

Caracterización del caudal en dos subcuencas de montaña mediterránea, estudio de aplicabilidad de un modelo hidrológico

Juan Carlos Loiza Usuga¹ & Maria Casamitjana Causa²

1. Laboratorio de Hidrología y Conservación de Suelos, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona, España.

2. Paraje Nacional de Interés Natural de la Albera, Espolla. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya, España.

jc.loaiza@ctfc.es

Recibido para evaluación: 18 de Mayo de 2008 / Aceptación: 01 de Octubre de 2008 / Versión Final: 10 de Octubre de 2008

Resumen

En esta investigación se abordó la dinámica de los caudales en las subcuencas de Canalda (65.2 km²) y Cogulers (2.6 km²), pertenecientes al sistema integrado de cuencas de la Ribera Salada. En este sistema de cuencas de montaña mediterránea ha habido un fenómeno de abandono progresivo de la actividad agrícola, dando lugar a un aumento en el volumen y densidad de los bosques. Dichos cambios en los usos del suelo tienen una influencia en los flujos hidrológicos al interior de la cuenca. El análisis del comportamiento de los caudales se realizó mediante la utilización del modelo hidrológico llamado TOPLATS. Se utilizó información topográfica, de tipos y usos del suelo, meteorológica y de vegetación como parámetros de entrada para la implementación del modelo hidrológico. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del modelo sin calibrar es poco viable. Se precisa una calibración previa del modelo, mediante la utilización de información obtenida en campo, para que el modelo funcione correctamente. Se propone realizar una caracterización hidrogeológica de las fuentes de agua, dicha información permitirá una mayor precisión para los valores simulados de caudales.

Palabras Clave: Caudal, Cuencas mediterráneas, TOPLATS, hidrología, Modelos de simulación

Abstract

In this research the water flow dynamic of the Canalda subbasin (65.2 km²) and Cogulers subbasin (2.6 km²) have been studied. They are both included in the Ribera Salada, an integrated system of basins. The Ribera Salada is a Mediterranean mountain basin where the progressive abandonment of the agricultural activity fosters the increase of volume and forest density in a basin, thus affecting the hydrologic dynamic. The analysis of the water flow behaviour was done with the TOPLATS model. To study the water flow dynamic several items were used: topographic maps, soil type and soil use maps, as well as vegetation and meteorological information and soil physical parameters, which were taken at field from the most representative uses of the basin. The obtained results show that the direct application of the model is not very feasible, and it is necessary a previous process of calibration using water flow information obtained at field. It is proposed to realize an hydrogeologic characterization of the water sources as this information will allow more accurate simulated caudal values.

Key Words: Caudal, Mediterranean catchments, TOPLATS, Hydrology, Simulation models

1. Introducción

Conocer la dinámica de las cuencas hidrológicas es vital en zonas mediterráneas, donde el comportamiento estacional de las lluvias limita el volumen de agua disponible tanto al interior de las cuencas como aguas abajo. El estudio de los caudales en este tipo de cuencas es necesario, teniendo en cuenta la importancia de las cuencas de montaña mediterránea como zonas potenciales de producción y almacenamiento de agua para la generación de energía, consumo humano, agricultura e industria. Durante los últimos 50 años el abandono progresivo de las fincas y de los cultivos tradicionales en el Prepirineo Catalán, han conllevado a la disminución de la superficie agrícola, aumentando la superficie en pastos y favoreciendo el aumento en la extensión y densidad de los bosques [Ubalde et al., 1999]. Dicha tendencia ha sido registrada en muchos otros puntos de la geografía española donde el abandono de la superficie cultivada alcanza valores de 35% a un 100 % del territorio [García-Ruiz et al., 1985; Lasanta, 1988].

Estos cambios en los usos del suelo modifican la respuesta hidrológica de las cuencas. El aumento de la cubierta vegetal arbórea aseguraría una aportación de agua más constante que los campos de cultivo, a pesar del mayor consumo debido a la evapotranspiración [Batalla & Poch, 2004]. Las crecidas al interior de la cuenca se ven reguladas por la presencia de zonas boscosas poco intervenidas, resultando en una disminución de los fenómenos de escorrentía y transporte de sedimentos Rius et al. [2001]. Gran número de estudios se han llevado a cabo al interior de la cuenca: [Verdu et al., 2000] estudiaron el comportamiento erosivo de la cuenca, analizando la aplicación de los modelos E2D y EUROSEM. La modelización hidrológica mediante el modelo HEC-1 ha sido llevada a cabo por Estruch et al [2003]. En la cuenca del Vallcebre (subcuencas de Cal Rodó y Can Vila) zona de montaña mediterránea cerca a la zona de estudio, los modelos SHETRAN, TOPCAT, TOPKAPI, BROOK y SACRAMENTO han sido utilizados para simular el comportamiento diario del caudal, encontrando valores de eficiencia medios y altos para los modelos validados y calibrados [Gallart et al. 2005]. El comportamiento de los caudales para fenómenos de crecidas ha sido estudiado por Rius et al. [2001], Poch et al. [2002]. La dinámica hidroquímica de la cuenca ha sido estudiada por Orozco et al. [2006]. La calibración del

modelo TOPLATS, para la predicción del comportamiento de la humedad del suelo ha sido implementada por Loaiza Usuga & Pauwels [2008].

