de la cuenca la “suma” de escorrentía de todas las subcuencas.



### 5.3 Modelo simplificado de onda difusiva

Este modelo ha sido desarrollado igualmente en el área de Mecánica de Fluidos. El método simplificado de onda difusiva es un modelo distribuido de precipitación-escorrentía-erosión-sedimentación-infiltración. Los modelos distribuidos dividen la cuenca en áreas más pequeñas (celdas) en las cuales, se calcula la conversión de un determinado evento de precipitación en agua superficial para después, transportar dicha agua entre las celdas mediante un modelo de flujo superficial bidimensional muy simplificado. También realiza el cálculo de flujos subterráneos en el que cada celda va a contener información sobre los parámetros relevantes del terreno. Durante la simulación, se va a llevar una cuenta explícita de cómo está repartida el agua en esa celda entre los niveles superficial, subsuperficial y freático. El archivo de entrada al programa es un archivo de datos de lluvia y el programa calcula para cada celda y cada paso de tiempo los niveles de flujo superficial.

El modelo presupone tres niveles (o almacenes) de agua bien diferenciados, el nivel superficial, el nivel subsuperficial y el nivel subterráneo o freático y calcula el flujo de agua para cada uno de ellos. Una vez calculada la cantidad de agua que interceptan las plantas, se supone que el resto de lluvia llega hasta el suelo. Los siguientes procesos del método son el cálculo de infiltración y percolación.

El método de cálculo de infiltración utilizado es el método de Horton. Horton describió el flujo superficial despreciando la interceptación por vegetación. Definió la escorrentía como la parte de la lluvia que no es absorbida por infiltración. Si el suelo tiene una capacidad de infiltración “ $f$ ”, entonces cuando la lluvia “ $i$ ” es menor que “ $f$ ”, la lluvia es absorbida completamente y no existe escorrentía superficial. En caso de que “ $i$ ” sea mayor que “ $f$ ”, la escorrentía superficial ocurrirá a una tasa de  $(i-f)$ . A esta diferencia  $(i-f)$  Horton le dió el nombre de “exceso de lluvia”. Consideró que la escorrentía superficial tomaba la forma de flujo en láminas. A medida que el flujo se acumulaba moviéndose a lo largo de la pendiente, su profundidad aumentaba hasta que descargaba en un canal. El suelo almacena el agua infiltrada y luego la libera lentamente como flujo subsuperficial para entrar en la corriente como flujo base durante los periodos secos. De entre los métodos que existen para calcular la infiltración, el modelo hortoniano es el más adecuado para nuestro caso, ya que el método funciona para superficies naturales con capas delgadas de suelo y con baja capacidad de infiltración.

La ecuación de Horton se describe de la siguiente manera:

$$i = i_c + (i_0 - i_c) * e^{-k*\tau}$$

[Gupta 2008, Bedient et al. 2008]

donde  $i$  es la tasa de infiltración,  $i_c$  es la tasa constante de infiltración hacia la que tiende la fórmula conforme aumenta  $\tau$ ,  $i_0$  es la tasa inicial de infiltración,  $k$  es una constante de decaimiento y  $\tau$  es el tiempo de oportunidad que coincide con el tiempo que lleva mojada la celda.

Del agua que infiltra en el suelo, la mayor parte percola hasta zonas más profundas. Para calcularlo será necesario conocer la capacidad de percolación, parámetro que incluye la permeabilidad primaria y secundaria. El nivel de agua percolada se representa entonces con la siguiente ecuación:

$$h_{perc} = k_p * dt$$

Donde  $h_{perc}$  es el nivel de agua percolada y  $k_p$  la capacidad de percolación.

Una vez calculado el nivel de agua para los tres niveles, se procede a simular el movimiento de agua. Para ello, se utiliza el modelo difusivo, o modelo de onda difusiva el que el movimiento del agua viene gobernado únicamente por la pendiente de la superficie libre y el rozamiento.

## 6 VALIDACIÓN/CALIBRACIÓN DE LOS PROGRAMAS

La validación de los modelos hidrológicos es un paso fundamental para comprobar su adecuación y capacidad predictiva. Para ello se necesita conocer datos relativos a los parámetros que se van a analizar.

En este apartado se van a analizar cuatro eventos: dos eventos secos (13 octubre 2005 y 15 agosto 2006) y dos eventos húmedos (23 noviembre 2003 y 23 septiembre 2006). Para cada uno de estos eventos se va a calcular el caudal de escorrentía en el punto final del cauce y se va a comparar con los datos de escorrentía medidos para calibrar los métodos numéricos descritos en el apartado anterior.

### 6.1 Resultados numéricos SCS-Guad1D

El primer programa con el que se realiza el estudio combina el método del número de curva (SCS) con el cálculo de flujos unidimensional (Guad1D).

El análisis se va a realizar para los siguientes casos: tomar la cuenca como una sola cuenca, dividirla en tres subcuencas, en cinco y en siete subcuencas. El programa SCS calcula el caudal de escorrentía de cada subcuenca a partir de datos de lluvia que se tienen de cada evento. El Guad1D, a partir de esos datos de caudal, calcula la escorrentía en el punto final de la cuenca (aforo).

El estudio consiste en modificar uno de los parámetros de entrada al programa SCS, de manera que el caudal que se obtenga en el punto final de la cuenca para cada evento, coincida con los datos medidos que se tienen de caudal. El parámetro a modificar es el número de curva, que como ya se ha dicho, está relacionado con el tipo de suelo, la vegetación y la humedad del suelo.

En las gráficas recogidas en el Anexo IV, se puede ver para cada evento y para cada caso en cada evento (1, 3, 5 y 7 subcuencas) el caudal de escorrentía con diferentes números de curva. Una vez seleccionado el número de curva óptimo, se ha de estudiar el caso más adecuado para cada evento.

A continuación se presentan, como ejemplo, las gráficas correspondientes a la precipitación-escorrentía de los diferentes eventos en los distintos casos estudiados. El caudal  $Q(m^3/s)$  representa el caudal de aforo medido experimentalmente mientras que  $Q$  con un número entre paréntesis, representa el caudal de escorrentía obtenido de la simulación en el mismo punto del cauce para el número de curva elegido en cada caso y que es el que figura dentro del paréntesis. En el caso en que entre paréntesis aparezca más de un número, éstos corresponden a cada una de las subcuencas en que se divide la cuenca. La precipitación viene dada en mm. En el eje de abscisas se representa el tiempo en segundos, el eje de ordenadas derecho representa la precipitación en milímetros y en el eje de ordenadas izquierdo el caudal en metros cúbicos por segundo, de tal forma que en el eje de abscisas de arriba se encuentra la precipitación caída a lo largo del tiempo en la fecha indicada para cada

evento mientras que en el eje de abscisas de abajo podemos ver la evolución temporal del caudal.

