



## EXPORTACION DE AGUA Y SEDIMENTO EN DOS PEQUEÑAS CUENCAS MEDITERRANEAS BAJO DIFERENTES USOS DEL SUELO. SISTEMA COSTERO CATALAN

*Water and sediment yield in two representative Mediterranean catchments under different land uses in the Catalan Coastal Ranges*

M<sup>a</sup> Sala y J. Farguell

*G.R.A.M. Grup de Recerca Ambiental Mediterrània. Departament de Geografia Física, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, C/ Baldori Reixac s/n 08028 Barcelona  
e-mail: Sala@trivium.gh.ub.es*

**Resumen:** El objetivo de la investigación es conocer el impacto de los usos forestales y agrícolas en la escorrentía y el transporte de sedimento en un medio de montaña mediterránea. El área de estudio se encuentra en el macizo de las Gavarres, en la terminación septentrional del Sistema Costero Catalán. Metodológicamente el estudio se basa en la instrumentación y monitorización de dos pequeñas cuencas integradas, Bosc y Campàs, la primera totalmente forestada y la segunda forestal con campos de cultivo. Los datos de que se dispone se remontan a 1993 pero las series no siempre son completas. Aunque la variabilidad en todos los parámetros es muy elevada en las dos cuencas, los caudales medios pueden estimarse en 6 l/s en la cuenca forestal y de 8 l/s en la cuenca agrícola y forestal, generando unos coeficientes de escorrentía medios en un 8% en Bosc y en un 9% en Campàs. La respuesta hidrológica a la precipitación después de la sequía estival no se produce hasta noviembre o diciembre, y la escorrentía se mantiene sólo hasta abril o mayo. Las crecidas pueden representar hasta un 80% del volumen total de agua, con máximos de 469 l/s en Bosc y de 879 l/s en Campàs. El impacto de las labores agrícolas es más consistente en la concentración de solutos, que varían de 105 mg/l a 152 mg/l. El material en suspensión tiene una respuesta mucho más irregular, que generalmente depende de acciones antrópicas específicas (laboreo, y arreglo de caminos), alcanzando concentraciones de hasta 0,75 g/l y una producción media de 4,3 kg/ha/año en Campàs, y de 2,5 en Bosc. Es en la cuenca de Campàs donde se sitúan los campos de cultivo y el mayor número de caminos rurales

**Palabras clave:** cuencas experimentales, hidrología, sedimento, solutos, usos del suelo agrícolas y forestales

**Abstract:** The objectives of the research are to assess the impact of forestry and agriculture land uses in runoff, storm runoff and water quality in a Mediterranean mountain environment. The study area is located in the North end of the Catalan Coastal Ranges. The research is based on the monitoring of two small nested catchments, Bosc under forestry and Campàs under forestry and agriculture. Data has been collected since 1993 but the records are not always continuous. While variability of the parameters is high in both catchments, mean discharges may be estimated in 6 l/s in the forested catchment and in 8 l/s in the forest and agricultural catchment which generates mean runoff coefficients around 8 %, in Bosc and on 9 % in Campàs. Hydrological response to rainfall after summer drought is not produced until November or December and runoff lasts until April or May. Floods may represent up to 80% of total water volume throughout the year, with a maximum of 469 l/s in Bosc and of 879 l/s in Campàs. The impact of agricultural practices is more consistent in solutes concentration, which may vary from 105 mg/l up to 152 mg/l. Suspended material has a higher irregular response depending on specific anthropic actions (ploughing and track conservation), reaching concentrations up to 0.75 mg/l and yielding 4.3 kg/ha/yr in Campàs and 2,5 kg/ha/yr in Bosc. It is in the Campàs where the agricultural fields and major number of tracks are located.

**Key Words:** experimental catchments, hydrology, suspended sediment, solutes, forestry and agricultural land uses



Sala, M<sup>a</sup> & Farguell, J. Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema Costero Catalán. Rev. C. & G., 16 (1-4), 97-109.

## 1. Introducción

El estudio llevado a cabo a nivel de pequeñas cuencas, sea con un enfoque hidro-ecológico (evaluación de nutrientes) o hidro-geomórfico (transporte de sólidos en suspensión y en disolución), permite una mayor y más detallada comprensión de los procesos que intervienen en la dinámica de la cuenca.