Este artículo analiza el comportamiento de los caudales para dos unidades de subcuencas de tamaño pequeño (Cogulers) y tamaño mediano (Canalda), con predominancia de bosques. Los dos aspectos a analizar son: (i) el comportamiento del caudal a lo largo del tiempo, y su respuesta al fenómeno de lluvia, (ii) estudiar la respuesta de modelo empírico para simulación hidrológica en cuencas de montaña mediterránea.

El artículo está distribuido de la siguiente manera: primero se hace una descripción de la zona de estudio. Posteriormente se describen el proceso de adquisición de la información y las metodologías utilizadas para la generación de la información básica de campo. En la siguiente sección se expone brevemente el modelo, las fuentes de consulta al respecto son enumeradas. Finalmente se analizan los resultados de caudal obtenidos observados y simulados.

2. Sitio de estudio

Las subcuencas de Canalda (65.2 km²) y Cogulers (2.6 km²) hacen parte del sistema integrado de cuencas de la Ribera Salada (225.5 km²), localizado en el municipio de Solsona, Prepirineo meridional catalán, España (Figura 1). El sustrato geológico está compuesto por conglomerados masivos y materiales de origen calcáreo. El relieve es tubular con pendientes mayores de un 20% con un rango de altitud de 420m a 2385 m. Los suelos son superficiales, calcáreos, pedregosos y contactos líticos, clasificados como Lithic y Typic Usthorment [SSS, 2006], con predominancia de regímenes de humedad ústicos y regímenes xéricos ocasionales para los años más secos [Loaiza Usuga et al., 2008]. Más información respecto al comportamiento de las diferentes componentes del balance hídrico, se puede encontrar en Loaiza Usuga & Pauwels [2009]. El clima es submediterráneo, variando a subalpino en las partes más altas de la cuenca. El promedio anual de precipitación es de 624 mm en las áreas bajas y 874 mm en la parte alta de la cuenca. La precipitación presenta un gradiente altitudinal, lo que hace que en las cotas más elevadas las lluvias sean más abundantes [ICC, 1996; CTFC, 2006]. La temperatura media es 20 °C en verano y 5 °C en

invierno. El bosque es el uso predominante de la cuenca, con especies de pino laricio, pino silvestre, vegetación de ribera y encinar. Las explotaciones agrícolas y pasturas ocupan un 6%

del área total, caracterizadas por un bajo nivel tecnológico y una utilización elevada de insumos.

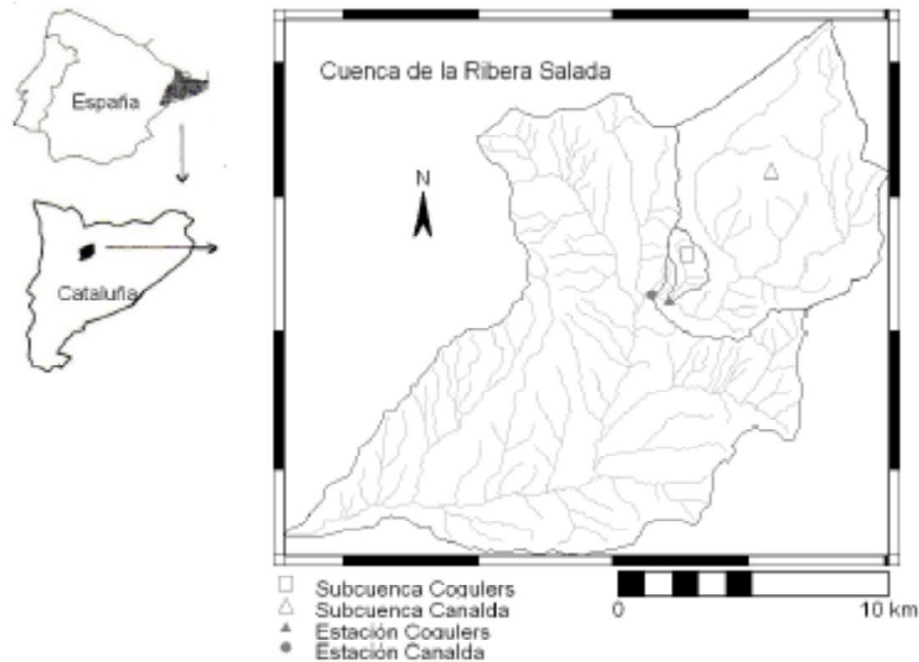


Figura 1. Área de estudio

Diseño del experimento

El sistema integrado de cuencas de la cuenca de la Ribera Salada viene siendo monitoreado a partir del año 1997 hasta la fecha. En este artículo dos subcuencas han sido seleccionadas; la subcuenca de Cogulers como representativa de una cuenca pequeña y Canalda como cuenca típica de tamaño mediano. El análisis realizado se basa en la información disponible sobre tipos representativos de suelos y usos del suelo, los cuales se muestran en la tabla 1. La localización de las subcuencas objeto del estudio, al igual que los sitios de muestreo de caudales y datos meteorológicos se muestran en la figura 1. La información meteorológica ha sido obtenida de la estación Lladurs, estación meteorológica perteneciente a la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya [<http://xarxes.meteocat.com/>] situada en la parte media de la cuenca, donde se registran de manera automática datos de temperatura del aire, humedad relativa, radiación neta, radiación solar, temperatura del suelo, precipitación, dirección y velocidad del viento. Los valores medios observados de las variables

meteorológicas medidas pueden observarse en la Tabla 2. Las medidas de caudales han sido realizadas en la salida de las cuencas, en las estaciones Canalda y Cogulers (figura 1), mediante un transmisor de presión serie PTX 500 (Druck corp). Otras variables hidrológicas como infiltración, escorrentía, interceptación también fueron estudiadas, para una descripción más detallada consultar Batalla & Poch [2004], Loaiza Usuga & Pauwels [2008].