### 6.1.1 Evento del 13 octubre 2005

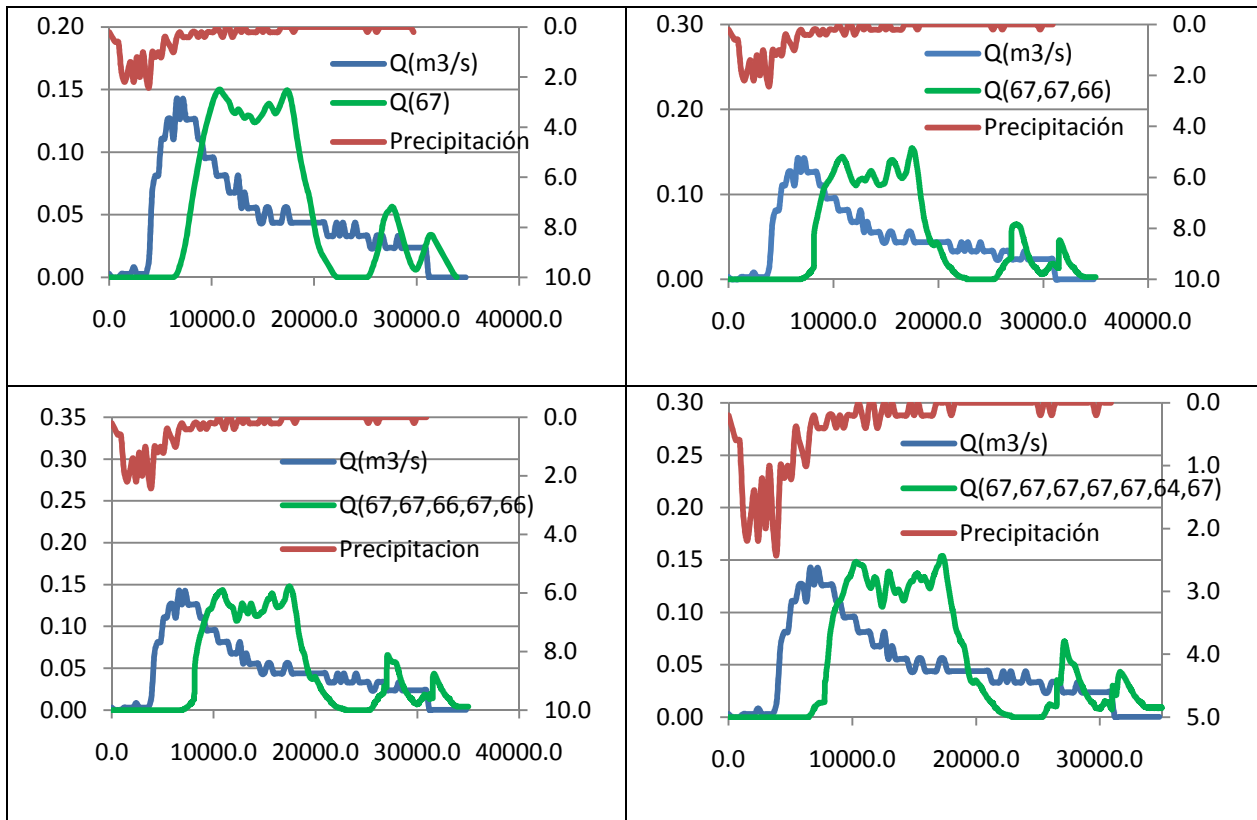


Tabla 6.1. 1 Gráficas correspondientes al evento 13 octubre 2005. Escorrentía experimental y analítica para 1, 3, 5 y 7 subcuencas.

En estas gráficas se aprecia que para una misma precipitación, el dividir la cuenca en 1, 3, 5 y 7 subcuencas da resultados similares para la escorrentía, siendo los números de curva utilizados prácticamente los mismos.

## 6.1.2 Evento del 15 agosto 2006

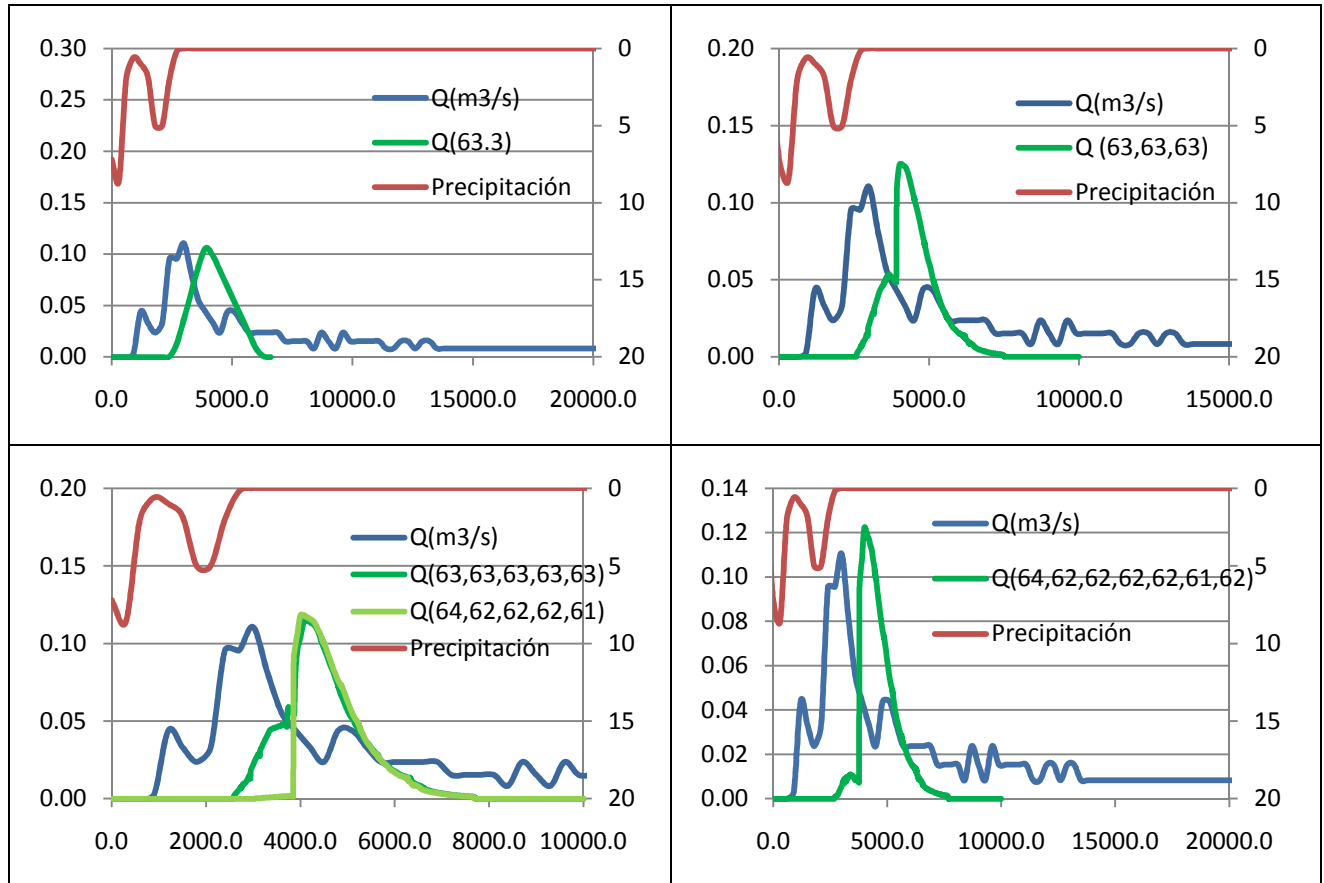


Tabla 6.1. 2 Gráficas correspondientes al evento 15 agosto 2006. Escorrentía experimental y analítica para 1, 3, 5 y 7 subcuencas.

En esta tabla se pueden ver las gráficas correspondientes al evento del 15 de agosto del 2006 para la división de la cuenca en 1, 3, 5 y 7 subcuencas. En este caso se aprecia una mejor afinación en caso de dividir la cuenca en 5 subcuencas, para números de curva de 63 en todas ellas. La aproximación al caudal medido si se toma como una sola cuenca, con un número de curva de 63.3 también es bastante buena.