A nivel internacional, los primeros trabajos se deben fundamentalmente a las estaciones ecológicas forestales de Coweeta en Estados Unidos. En el campo hidro-geomorfológico los trabajos pioneros son los llevados a cabo por Leopold, Emmett y Myrick (1966), Douglas (1967), Hall (1971), Carson *et al.* (1973), Walling (1974) y Walling y Webb (1983).

En España son ya bastantes los estudios llevados a cabo en el marco de cuencas experimentales. Los pioneros fueron los ecólogos de la escuela de Margalef quienes, a partir de una colaboración con ecólogos de EEUU, investigaron las características de los nutrientes en comunidades forestales Mediterráneas en cuencas situadas en la Sierra de Prades (Escarré *et al.*, 1986 y Piñol *et al.*, 1991), y en el Montseny (Ávila y Rodá, 1985, 1988).

Posteriormente, y desde un punto de vista hidro-geomorfológico, encontramos los trabajos de Díez *et al.* (1989) y de García Ruíz *et al.* (1995) en el Pirineo Central, Clotet *et al.* (1988), Llorens y Gallart (1992), y Balasch y Castelltort (1993) en el Alto Llobregat, orientados fundamentalmente a evaluar los efectos del abandono de tierras agrícolas en áreas de montaña. Trabajos más recientes, centrados en el estudio del impacto del sistema de dehesa extremeña, son los de Schnabel (1997) y Ceballos y Schnabel (1998).

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar la respuesta hidro-geomórfica a los usos forestales y agrícolas en la escorrentía y el transporte de sedi-

mento, a escala de cuenca de drenaje pequeña, en una área de montaña mediterránea de clima subhúmedo y sustrato granítico. Para ello, el estudio se centra en los siguientes aspectos: a) la secuencia mensual de la generación de escorrentía con la precipitación; b) la secuencia diaria de la generación de escorrentía; c) la respuesta instantánea de las cuencas; d) la producción de sedimento en disolución y en suspensión.

## 3. Área de estudio

El estudio se basa en la monitorización meteorológica e hidrológica de dos cuencas, una exclusivamente bajo usos forestales y la otra bajo usos forestales y un 10% de usos agrícolas de secano. Los datos se vienen recogiendo desde 1993 pero no siempre son continuos (Sala *et al.*, 1994).

Las cuencas están situadas en el macizo de las Gavarres, en el extremo norte del Sistema Costero Catalán (Figura 1). Se han seleccionado dos subcuencas representativas de los principales usos del suelo, como son los forestales y los agrícolas de secano. La altitud máxima es de 440 m.s.n.m. y la pendiente media de la cuenca en cabecera es del 8%, disminuyendo aguas abajo.

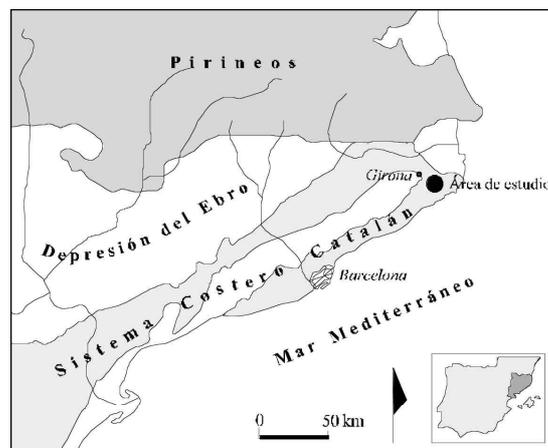


Figura 1: Localización del área de estudio.  
Figure 1: Location of the study area.

La litología consiste principalmente en granitos, con presencia de rocas metamórficas en las áreas somitales y depósitos aluviales en la llanura. La vegetación está compuesta por alcornocales mezclados con pinos de diversa índole, robles y encinas, así como una capa arbustiva bien desarrollada (Sala, 1979). Los suelos son del tipo inceptisoles, con un horizonte de alteración en profundidad, ácidos, arenosos y con un 5-6% de contenido en materia orgánica.