La parametrización del modelo ha sido llevada a cabo utilizando información tomada en campo, o bien derivada de la utilización de funciones de pedotransferencia en el caso de los suelos, basados en los parámetros de Rawls et al. [1982]. Respecto a los parámetros de usos del suelo, éstos han sido tomados de Pauwels and Wood [1999a]. En lo que se refiere a la variabilidad edafológica presente en la cuenca, se ha tenido en cuenta el análisis de semivariogramas realizado por Acuña & Poch [2001], quienes encontraron una menor variabilidad de las propiedades físicas del suelo a distancias menores de 300 m al interior de la cuenca. La información cartográfica de suelos y usos de suelo ha sido extrapolada de Ubalde et al. [1999]; Orozco et al. [2006] a

partir de mapas 1:50.000 con el objetivo de realizar simulaciones hidrológicas, utilizando la misma escala de trabajo. A partir de la información topográfica básica se han elaborado modelos digitales de elevación (MDE). Para lo cual se creó una cuadrícula (pixel) de 5m de lado, a partir de curvas de nivel con una equidistancia de 20m, partiendo de mapas en formato digital propiedad del Instituto Cartográfico de Cataluña [ICC, 2006]. Una explicación detallada respecto a la información básica utilizada en la implementación del modelo TOPLATS y el proceso de calibración y validación del modelo puede encontrarse en Loaiza Usuga & Pauwels [2008]. Se utilizó como indicador de la

similitud de los datos registrados y los simulados el cuadrado medio del error (RMSE), el cual ofrece información sobre la dispersión de los valores de caudal simulados y los valores registrados en campo. RMSE es calculada como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [\theta_0(n) - \theta_s(n)]^2}{N}}$$

N es el numero de observaciones, θ_0 son los valores de caudal registrados en campo y θ_s son los valores simulados.

Tabla 1. Porcentaje de tipos de suelo y usos del suelo en las subcuencas de Canalda y Cogulers [Ubalde, 1999; Orozco et al. 2006]

Tipo suelo [SSS, 2006]	Canalda	Cogulers	Usos del suelo	Canalda	Cogulers
Typic calciustep	15.3	8.5	Bosque	60	76
Typic eutrodept	23.9	-	Matorral	6	-
Typic Haploustep	0.6	-	Pasto y cultivo	6	0.4
Typic ustorthent	14.8	43.3	Pasturas	18	10
Lithic Usthorthent	45.4	48.2	Afloramientos rocosos	10	13.6

Tabla 2. Información meteorológica de la estación Lladurs para el periodo 1999 - 2005

Año	T	Tmax	Tmin	STmax	STmin	RH	Wv	Rt	ETo	Rd	Rf
	°C					%	m/s	mm			
1998	11.7	17.8	6.3	14.8	14.4	65	1.1	525	935	117	75
1999	11.7	17.8	6.5	14.4	14.1	67	1.2	676	875	141	84
2000	11.9	17.9	6.6	14.5	14.2	67	1.1	703	879	128	64
2001	12.0	18.2	6.7	14.6	14.4	65	1.2	516	927	118	67
2002	11.8	17.7	6.7	14.3	14.0	67	1.1	644	953	149	37
2003	12.5	18.3	7.4	17.3	16.8	65	1.2	763	903	131	66
2004	11.4	17.6	6.3	18.6	18.3	68	1.1	544	870	124	76
2005	12.0	17.9	6.1	16.4	16.1	64	0.9	507	947	131	66

T: temperatura media; Tmax: temperatura máxima absoluta; Tmin: temperatura mínima absoluta; STmax: temperatura del suelo máxima absoluta; STmin: temperatura del suelo mínima absoluta; RH: humedad relativa; Wv: velocidad del viento; Rt: lluvia total; ETo: evapotranspiración; Rd: días de lluvia; Fd: días congelados.

3. Modelización hidrológica

El modelo TOPLATS utilizado en este estudio (se basa en un esquema de transferencia (masa y energía) suelo-atmósfera [Famiglietti & Wood, 1994]) incorporando información

meteorológica básica, transporte de la humedad al interior del perfil del suelo (movimiento horizontal), transpiración de acuerdo al tipo de vegetación, interceptación, evaporación, infiltración, escorrentía superficial y flujos de calor. La columna subsuperficial del suelo ha sido dividida en tres zonas: zona radicular, zona de transmisión y zona de flujo capilar. Originalmente el modelo fue

desarrollado para simular balances de agua y energía en superficie en ausencia de nieve [Famiglietti and Wood, 1994; Peters-Lidard et al., 1997]. Posteriormente, el modelo ha sido modificado agregando un gran número de variables adaptadas a las condiciones particulares de cada región, especialmente para simular procesos asociados a la nieve (capas de nieve y procesos de congelación), la adición de variables asociadas a la vegetación y la posibilidad de trabajar en cuencas que funcionan como un sistema abierto [Pauwels and Wood, 1999a]. Para una descripción más detallada del modelo puede consultarse Famiglietti and Wood [1994], Peters-Lidard et al. [1997], and Pauwels and Wood [1999a].