## 6.1.3 Evento del 23 noviembre 2003

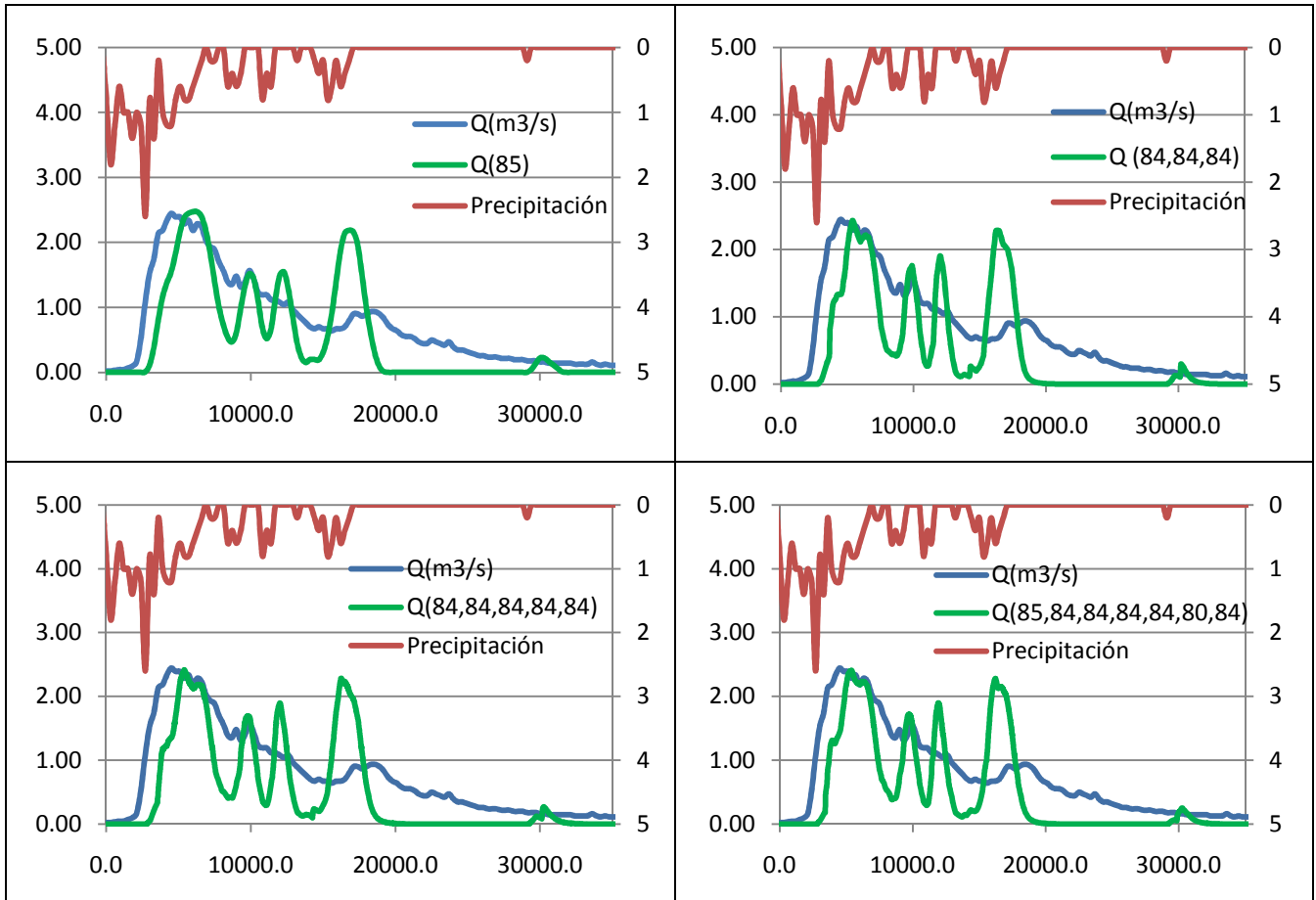


Tabla 6.1. 3 Gráficas correspondientes al evento 23 noviembre 2003. Escorrentía experimental y analítica para 1, 3, 5 y 7 subcuencas.

Para el evento del 23 de noviembre de 2003, se observa gráficamente que los resultados obtenidos dividiendo la cuenca en 3, 5, y 7 son prácticamente los mismos. La división en subcuencas da a los resultados una mayor afinación, pero en este caso, tomando la cuenca como una sola para un número de curva de 85, se aprecia que el caudal máximo obtenido de la simulación coincide cuantitativamente con el caudal medido.

## 6.1.4 Evento del 23 septiembre 2006

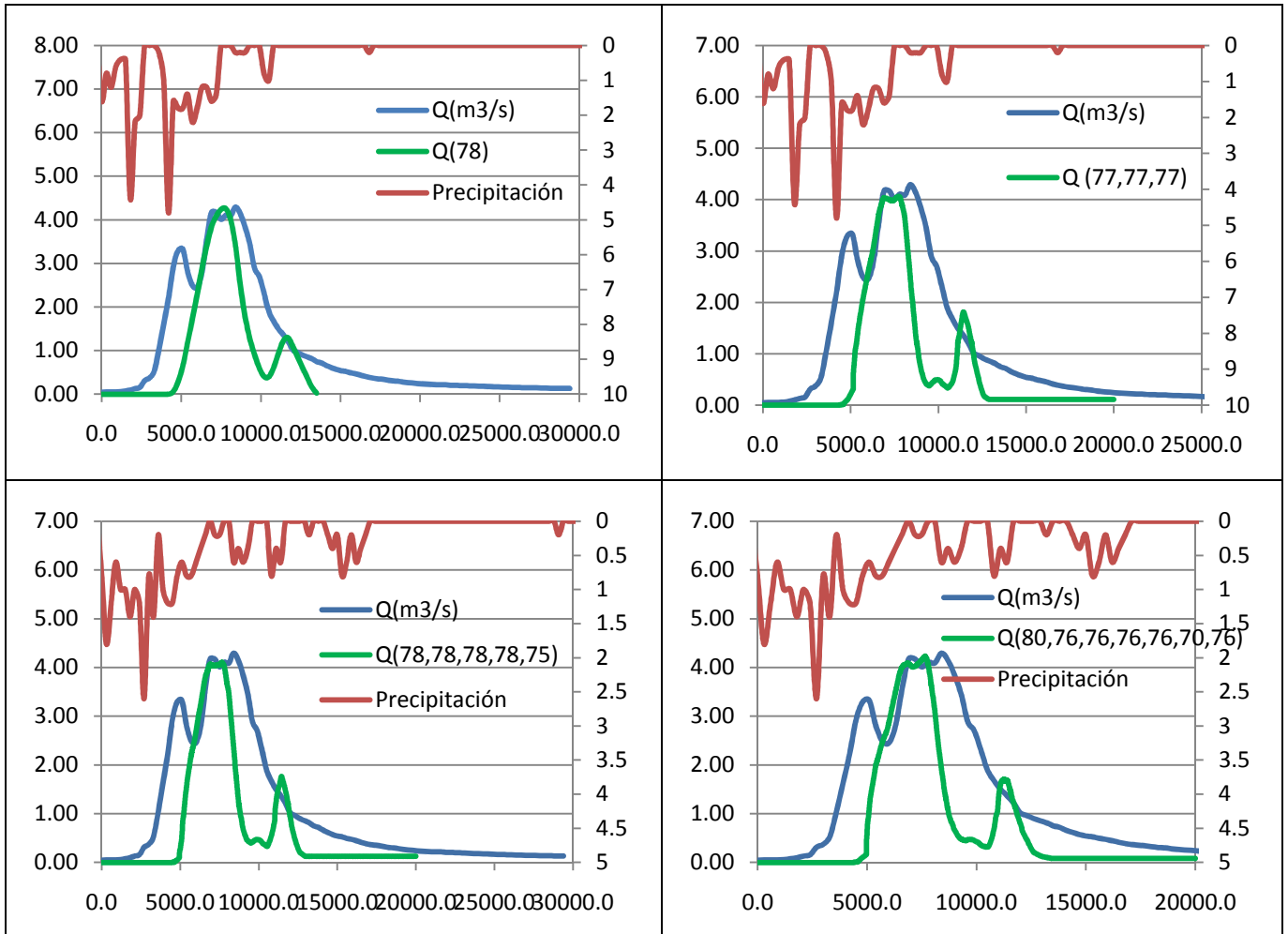


Tabla 6.1. 4 Gráficas correspondientes al evento 23 septiembre 2006. Escorrentía experimental y analítica para 1, 3, 5 y 7 subcuencas.

Estas gráficas corresponden al evento del 23 de septiembre de 2006. Se puede ver que conforme se divide la cuenca, la línea de escorrentía simulada adquiere una mayor aproximación a la de caudal medido. En este evento, como en el anterior, basta con tomar la cuenca como una sola, en este caso con un número de curva de 78, para llegar a unos buenos resultados.

Como se ha podido ver gráficamente, en ninguno de los eventos aparecen diferencias apreciables al dividir la cuenca en tres, cinco y siete subcuencas. El número de curva que se obtiene es el mismo, y si varía, lo hace en el orden de unidades. La disminución del número de curva de una subcuenca a otra, como ocurre por ejemplo en el caso de 7 subcuencas para el evento del 13 octubre de 2005, se debe a que en esa subcuenca la cubierta vegetal es mayor. Para todas las subcuencas el número de curva corresponde con 67; menos la subcuenca 6, cuyo número de curva es 64. Si se atiende al mapa de vegetación (Figura II.1 Anexo II.I) y al mapa obtenido por el programa SAGA en el que la cuenca es dividida en 7 subcuencas (Figura II.9 Anexo II.II), se observa que la subcuenca 6 coincide con la única zona de la cuenca en la que no hay matorral sino arbolar. En los siguientes eventos ocurre lo mismo. La variación del número de curva entre subcuencas en un mismo evento para cada

uno de los casos (1, 3, 5, y 7 subcuencas) es mínima; y si lo hay depende de la vegetación. Por eso se puede afirmar que al aumentar la vegetación disminuye el número de curva.

En Arnás, no se aprecian diferencias entre dividir la cuenca en 1, 3, 5 o 7 subcuencas. Aproximadamente el número de curva promedio es el mismo. Esto se debe a que la cuenca de estudio es una cuenca experimental, una cuenca de unos pocos kilómetros y además, es una cuenca bastante uniforme, que no tiene cambios significativos de vegetación ni del tipo de suelo.

Sin embargo, sí se aprecian diferencias en cuanto al número de curva de un evento a otro. Esto se debe a la diferente humedad del suelo en diferentes épocas del año. El número de curva para el evento del 13 de octubre de 2005 es de 67, para el evento del 15 de agosto de 2006 de 63.3, para el 23 de noviembre de 2003 de 85 y para el 23 de septiembre de 2006, de 78. Teniendo en cuenta que un número de curva igual a 1 ( $NC=1$ ) indica que toda la lluvia infiltra y un  $NC=100$  representa el escurrimiento total de la precipitación; se puede decir, que el evento de octubre de 2005 y agosto de 2006 corresponden a un evento seco, y el evento de noviembre de 2003 y septiembre de 2006 a un evento húmedo. Un evento húmedo significa que el suelo tiene cierta humedad, lo que hará que la capacidad de infiltración del suelo en esas condiciones de humedad disminuya. En cambio, para el caso de un evento seco la capacidad de infiltración será mayor. El suelo se encuentra “más libre” de agua por lo que el agua que pueda captar, es mayor que para el caso de condiciones húmedas, en que el suelo está más saturado. Se puede concluir que en la cuenca de Arnás, el número de curva para un evento seco es 67 y para un evento húmedo es 85.

### **6.2 Resultados numéricos obtenidos con el modelo simplificado de onda difusiva**

Se va a proceder a calibrar los parámetros de infiltración de la cuenca. Estos parámetros son los parámetros que definen la ecuación de Horton. El parámetro  $i_c$  ha sido estimado de las medidas del campo y el parámetro  $k$  ha sido elegido teniendo en cuenta los valores medidos de infiltración en diferentes condiciones del suelo. Dicho esto, para realizar la calibración habrá que tener en cuenta que como  $i_c$  y  $k$  son parámetros relacionados con las condiciones del suelo, estos serán constantes para todos los eventos, siendo diferente el parámetro  $i_0$ .

De esta manera, se realiza la simulación para los cuatro eventos variando cada uno de los parámetros de infiltración. El resto de parámetros se mantendrán constantes. También se tiene una referencia para los valores de parámetros de infiltración, a partir de la cual se modifican cada uno de los parámetros [López-García].

En el Anexo V se presentan los resultados numéricos obtenidos de la simulación con el método simplificado de onda difusiva para los cuatro eventos estudiados en la sección anterior en la cuenca de Arnás tomando la cuenca como una sola. Se ha probado con diferentes valores de parámetros de infiltración hasta llegar a soluciones que coincidan con el caudal medido experimentalmente. Como se puede observar en el anexo, en algunos



eventos se obtienen distintas combinaciones variando los tres parámetros a la vez. Se ha de elegir la mejor combinación de parámetros en cada caso. Si se tiene en cuenta que  $i_c$  y  $k$  han de ser parámetros constantes para todos los eventos, se han de buscar aquellas combinaciones para cada evento en las que esos parámetros coincidan. De esta manera se descartan todas las simulaciones en las que  $i_c$  y  $k$  no coincidan con 4.5 y 1.25 respectivamente.

Los parámetros calibrados para los cuatro eventos se resumen en la tabla siguiente:

Parámetros	13 octubre 2005	15 agosto 2006	23 noviembre 2003	23 septiembre 2006
$i_0$ (mm/h)	52	88	16.8	72
$i_c$ (mm/h)	4.5	4.5	4.5	4.5
$K$ ( $h^{-1}$ )	1.25	1.25	1.25	1.25

**Tabla 6.2. 1** Valor numérico para los parámetros de infiltración utilizados en la simulación con el modelo simplificado de onda difusiva

La tabla anterior muestra los resultados óptimos. Han sido elegidos los valores de parámetros que simulan un caudal analítico más próximo al experimental.

En las siguientes gráficas se representan los resultados óptimos obtenidos para el caudal dada una precipitación para cada uno de los eventos. En el eje de abscisas se representa la evolución temporal en segundos, en el eje de ordenadas derecho se representan los datos de lluvia en milímetros. En el eje de ordenadas izquierdo se representa el caudal de escorrentía ( $m^3/s$ ). De la parte de arriba cuelga la precipitación caída durante cada evento mientras que en la parte de abajo aparece la evolución temporal de la escorrentía en el punto de aforo de la cuenca.