Este modelo ha sido aplicado en la cuenca Zwalm, Bélgica: [Pauwels et al., 2001, 2002; Pauwels and De Lannoy, 2006], la cuenca del río Upper Kuparuk, Alaska [Dery et al., 2004], la cuenca del río Red, Arkansas [Crow et al., 2001; Crow and Wood, 2002], la cuenca Dill en el centro de Alemania [Bormann, 2006], la Ribera Salada, España [Loaiza Usuga & Pauwels, 2008, 2009], y en parcelas experimentales de los proyectos: FIFE [Peters-Lidard et al., 1997], BOREAS [Pauwels and Wood, 1999b, 2000], SGP97 [Crow and Wood, 2003], SGP99 [Gao et al., 2005], SMEX02 [Crow et al., 2005], y AgriSAR 2006 [Pauwels, 2008]. Los resultados obtenidos por los citados autores demuestran que el modelo simula correctamente el comportamiento de los flujos de agua y energía al interior de las cuencas estudiadas.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caudal observado vs. lluvias

Los valores de caudal y precipitación para las subcuencas de Canalda y Cogulers pueden observarse en la Figura 2. Respecto a los picos de caudal en Canalda, un 50% de los episodios ocurren en primavera, un 30 % en otoño y el 20% restante en invierno. En Cogulers son del orden de un 64%, 28 % y 8 % en los meses de primavera, otoño e invierno respectivamente. En el intervalo de tiempo estudiado no se registran aumentos del caudal en el período de verano. De acuerdo con Rius et al. [2001], la respuesta a escala horaria de los hidrogramas tiene una estrecha relación con el área de las cuencas, lo cual hace que la respuesta al

fenómeno de lluvia en la cuenca de Canalda tenga un retardo de dos horas respecto al comportamiento en Cogulers. Respecto al flujo de sedimentos la respuesta es muy baja en cuencas pequeñas, excepto bajo condiciones de picos de flujo en el hidrograma.

Los valores de caudal tienen escasa variabilidad a lo largo del periodo de tiempo estudiado. La serie hidrológica de la Ribera Salada en el periodo 1997 - 2001 muestra que existe un caudal permanente en el curso principal de la cuenca y los afluentes que drenan su cabecera, mientras que los tributarios de la parte media y baja de la cuenca presentan un marcado estiaje, con un caudal medio anual de 1,1 m³/s [Batalla & Poch, 2004]. Los aumentos de caudal ocurren de manera puntual en los periodos de máxima precipitación, la baja fluctuación en los valores de caudal está relacionada con los bajos valores de escorrentía encontrados en la cuenca [Verdu et al., 2000; Estruch et al., 2003, Loaiza Usuga & Pauwels, 2009] y la alta intercepción [Poch et al., 2002]. Respecto a este último parámetro Llorens & Gallart [2000] reportan valores altos de almacenamiento e intercepción por el dosel, regulados por las condiciones de la humedad atmosférica, para bosques de *Pinus sylvestris* en la cuenca de Vallcebre, aledaña a la zona de estudio.

Respecto al comportamiento observado de los caudales, no existe ninguna relación entre los picos de alta precipitación y la respuesta en los caudales. Esta respuesta y la presencia de un caudal constante en veranos secos y prolongados, son el resultado del aporte al caudal de agua procedente de acuíferos subterráneos. Dichos acuíferos son recargados con agua producto de la percolación y del flujo subsuperficial [Orozco et al., 2006]. En otras cuencas, como la cuenca del Vallcebre, la mayor parte de los flujos de agua corresponden a escorrentía por exceso de saturación del suelo en zonas bajas durante eventos de lluvia y flujo subsuperficial en las partes altas de la cuenca [Gallart et al., 2005].

4.2 Caudal observado vs. simulado

Los valores máximos y mínimos de caudal para el modelo a escala de subcuenca en Canalda y Cogulers, así como las medias (m³/s), pueden observarse en la Tabla 3. El comportamiento de los caudales registrados y simulados puede observarse en la Figura 3. De todas las simulaciones de caudal realizadas para

Canalda, la simulación 1 es la que mejores resultados arroja respecto al comportamiento de los picos de caudal en la cuenca. Las demás simulaciones tienden a presentar valores de caudal poco variables en el tiempo, con limitaciones para simular los picos de caudal (simulación 2 y 3). Respecto a la simulación 4 los valores simulados disminuyen en el tiempo con valores de caudal mayores a los observados, presentando igualmente limitaciones

en lo referente a la simulación de los picos de caudal. En Cogulers, la simulación 1 se aproxima mejor al comportamiento observado del caudal, respetando las tendencias de los picos de aumento de caudal. La simulación 2, tiende a sobrevalorar ligeramente el caudal. Las simulaciones 3 y 4 subestiman los valores de caudal y no representan de forma acertada las fluctuaciones del caudal a lo largo del tiempo.

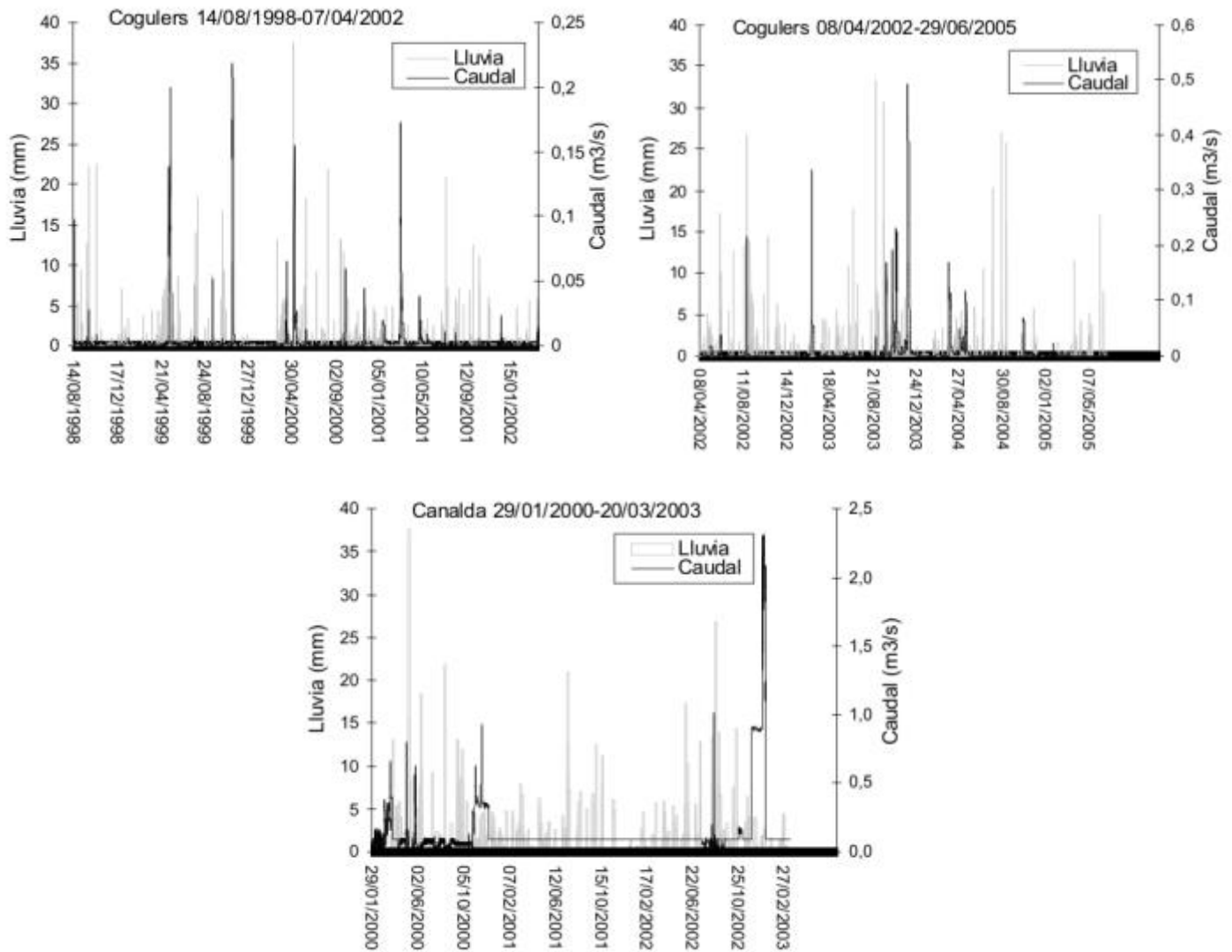


Figura 2. Comparación entre lluvia y caudal horario observado en la subcuenca Cogulers a partir de 14/08/1998 hasta 29/06/2005, y la subcuenca Canalda a partir del 29/01/2000 hasta 20/03/2003

Tabla 3. Parámetros para la calibración del modelo en las cuencas de Canalda y Cogulers. NMF nivel máximo del flujo base, Ks conductividad hidráulica saturada, PNF profundidad del nivel freático, valores de caudal mínimo (Q_{min}), máximo (Q_{max}), promedio (Q_m) y cuadrado medio del error (RMSE) para Canalda y Cogulers

Sitio	NMF (m^3/s)	Ks (mm/h)	PNF (m)	Q_{min}	Q_{max} m^3/s	Q_m	RMSE (-)
Canalda observado	-	-	-	1.07×10^{-5}	2.32	0.1375	-
Canalda simulación 1	2.5	2.7	10	1.83×10^{-17}	2.03	0.0304	0.1144
Canalda simulación 2	0.05	2.7	1	0.0214	0.2	0.0207	0.2532
Canalda simulación 3	0.05	2.7	10	0.1044	1	0.0991	0.2268
Canalda simulación 4	1.5	2.7	1	0.58	0.82	0.6795	0.5777
Cogulers observado	-	-	-	0	0.4941	0.0042	-
Cogulers simulación 1	0.05	2.7	1	0.0025	0.1566	0.0105	0.000025
Cogulers simulación 2	0.1	3	0.5	0.0102	0.0273	0.0151	0.000044
Cogulers simulación 3	0.0035	5	1	7.78×10^{-4}	1.44×10^{-3}	0.0009	0.000013
Cogulers simulación 4	0.5	2.7	1	0.0015	0.0028	0.0019	0.000009