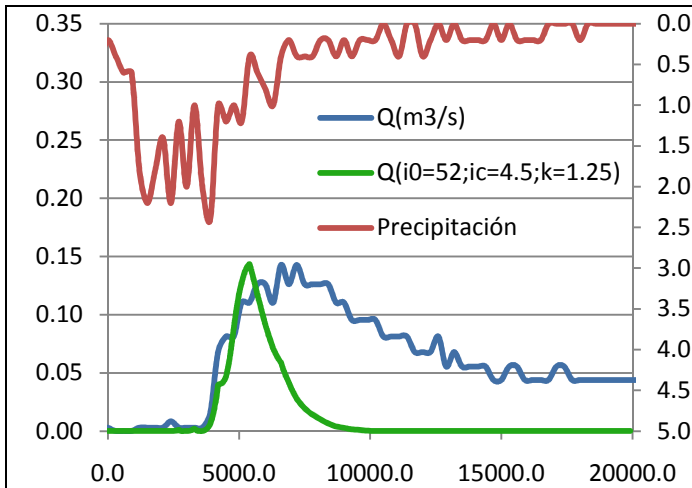


Gráfico 1: 13 octubre 2005

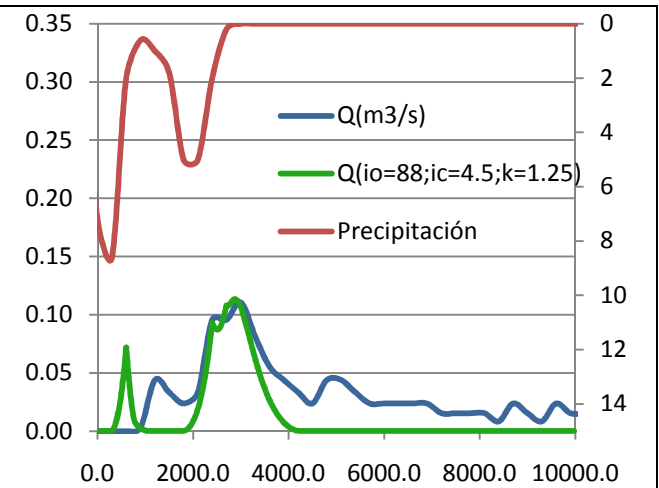


Gráfico 2: 15 agosto 2006

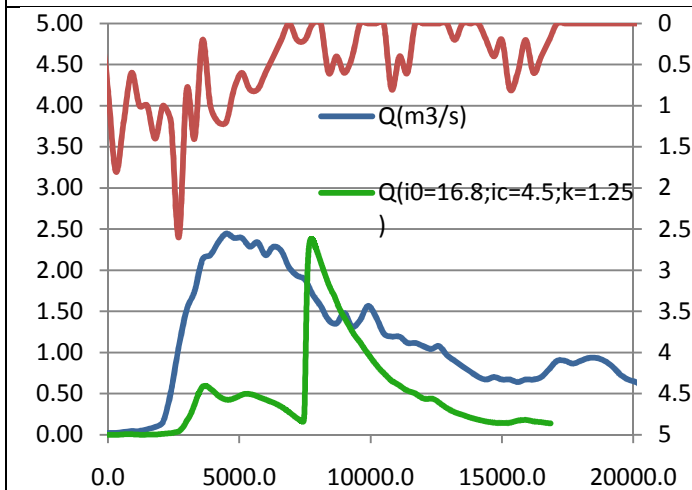


Gráfico 3: 23 noviembre 2003

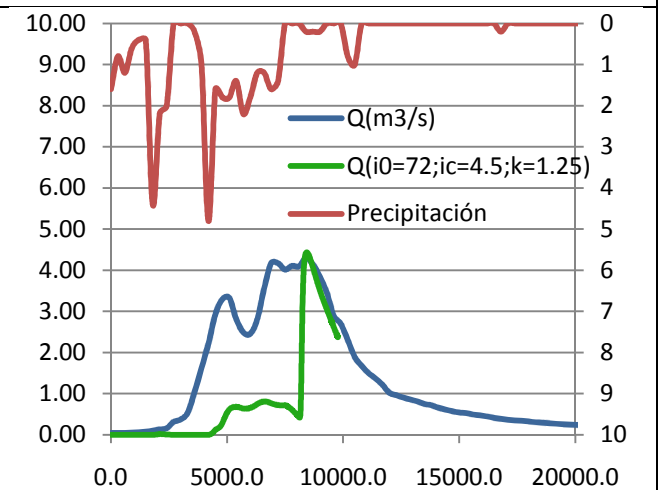


Gráfico 4: 23 septiembre 2006

Tabla 1: Gráficas que representan escorrentía experimental y escorrentía analítica en los distintos eventos

Una vez se sabe que los parámetros  $i_c$  y  $k$  son comunes para todos los eventos, hay que hacer notar la variación de un evento a otro del parámetro  $i_0$ . El parámetro  $i_0$  está relacionado con las condiciones antecedentes de humedad de la cuenca. Un valor bajo para el parámetro de infiltración  $i_0$  indica que el suelo contiene humedad, y por tanto la parte de agua que se infiltra es pequeña. En el caso contrario, un valor alto de  $i_0$ , indica que el suelo contiene poca humedad y por tanto que la capacidad de infiltración será mayor. Se puede decir que valores altos del parámetro  $i_0$  corresponden a un evento en condiciones secas, y un valor bajo, a un evento en condiciones húmedas. Este modelo, considera entonces tres eventos secos (13 octubre 2005, 15 agosto 2006 y 23 septiembre 2006) y un evento húmedo (23 noviembre 2003).

### 6.3 Comparación de los programas

En la siguiente tabla se muestran las gráficas para los cuatro eventos estudiados con los dos programas descritos anteriormente. En estas gráficas se representa la precipitación y escorrentía medidas en la estación de aforo, así como la escorrentía simulada por el modelo del número de curva y el modelo simplificado de onda difusiva. En el eje de abscisas se representan los valores de tiempo en segundos. El caudal medido en la estación de aforo ( $Q$  ( $m^3/s$ )) se representa en el eje de ordenadas izquierdo en color azul, mientras que en el eje de ordenadas derecho se representa la precipitación en milímetros que cuelga del eje de abscisas superior. Los valores del caudal de escorrentía obtenidos con el método del número de curva (SCS) se representan con color verde y los resultados numéricos obtenidos con el modelo simplificado de onda difusiva se representan en el eje de abscisas de la izquierda en  $m^3/s$  y en color lila.

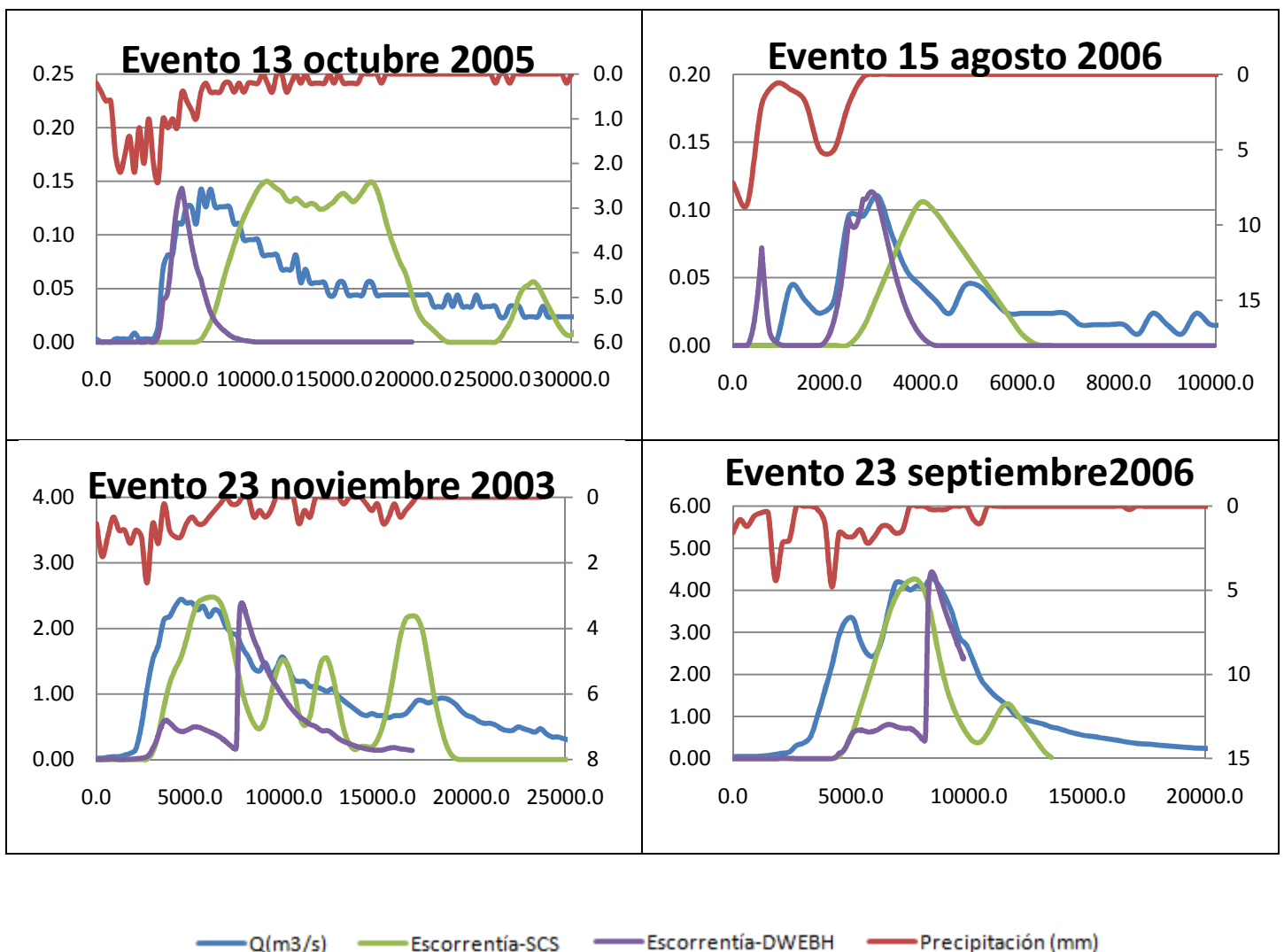


Tabla 6.3 1 Comparación del caudal de escorrentía medido en la estación de aforo y calculado con los distintos métodos numéricos

Gráficamente se pueden observar los diferentes caudales de escorrentía obtenidos según el modelo de simulación utilizado. Para los eventos de octubre y agosto, la simulación que más

se aproxima al caudal de aforo es la que corresponde con los resultados de la simulación realizada con el modelo simplificado de simulación de onda difusiva. Los picos de caudal en éstos, que corresponde con los resultados numéricos obtenidos con el programa SCS, quedan ligeramente atrasados en el tiempo. Sin embargo, en los eventos de noviembre y septiembre, la simulación que mejor coincide con el caudal medido es la que corresponde con los resultados de la simulación realizada con el programa SCS, quedando atrasada, la esorrentía simulada con el modelo de onda difusiva. Según el programa del método de número de curva, los eventos de octubre y agosto son eventos secos y los de noviembre y septiembre eventos húmedos. Así, se puede decir que para eventos secos, el programa que mejor funciona es el modelo simplificado de onda difusiva, y para eventos húmedos el SCS. Según el modelo de onda difusiva, el evento del 23 de septiembre de 2006 se considera como evento seco; en cambio, en el del modelo del número de curva se considera húmedo, ya que el número de curva era 78. Es algo dudoso considerar el evento como húmedo o seco con ese número de curva, ya que es un número intermedio entre 67 (evento seco) y 85 (evento húmedo). En este estudio se ha considerado evento húmedo.