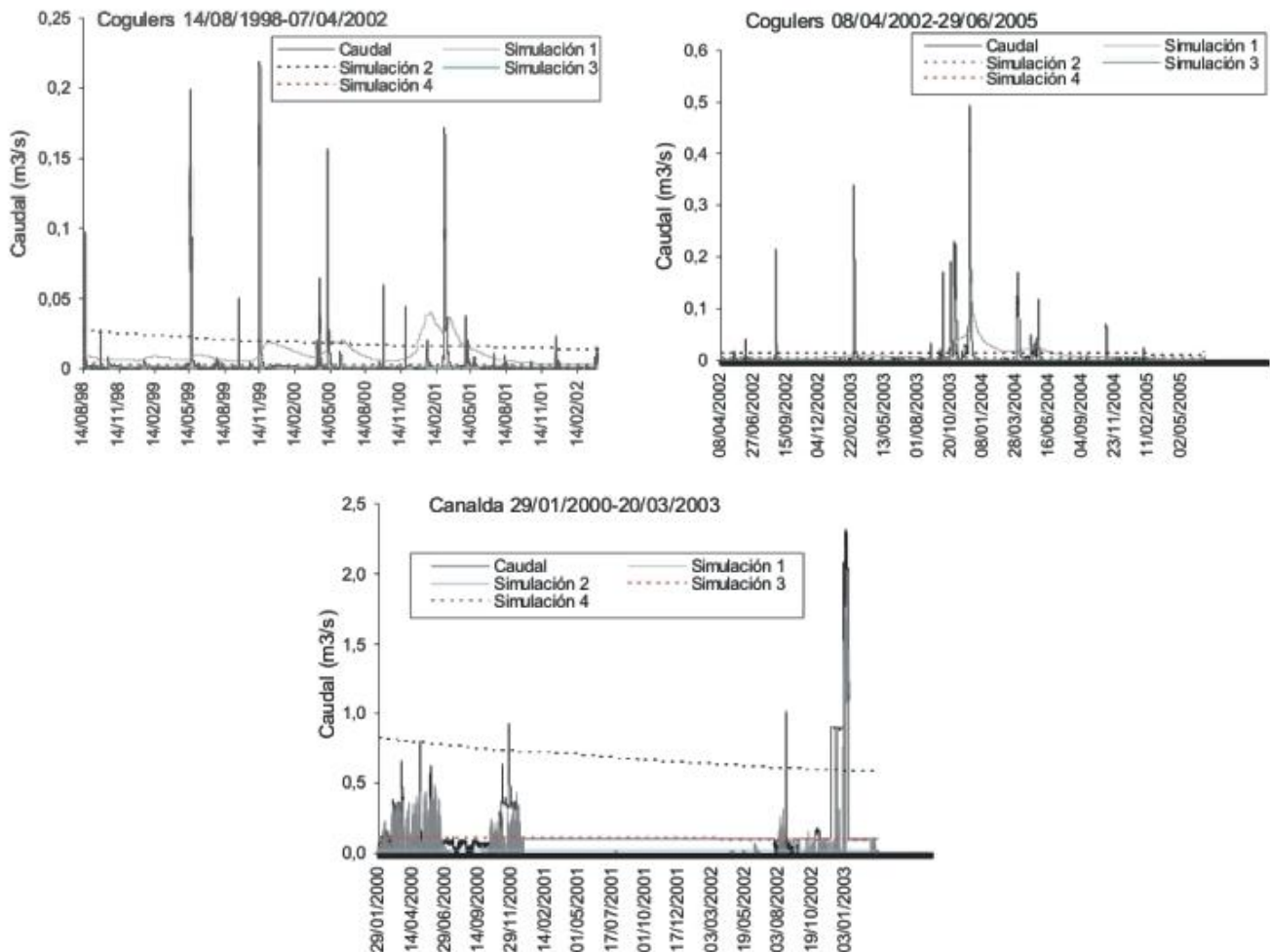


Figura 3. Comparación entre Caudal horario observado y simulado para las subcuencas de Cogulers a partir de 14/08/1998 hasta 29/06/2005, y Canalda a partir del 29/01/2002 hasta 20/03/2003

Resultados encontrados por Gallart et al. [2005] para la cuenca de Vallcebre (cerca a la zona estudiada), muestran valores de eficiencia para la calibración entre 56 - 96 % y para el modelo validado entre 42 - 85 %. De los modelos estudiados: TOPCAT provee resultados aceptables en periodos húmedos, subestimando los valores de caudal en otras condiciones; el modelo TOPKAPI sobreestima el flujo de agua sobretodo en condiciones secas; el modelo BROOK subestima la mayoría de los eventos simulados; el modelo SACRAMENTO presenta los peores resultados debido a la complejidad de los parámetros utilizados por este modelo; el modelo SHERTRAN simula de manera correcta el comportamiento de los caudales para escala de cuenca. Este último modelo simula con bastante precisión los picos del caudal y su comportamiento normal respecto a los otros modelos, los cuales presentan resultados menos satisfactorios.

Estudios realizados por Verdu et al. [2000] ponen en duda la aplicación de modelos de simulación hidrológica para la simulación de la escorrentía en la cuenca, debido a las elevadas tasas de infiltración y los bajos volúmenes de escorrentía presentes en la cuenca. Estos autores sólo los recomiendan en zonas con tasas más bajas de infiltración y mayor escorrentía, resaltando la necesidad de conocer la humedad precedente del suelo para entender el funcionamiento del fenómeno de escorrentía en la cuenca. Rius et al. [2001] estudiaron el comportamiento de los flujos hidrológicos y el transporte de sedimentos asociados al caudal en la cuenca de la Ribera Salada, encontrando que las zonas de bosque no disturbado son importantes para asegurar las entradas de agua en el sistema.

Simulaciones realizadas mediante la utilización del modelo HEC-I en la subcuenca de Canalda encontraron inconsistencias en los resultados debido al grado de generalización de los parámetros de entrada y a problemas asociados con la escala de trabajo, recomendando la utilización de un registro continuo en el tiempo de datos de crecidas y precipitaciones [Estruch et al., 2003].

Los resultados de la simulación están influenciados en gran medida por la profundidad del nivel freático y los valores del flujo base. Los valores de caudal promedio simulado tienden a ser más bajos que los valores observados para la mayoría de las simulaciones. Los resultados generados mediante la utilización de estos modelos de simulación permiten acercarse al

comportamiento esperado de los caudales. Sin embargo, para generar un modelo que se ajuste con precisión a la dinámica del caudal en la cuenca, es necesario conocer los volúmenes, comportamiento y distribución de los acuíferos al interior de la cuenca, además de las fluctuaciones del nivel freático para las diferentes escalas de cuenca y estaciones climáticas, para lo cual se requiere de una caracterización hidrogeológica detallada. El modelo TOPLATS predice con acierto los aportes al caudal procedentes de la escorrentía. Solo es necesario calcular los aportes asociados a la presencia de acuíferos subterráneos, comunes en este tipo de cuencas.

5. Conclusiones

Los caudales tienden a ser bajos a lo largo del año, aun en periodos con mayor precipitación debido a la baja escorrentía superficial, favorecida por la alta porosidad de los suelos. En ambas cuencas el caudal es permanente, aun en épocas de sequía prolongada, lo cual acentúa la hipótesis de la importancia del aporte de agua procedente de acuíferos subterráneos a los cursos de agua, especialmente en el caso de la subcuenca de Canalda.

Respecto a los episodios de crecidas son poco frecuentes en la cuenca y están asociados a las lluvias de primavera y otoño. Los episodios mas significativos de aumentos de caudal están asociados a las primeras lluvias del otoño cuando el suelo presenta bajos contenidos de humedad, lo cual favorece los fenómenos de escorrentía superficial [Loaiza, Usuga & Pauwels, 2009]. En invierno se presentan algunos episodios de aumento de caudal asociados a fenómenos de deshielo en la parte alta de la cuenca. Para el verano no se presentan episodios de picos de caudal.

El modelo TOPLATS calibrado [Loaiza Usuga & Pauwels, 2008] predice con acierto el comportamiento de los caudales en la cuenca. La asimilación del modelo mediante la utilización de valores de caudal medidos en campo muestran buenos resultados, a pesar de que el modelo trabaja con flujos de tipo hortoniano. Sin embargo, sería interesante estudiar otro tipo de flujos al interior de la cuenca (flujo subsuperficial) y la importancia del agua de drenaje en la recarga de los acuíferos dependiendo de los diferentes usos del suelo presentes en la cuenca. El

conocimiento del comportamiento de las aguas freáticas en las diferentes estaciones del año podría ayudar a visualizar mejor el balance de entradas y salidas al interior de la cuenca, ya que dicho balance se queda corto en las épocas de verano, donde las entradas son nulas y los aportes al caudal continúan siendo permanentes. La flexibilidad del modelo ha permitido su calibración, además su exhaustivo nivel de detalle en lo referente a los parámetros de entrada requeridos hacen recomendable su aplicación en estos ambientes, siempre y cuando se tenga información de caudales que permita su validación.

Agradecimientos

El autor agradece al programa de becas MAE - AECI. A la Universidad de Lleida, al Área de Hidrología del Centre Tecnologic Forestal de Catalunya (España) por facilitar la información básica de Campo. Al Laboratorio de Hidrología y Aguas de la Universidad de Gante (Bélgica) en la parte de simulación hidrológica. Al Dr. Valentijn Pauwels (Universidad de Gante) por su ayuda en la implementación del modelo hidrológico y a la Dra. Rosa Poch (Universidad de Lleida) como directora de este proyecto de investigación.

Referencias

Acuña, E & Poch, R.M., 2001. Variabilidad de propiedades físicas de suelos forestales. Aplicación a la cuenca Rasa de Cogulers (El Solsones, Prepirineo Catalán). *Edafologia*. Vol. 8. pp 11 - 23.

Batalla, R. J & Poch, R.M., 2004. Caracterizació dels fluxos d'aigua i sediment en una conca representativa del Pre-Pirineu (Ribera Salada conca mitja del Segre). *Rural Forest*. Vol. 2. pp. 11 - 14.

Bormann, H., 2006. Effects of grid size and aggregation on regional scale land use scenario calculation using SVAT schemes. *Adv. Geosci*. pp. 45 - 52.

Crow, W.T., Drusch, M., Wood, E.F., 2001. An observation system simulation experiment for the impact of land surface heterogeneity on AMSR-E soil moisture retrievals. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensors*. 39 (8). pp. 1622 - 1632.

Crow, W.T. & Wood, E.F., 2002. The value of coarse-scale soil moisture observations for regional surface energy balance modeling. *J. Hydromet.* 3 (4). pp. 467 - 482.

Crow, W.T. & Wood, E.F., 2003. The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: a case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Adv. Water Resour.* 26 (2). pp. 137 - 149.

Crow, W.T., Chan, S.T.K., Entekhabi, D., Houser, P.R., Hsu, A.Y., Jackson, T.J., Njoku, E.G., O'Neill, P.E., Shi, J.C., Zhan, X. 2005. An observing system simulation experiment for Hydros radiometer-only soil moisture products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensors*. 43 (6). pp 1289 - 1303.

CTFC, 2006. Hydrological research base data. Centre Tecnologic Forestal de Catalunya. Hydrology and soil conservation department. Solsona. Spain.

Dery, S.T., Crow, W.T., Stieglitz, M., Wood, E.F., 2004. Modeling snowcover heterogeneity over complex terrain for regional and global climate models. *J. Hydromet.* 5 (1). pp. 33 - 48.

Estruch, J., Rius, J & Poch, R.M., 2003. Influencia de la información territorial en la simulación hidrológica. Aplicación a la cuenca de Canalda (El Solsonès, Lleida). *Revista Montes*. 73. pp. 19 - 29.