El método del número de curva es un programa sencillo en el que el único parámetro que hay que tener en cuenta es el número de curva. Una vez encontrado un número de curva para eventos secos y otro para eventos húmedos, la simulación es muy sencilla, y en tan solo unos segundos se obtienen resultados bastante buenos. En el caso del modelo simplificado de onda difusiva, hay tres parámetros a modificar. Hay más de una combinación que puede ser la acertada por lo que el método se complica más. Además cada simulación con este modelo dura un mínimo de 8 horas, llegando a durar incluso más de un día en el caso de Arnás. En el caso de una cuenca más grande, resulta poco eficaz trabajar con este programa.

Una vez realizado el estudio para los cuatro eventos propuestos con cada uno de los programas, se ha de elegir el programa óptimo para un posterior análisis del caudal de esorrentía de la cuenca en los próximos 100 años. Como se ha dicho el programa SCS es un método sencillo y poco costoso con respecto a tiempo de cálculo.

Aunque se pueda observar en algún evento una mejor correlación simulación-experimento cuando utilizamos el modelo simplificado de onda difusiva, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, podemos considerar que el modelo del número de curva resulta apropiado para simular procesos hidrológicos en esta cuenca; ya que lo que se busca en gran medida es la rapidez de cálculo para poder establecer diferentes escenarios de Cambio Climático.

### 6.4 Conclusiones

En este capítulo se han presentado dos modelos de simulación hidrológicos aplicados a la cuenca de Arnás. Se han estudiado cuatro eventos diferentes ocurridos en la cuenca en diferentes años, y diferentes épocas del año. Con el método del número de curva se ha

analizado el caudal de escorrentía de la cuenca dividiéndola en 1, 3, 5 y 7 subcuencas para la elección del número de curva óptimo en cada caso. Con el modelo de onda difusiva se han calibrado los parámetros descritos por el modelo de Horton de manera que el caudal de escorrentía simulado coincidiera con el medido.

En primer lugar, se llevó a cabo la validación del modelo del número de curva (SCS). Con la ayuda de Guad1D se ha calculado el caudal de escorrentía tomando la cuenca como una sola, como tres, cinco y siete subcuencas. Las diferencias apreciadas trabajando con cada uno de los distintos ensayos con diferentes números de curva se ha visto que son mínimas para esta cuenca. La división en subcuencas facilita una mayor aproximación al número de curva sobre todo cuando existen zonas con cubierta vegetal muy diferente. En este caso la diferencia de cubierta vegetal no es muy grande; sólo hay una zona en la que pasa de matorral denso a arbolado. Además, el suelo es homogéneo en toda la cuenca por lo que es suficiente tomar la cuenca como una sola. De esta manera, se ha calculado un número de curva para toda la cuenca. Los eventos se han clasificado en dos tipos de eventos según los resultados obtenidos con SCS. De esta manera, se ha concluido que un evento seco tiene un número de curva de 67 y un evento húmedo de 85.

Por otro lado se ha llevado a cabo el análisis de eventos en la cuenca con el modelo simplificado de onda difusiva. Se ha calculado que los parámetros óptimos para la cuenca,  $i_c$  y  $k$ , son de 4.5 mm/h y 1.25 h<sup>-1</sup>. El parámetro de infiltración  $i_0$  es diferente para cada uno de los eventos. A pesar de haber tenido buenos resultados con este método, el análisis es complicado, y la simulación costosa en tiempo.

Después de este estudio cualitativo y de una comparación entre los programas se comprueba que el programa óptimo para nuestros propósitos es el que utiliza el método del SCS. Se trata de un programa sencillo y fácil de manejar ya que solo depende del número de curva de la cuenca.

## **7 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Una vez realizada la validación de los modelos y elegido como modelo de simulación rápido el SCS, se procede a representar diferentes escenarios de Cambio Climático sobre la cuenca de Arnás. Esto se lleva a cabo a partir de datos estadísticos de precipitación desde el 2030 al 2060 (medio plazo) y desde el 2071 hasta el 2100 (largo plazo).

El equipo de investigación liderado por el Dr. Abaurrea del departamento de Estadística de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado modelos estadísticos capaces de generar series sintéticas de precipitación, correspondientes a las condiciones climáticas actuales y a escenarios de cambio climático, para utilizar como entrada del modelo hidrológico. Este modelo estadístico de generación de precipitación utiliza la información registrada en superficie e información complementaria, tanto de superficie como de altura, procedente de un reanálisis en la zona cercana a la cuenca. Las series de precipitación usadas para este estudio es la serie A1B, con la que el modelo hidrológico permitirá analizar, a medio y largo plazo, el impacto del proceso de cambio climático en los recursos hídricos de esta cuenca.

El programa SCS ha sido modificado de manera que tiene en cuenta la estación en que se ha producido el evento. Esto significa que habrá cambios entre condición activa e inactiva. En condiciones activas hay un mayor número de vegetación, y por tanto una mayor capacidad para absorber. Según la precipitación acumulada el número de curva cambia en función de los cinco días anteriores y es capaz de dividir los datos de precipitación en diferentes eventos.

Durante los primeros 30 años de análisis (2030-2060) se va a mantener un número de curva constante de 67, que es el número de curva que se había obtenido después de la validación del SCS. El análisis se lleva a cabo con un número de curva adecuado para un evento seco y como se ha dicho, el programa lo modificará en función de que el evento se encuentre en estación activa o inactiva. En los siguientes 30 años (2070-2100) se van a plantear diferentes escenarios modificando el número de curva. Primero se analizará qué ocurre si las condiciones de suelo y vegetación se mantienen a largo plazo; es decir, mantener un número de curva de 67. En segundo lugar, se va a simular que en esos años ocurre una reforestación; para ello se ha trabajado con un número de curva de 46. Por último, se va a simular una desertización; suponiendo que no hay una variación en la capacidad de infiltración del tipo de suelo, el número de curva será mayor que en los años anteriores. En este caso se ha trabajado con un número de curva de 72.

El caudal en una trayectoria húmeda será mayor que en trayectoria corriente y éste mayor que en una trayectoria seca. El suelo en trayectoria húmeda está saturado de agua por lo que correrá más agua que en una trayectoria seca en la que la capacidad de infiltración del

suelo será mayor. No obstante si los niveles de precipitación son mayores para trayectoria seca que para trayectoria corriente o húmeda, la escorrentía en una trayectoria seca puede llegar a ser mayor que en corriente húmeda.

### 7.1 Número de curva constante 67

Mantener el mismo número de curva hasta el 2100, significaría que no se produce ningún cambio importante en el tipo de suelo ni en la vegetación. Como se ha dicho, el programa modificaría el número de curva según fuera una estación activa o inactiva. Las gráficas correspondientes se pueden ver en el Anexo VI.I.

Las tablas VI.1 Y VI.2 del Anexo VI.I no son más que un resumen de la tendencia vista en las gráficas del Anexo VI.I En la primera se refleja el valor de los máximos de precipitación y escorrentía alcanzados para cada grupo de años a medio y largo plazo. La segunda tabla tiene en cuenta los avances producidos en cada caso, para una posterior división en eventos según esos avances.