Famiglietti, J.S. & Wood, E.F., 1994. Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res.* 30 (11). pp. 3061 - 3078.

Gallart, F., Latron, J., Llorens, P., 2005. Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment. The Vallcebre research basins (Southeastern Pyrenees) I: hydrology. In: *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. ed: Garcia C., Batalla R. ELSEVIER B. pp. 1 - 16.

García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Sobrón, I., 1985. Estudio comparado de la evolución geomorfológica de campos abandonados y áreas repobladas de la cuenca de Jubera. Comunidad Autónoma de la Rioja. Logroño. Informe técnico. 345 P.

Gao, H., Wood, E.F., Drusch, M., Crow, W.T., Jackson, T.J., 2005. Using a microwave emission model to estimate soil moisture from ESTAR observations during SGP99. *J. Hydromet.* 5 (1). pp. 49 - 63.

- ICC, 1996. *Atles climàtic de Catalunya*. Departament de Política Territorial y Obres Publicas. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- ICC, 2006. *Bases de dadas cartograficas de Catalunya*. Mapas comarcals de Catalunya, 1:50000.
- Lasanta, T., 1988. The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineo*. 132, pp. 15 - 36.
- Llorens, P & Gallart, F., 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*. 240. pp. 131 - 144.
- Loaiza Usuga J.C. & Pauwels V.R.N., 2008. Calibration and multiple data set-based validation of a land surface model in a mountainous Mediterranean study area. *Journal of Hydrology*. 356. pp. 223 - 233.
- Loaiza Usuga, J.C., Pauwels, V.R.N. & De Bello, F., 2008. Evaluation of soil moisture regime prediction methods under different ecological conditions in the Pre-Pyrenees. *Catena*. submitted.
- Loaiza Usuga J.C & Pauwels, V.R.N., 2009. The effects of land use on soil runoff in Mediterranean mountain basin. In: *Surface Runoff*. Ed. Frank Columbus. Published by: Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY. In press.
- Orozco, M., Poch, R.M., Batalla, R.J., Balasch, J.C., 2006. Hydrochemical budget of a Mediterranean mountain basin in relation to land use (The Ribera Salada, Catalan Pre - Pyrenees, NE Spain). *Z.Geomorph.N.F.* 50. pp. 77 - 94.
- Pauwels, V.R.N. & Wood, E. F. 1999a. A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes 1. Model improvements. *J. Geoph. Res.* 104(D22). pp. 27,811 - 27,822.
- Pauwels, V.R.N. & Wood, E. F., 1999b. A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes 2. Application and validation. *J. Geoph. Res.* 104(D22). pp. 27,823 - 27,829.
- Pauwels, V.R.N. & Wood, E. F., 2000. The importance of misclassifications and spatial resolution of land cover data in the uncertainty in model results over boreal ecosystems. *J. Hydromet.* 1 (3). pp. 255 - 266.
- Pauwels, V.R.N., Hoeben, R., Verhoest, N.E.C., Troch, F.P. 2001. The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small - scale basins through data assimilation. *J. Hydrol.* 251. pp. 88 - 102.
- Pauwels, V.R.N., Hoeben, R., Verhoest, N.E.C., Troch, F.P., Troch, P.A. 2002. Improvement of TOPLATS - based discharge predictions through assimilation of ERS - based remotely sensed soil moisture values. *Hydrological Processes*. 16. pp. 995-1013.
- Pauwels, V.R.N & De Lannoy, G.J.M. 2006. Improvement of modeled soil wetness conditions and turbulent fluxes through the assimilation of observed discharge. *J. Hydromet.* 7 (3). pp. 458 - 477.
- Pauwels, V. R. N. 2008. A multistart weight-adaptive recursive parameter estimation method. *Water Resour. Res.*, in press.
- Peters-Lidard, C. D., Zion, M.S., Wood, E. F., 1997. A soil vegetation atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes. *J. Geoph. Res.* 102 (D4). pp. 4303 - 4324.
- Poch, R.M., Pratdesaba, E., Rius, J., 2002. Hydrology of forest soils in El Solsones (Catalonia): contribution to the catchment water resources. In: Rubio, J.L., Morgan R.P.C., Asins, S., Andreu, V (Eds). *Proceedings of the third international congress man and soil at the third millennium*. Geoforma Ed. pp. 411 - 422.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*. 25. pp. 1316 - 1320.
- Rius, J., Batalla, V.R. & Poch, R.M., 2001. Monitoring water and sediment yield in Mediterranean mountains watersheds: preliminary results. 10th international soil conservation organization meeting held may 24 - 29. *Pardue University- USDA ARS*. pp. 223 - 228.
- SSS. 2006. *Keys to Soil taxonomy*. Ninth edition. SSS Soil Conservation Service. Agric. US Gov printing office. Washington, D.C. 326 P.
- Ubalde, J.M., Rius, J., Poch, R.M., 1999. Monitorización de los cambios del uso del suelo en la cabecera de la Cuenca Ribera Salada mediante fotografía aérea y SIG (El Solsonès, Lleida, España). *Pirineos*. 153- 154. pp. 101 - 122.
- Verdú, J.M., Batalla, R.J., Poch, R.M., 2000. Dinámica erosiva y aplicabilidad de modelos físicos de erosión en una cuenca de montaña mediterránea (Ribera Salada, Cuenca del Segre, Lleida, España). *Pirineos*. 155. pp. 37 - 57.