Echando un vistazo a la tabla VI.1 se observa que el caudal de escorrentía durante los primeros años, 2030-2034 y 2035-2038 es menor en trayectoria húmeda que en trayectoria seca y corriente. Esto se debe a que si el programa ha considerado la estación como activa o inactiva en cada caso habrá modificado el número de curva. El máximo de escorrentía se encuentra entre los años 2096 y 2100, con un caudal de  $4.06 \text{ mm}^3/\text{s}$

Se ha dividido cada grupo de años en distintos eventos según los avances de caudal que superen un mínimo valor. Durante los años 2030-2060 y para un número de curva de 67 se va a considerar evento aquellos avances que superen un caudal de  $0.5 \text{ mm}^3/\text{s}$ . De esta manera, de 2030 a 2034, habrá 8 eventos para trayectoria seca, 14 para trayectoria corriente y 8 para trayectoria húmeda. De 2035 a 2038 se tienen 7 eventos para trayectoria seca y corriente y sólo 2 eventos para trayectoria húmeda con un máximo de caudal entre. Entre 2039 y 2042 el número de eventos es de 5, 6 y 7 en trayectoria seca, corriente y húmeda respectivamente. En los años 2043-2046 se consideran 8 eventos en trayectoria seca y corriente, y 12 en trayectoria húmeda. De 2047 a 2050 hay 4 eventos en trayectoria seca, 3 en corriente y 7 en húmeda, en las que el máximo caudal se encuentra entre  $0.5$  y  $1 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Entre 2051 y 2055 el número de eventos es de 6 para trayectoria seca, 7 para corriente y 10 para húmeda. En los últimos años (2056-2060) el número de eventos es de 11, 10 y 8 para trayectoria seca, corriente y húmeda respectivamente. Todo ello lo podemos observar en la Tabla 7.1.1.

Como se puede observar, las previsiones de precipitación en trayectoria seca y corriente son muy similares. Se ha considerado evento a partir de  $0.5 \text{ mm}^3/\text{s}$  porque si el límite se hubiera fijado por ejemplo en  $1 \text{ mm}^3/\text{s}$  entre los años 2047 y 2050 no se habría considerado ningún evento. El hecho de que haya más eventos en trayectoria seca que húmeda, no significa que haya más escorrentía sino que en fechas muy cercanas varios avances juntos se han considerado dentro del mismo evento.

## 7. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

El número de eventos para los años siguientes se recogen a continuación:

Número de eventos			
Años	Trayectoria seca	Trayectoria corriente	Trayectoria húmeda
2071-2074	7	8	3
2075-2078	9	6	10
2079-2082	4	8	10
2083-2086	2	2	3
2087-2090	2	8	4
2091-2095	12	9	10
2096-2100	12	7	11

Tabla 7.1. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 67

En los últimos años, debido a los niveles de precipitación, se produce más cantidad de eventos. El máximo de escorrentía se encuentra en trayectoria húmeda entre 2096 y 2100, con un evento de  $5 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

### 7.2 Reforestación

Las previsiones del Instituto Pirenaico de Ecología para la cuenca de Arnás es que al cabo del tiempo se producirá en la cuenca una reforestación, y lo más probable será que en el 2100 la cuenca sea prácticamente un bosque. Según la experiencia adquirida con las simulaciones anteriores en SCS, se comprueba que el número de curva para un mismo tipo de suelo disminuye con la vegetación. Así, si se tratase de un bosque, el número de curva sería de 45. En los primeros treinta años se ha simulado con un número de curva de 67, el número de curva que corresponde a la cuenca para un evento seco. Los siguientes treinta años se han simulado con un número de curva de 46, ya que como se ha dicho, la cuenca tiende a bosque abierto. (Anexo VI.II)

En el caso de reforestación se va a analizar el periodo a largo plazo (2070-2100) de la tabla VI.3 del Anexo VI.II referida a los máximos de precipitación y escorrentía. El máximo se encuentra entre los años 2096-2100, y es de  $2.78 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Esto ocurre entre unos años en los que el máximo de precipitación es de 287.7 mm, y además ocurre en trayectoria húmeda. En general, como era de esperar, los caudales para el caso de reforestación (NC=46) son mucho más pequeños que para un número de curva de 67. Esto es lógico ya que al haber más vegetación, habrá una mayor retención de agua, y con ello una menor escorrentía.

Si se atiende a la tabla VI.4 del Anexo VI.II, se observa el número de avances producidos en trayectoria seca, trayectoria húmeda y trayectoria corriente a medio y largo plazo. A largo plazo, en el que se produce una reforestación de la cuenca, se observa que los avances de caudal son menores que  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  salvo en los últimos años. Hay un avance de caudal mayor que  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  entre los años 2091 y 2095 y otro entre los años 2096 y 2100 en trayectoria húmeda. Como se ha comentado antes, estos máximos de caudal en los últimos años se



## 7. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

deben a un aumento en las precipitaciones. En caso de trayectoria seca, no se producen avances de caudal mayores que  $1 \text{ mm}^3/\text{s}$  salvo entre los años 2079-2082, 2091-2095 y 2096-2100 que se producen avances de caudal menores que  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$ . En trayectoria corriente tampoco hay avances de caudal mayores que  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  y entre 1 y  $2 \text{ mm}^3/\text{s}$  sólo hay avances entre los años 2071-2075 y 2096-2100. En esta trayectoria entre los años 2075 y 2078 y entre 2083 y 2086 no hay avances de caudal mayores que  $0.5 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Por ello, se va a considerar evento para el caso de reforestación a largo plazo (2070-2100) a partir de  $0.1 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

La tabla siguiente recoge el número de eventos entre los años 2070 y 2100 actuando sobre la cuenca con un número de curva de 46:

Número de eventos			
Años	Trayectoria seca	Trayectoria corriente	Trayectoria húmeda
2071-2074	8	8	6
2075-2078	12	5	10
2079-2082	4	8	12
2083-2086	4	7	7
2087-2090	4	5	5
2091-2095	15	10	13
2096-2100	9	8	15

Tabla 7.2. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 46

Si continúa la reforestación a lo largo de los años, el número de curva seguirá disminuyendo de manera que no habrá caudal de escorrentía. Se habrá convertido todo en bosque, y toda la lluvia será absorbida por la vegetación, y la poca que llegue al suelo, será infiltrada.

### 7.3 Desertización

Otra posibilidad es que se llevase a cabo una desertización en la cuenca. En el caso de reforestación existía una relación aproximadamente lineal entre el número de curva y la vegetación. Conforme aumentaba la vegetación disminuía el número de curva. En desertificación, conforme disminuye la vegetación aumenta el número de curva pero de forma mucho más suave (menor pendiente) porque entra en competitividad con el efecto que se produciría en el cambio de suelo. Un desierto tiende a un suelo en condiciones secas, es decir, con un poder de infiltración mucho mayor. Por lo que esto va a hacer que el aumento del número de curva no sea muy grande y que incluso en un futuro más lejano que 100 años, éste llegue a disminuir por un cambio en el tipo de suelo. (Anexo VI.III)

En caso de desertización, al aumentar el número de curva, los máximos de caudal que se alcanzan (tabla VI.5 Anexo VI.III) de 2070 a 2100 son mayores que en los casos anteriores. Ya que el número de curva es de 73, es lógico que los niveles de escorrentía sean mayores que para un número de curva de 46 o de 67. Para unos mismos niveles de precipitación, entre los años 2071 y 2074 en trayectoria corriente, el máximo caudal con un número de curva de 72 es de  $1.45 \text{ mm}^3/\text{s}$  mientras que con un número de 67 es  $1.98 \text{ mm}^3/\text{s}$ . Es decir, en esos años

## 7. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

el máximo de caudal para un número de curva (72) es menor que para un número de curva más bajo (67). Esto es debido a que el programa, en función de la precipitación de los cinco días anteriores, que considerará el evento como estación activa o inactiva, actuará aumentando o disminuyendo el número de curva. Para dos números de curva muy próximos, como son 67 y 72, al modificar el programa el número de curva, es muy probable que el número de curva más pequeño supere al mayor en algún evento.

La división en eventos va a tener lugar en cada caso en que el número de curva supere unos avances de caudal de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Número de eventos			
Años	Trayectoria seca	Trayectoria corriente	Trayectoria húmeda
2071-2074	11	3	7
2075-2078	14	15	15
2079-2082	5	11	11
2083-2086	4	7	6
2087-2090	4	9	6
2091-2095	13	13	11
2096-2100	14	10	17

Tabla 7.3. 1 Número de eventos de 2070 a 2100 para número de curva de 72

## 8. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha llevado a cabo el análisis hidrológico-hidráulico de la cuenca de Arnás para cuatro eventos diferentes (13 octubre 2005, 15 agosto 2006, 23 noviembre 2003 y 23 septiembre 2006). Se ha analizado el caudal de escorrentía de salida mediante dos programas de simulación. Uno de ellos se basa en el modelo del número de curva (SCS) y el otro en un modelo simplificado de onda difusiva. En este estudio se han encontrado los parámetros óptimos para la calibración de ambos modelos.

En el modelo de número de curva se han comparado las distintas simulaciones en los distintos eventos, tratando la cuenca como una solo cuenca y dividiendo en 3, 5 y 7 subcuencas. Los resultados obtenidos en la simulación de cada división de cuencas para un mismo evento son muy similares. La cuenca de Arnás es una cuenca pequeña, y bastante homogénea en cuanto a vegetación y tipo de suelo por lo que se puede mantener un número de curva constante para toda la cuenca.

Una vez obtenidos los números de curva para cada uno, se deduce que el evento del 13 de octubre del 2005 y del 15 de agosto del 2006 son eventos secos, y que el evento del 23 de noviembre del 2003 y del 23 de septiembre del 2006 son eventos húmedos. Por ello se ha considerado un número de curva para la cuenca de Arnás de 67 en caso de evento seco y 85 para evento húmedo.

En el modelo simplificado de onda difusiva se han estudiado los parámetros referidos a la infiltración del suelo. En este caso los resultados indican que hay tres eventos secos (13 octubre 2005, 15 agosto 2006 y 23 septiembre 2006) y un evento húmedo (23 noviembre 2003) debido a que el parámetro de infiltración  $i_0$  es alto para los eventos secos y más bajo para los eventos húmedos.

Si se comparan ambos modelos se deduce que modelo más idóneo para realizar estudios de cambio climático en esta cuenca es el modelo del número de curva, ya que es un modelo más sencillo y rápido de aplicar. Por tanto se ha tenido en cuenta la existencia de dos eventos húmedos y dos secos, con los correspondientes números de curva para cada uno de ellos.

Por último se ha llevado a cabo el análisis hidrológico-hidráulico de la cuenca de Arnás a medio (2030-2060) y largo plazo (2070-2100). Para ello se utiliza un programa basado en el método del número de curva pero modificado con respecto al anterior. En este programa se introduce el número de curva en condiciones secas y él calcula el número de curva para condiciones húmedas. Así, el número de curva en condiciones secas es 67 que ha sido obtenido anteriormente, en la calibración del modelo.

En el análisis a medio plazo, no se considera que vaya a haber un cambio excesivo en el número de curva, por lo que se ha mantenido un número de curva de 67; sin embargo a largo plazo el número de curva puede variar. Se han planteado tres escenarios futuros:

mantener el número de curva, reforestación (número de curva = 46) y desertización (numero de curva = 72).

En caso de reforestación, se obtienen caudales de escorrentía más pequeños y menos frecuencia de avenidas que en el resto de los casos. No es así para el caso de desertización en el que se encuentran los máximos de caudal, y más frecuencia de avenidas. Esto se debe a que si ocurre una reforestación, el número de curva disminuye, al haber más vegetación la capacidad de captar agua será mayor por lo que llegará menor cantidad al suelo. En caso de desertificación, el número de curva aumenta, al haber menos vegetación, escurrirá mayor caudal. El aumento del número de curva en desertificación no lo hace en la misma medida que ocurre en reforestación, ya que al disminuir la vegetación, produce cambios en el tipo de suelo, de manera que aumenta la capacidad de infiltración. Por eso el aumento en el número de curva en caso de desertización no es tan acentuado.

Según las previsiones del Instituto Pirenaico de Ecología a largo plazo, la cuenca de Arnás será un bosque. Con un número de curva de 46 se ha visto como la escorrentía disminuye prácticamente en la mitad con respecto a un número de curva de 67. En un futuro más lejano del 2100 se cumplirán las previsiones del Instituto Pirenaico de Ecología, y llegará a no producirse caudal de escorrentía en esta cuenca.

El estudio realizado para la cuenca experimental de Arnás ha sido la primera fase de un estudio de mayor envergadura para aplicación a cuencas reales. La elección de la cuenca para los primeros análisis de Cambio Global se efectuó con arreglo a la base de datos que se disponía de ella para poder validar los modelos numéricos. Como trabajo futuro, el modelo se va a aplicar en primer lugar en la cuenca del Arga, cuenca de tamaño intermedio situada en Navarra en la que se dispone de datos de precipitación y medidas de caudal en una estación de aforo. Una vez realizado este estudio se procederá a realizar el mismo estudio bajo diferentes escenarios de Cambio Climático en la cuenca del Ebro.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [Andréassian 2004] Andréassian, V., Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. of Hydrol.* Vol. 291, pp: 1-27, 2004.
- [Bedient et al. 2008] Bedient, P.B., Huber, W.C. y Baxter, E.V., Hydrology and floodplain analysis. *Prentice Hall*. Fourth edition, 2008.
- [Beguiría et al. 2003] Beguiría, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M. y García-Ruiz, J. M., Assessing the effect of climate change and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees. *Ambio*, vol. 32 (4), pp: 283-286, 2003.
- [Breven y Kirkby 1979] Beven, K.J. y Kirkby, M.J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, pp: 43–69, 1979
- [Brufau y García-Navarro 2000] Brufau, P. y García-Navarro, P. *Conceptos Básicos de hidrodinámica de superficie*. Copycenter 2000.
- [Burguete 2003] Burguete, J., Modelos unidimensionales de flujos de superficie libre y transporte en geometrías irregulares: Aplicación al flujo en ríos. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2003.
- [Burguete 2007] Burguete, J., *Manual de referencia del programa Guad1D*. Edición 2007.
- [Chow et al. 1994] Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. Hidrología aplicada. MacGraw-Hill Interamericana, S. A., 1994.
- [García-Ruiz et al. 2000] García-Ruiz J.M, Martí-Bono C., Arnáez-Vadillo J., Beguiría-Portugués S., Lorente-Grima A., Seeger M., Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo central español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica* vol. 26, pp: 23-40, 2000.
- [García-Ruiz et al. 2001] García-Ruiz, J.M., Beguiría, S., López Moreno, J.I., Lorente, A. y Seeger, M., Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente, Geoforma Ediciones, 192, Zaragoza, 2001.
- [García-Ruiz et al. 2005] García-Ruiz J.M, Arnáez J., Beguiría S., Seeger M., Martí-Bono C., Regüés D., Lana-Renault N., White S., Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Catena* vol. 59, pp: 79-92, 2005.
- [Gaspari et al. 2007] Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Marlats, R. M., Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIX pp: 21-28, 2007.
- [Gupta 2008] Gupta, R.S., Hydrology and Hydraulic Systems. *Waveland Press Inc*. Third edition, 2008.
- [Lasanta 1989] Lasanta, T. Evolución reciente de la agricultura de montaña: El Pirineo aragonés. Geoforma Ediciones, Logroño, 1989.
- [López-García 2008] López-García, D., Simulación de distintos eventos de interés medidos en la cuenca de Arnás por medio del método del SCS del número de curva. Informe técnico interno, 2008.

- [López-García 2010] López García de la Barrera Daniel. Sources of uncertainty in the validation of a coupled hydrological-hidraulic simulation model, Simhydro 2010.
- [López-Moreno y García-Ruiz 2004] López Moreno, J.I. y García Ruiz, J.M., Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49 (5), pp: 787-802, 2004.
- [López-Moreno et al. 2004] López Moreno, J.I., Beguería, S. y García-Ruiz, J.M., Tendencias espacio-temporales en la intensidad de avenidas en el Pirineo Central, *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología*, G. Benito & A. Díez Herrero, eds., Sociedad Española de Geomorfología, 69-78, Toledo, 2004.
- [Mays 2001] Mays, L.W.. *Water Resources Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [Nadal-Romero y Regüés 2009] Nadal Romero, E. y Regüés, D. Detachment and infiltration variations as consequence of regolith development in a Pyrenean badland system. *Earth Surf. Process. Landforms* vol. 34, pp: 824-838, 2009.
- [Olaya 2004] Olaya, V., *A gentle introduction to SAGA GIS*. Edición 1.1, 2004.
- [Vázquez Z. y Lana-Renault 2006] Vázquez Z., Raúl F. y Lana-Renault, N., Informe sobre la campaña de medición de secciones transversales realizadas por el equipo combinado del CITA y del IPE, 2006.
- [Vreugdenhil 1994] Vreugdenhil, C.B., *Numerical Methods for Shallow-Water Flow*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1994.
- <http://www.ciclohidrologico.com/>