El clima es mediterráneo subhúmedo, con valores medios anuales de temperatura de 15°C y una de precipitación 670 mm, si bien con una marcada variabilidad anual (coeficiente de variación 24%). La secuencia de precipitación estacional es la siguiente: Otoño (37%), Invierno (26%), Primavera (24%) y Verano (13%). El régimen hidrológico está asimismo definido por las características mediterráneas, es decir con un marcado período de estiaje, que en este caso se extiende desde el final de la primavera hasta el otoño, y notables crecidas en otoño y durante la estación fría.

#### 4. Materiales y métodos

La instrumentación es la siguiente (Figura 2):

##### 4.1 Cuenca forestal.

Denominada *Bosc*, con una superficie de 1,6 km<sup>2</sup>, altitudes que van de 440 a 190 m.s.n.m., y a 41°52'32" N de latitud y 2°55'20"E de longitud. Dispone de una estación de aforos de sección com-

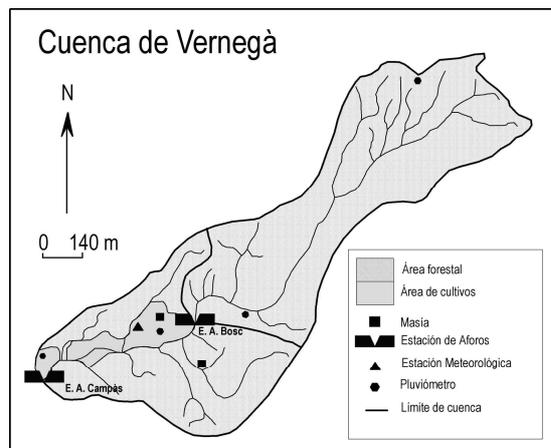


Figura 2: Cuencas experimentales.  
Figure 2: Experimental catchments.

binada rectangular y en forma de V de 45° de abertura, con una capacidad máxima de 0,059 m<sup>3</sup>/s. La estructura combinada tiene capacidad para 0,255 m<sup>3</sup>/s de caudal. En esta estación hay instalado un limnógrafo de tipo OTT y un muestreador de agua de nivel. Los controles del limnógrafo se llevan a cabo cada quince días y los del muestreador de agua y sedimento después de las crecidas.

##### 4.2 Cuenca forestal y agrícola.

Denominada *Campàs*, con una superficie de 2,4 km<sup>2</sup> de los cuales el 10% son agrícolas, altitudes que van de 440 a 150 m.s.n.m., y a 41°52'20" N, 2°54'03"E. Dispone de una sección combinada rectangular y triangular, la cual puede desalojar un caudal pico de 3,5 m<sup>3</sup>/s. Los niveles de agua se registran con un limnógrafo del tipo OTT y las muestras de agua se toman automáticamente con un ISCO 3700, programado para muestrear cada 2 horas durante episodios de crecidas, iniciándose el muestreo cuando el agua llega a los 10 cm de altura, es decir con un caudal de 0,6 l/s. En la estación también hay instalado un muestreador de agua de nivel. Los controles del limnógrafo se llevan a cabo cada quince días y los del muestreador de agua y sedimento después de las crecidas.

##### 4.3 Estación Meteorológica.

A 170 m s.n.m. y a 41°52'30" N de latitud y a 2°55'36" E de longitud. Está situada en la cuenca de *Campàs*, 150 m aguas abajo de la cuenca de *Bosc*. Incluye sensores para medir la precipitación, la humedad relativa, la temperatura del aire, la radiación neta y la global, la velocidad y dirección del viento. Todos los sensores están conectados a un registro continuo de datos que mide las variables cada 10 minutos. También se halla instalado un pluviómetro para evaluar la calidad del agua de lluvia. Otros tres pluviómetros se encuentran ubicados en distintas partes de la cuenca de drenaje para analizar las variaciones de la precipitación dentro de la misma. Para este trabajo sólo se han utilizado los datos obtenidos en la estación, si bien en algunos casos han sido corregidos en base al pluviómetro situado en el centro de la cuenca, frente a la masía (Farguell y Sala 2001), del que se dispone de una serie más larga (desde 1987).

## 5. Resultados

### 5.1 Valores anuales y mensuales de precipitación y escorrentía

La precipitación media durante el período 1994-1999 fue de 594 mm (Sala *et al.* 2001). El año 1995 fue muy seco (416 mm) mientras que 1996 fue muy húmedo (725 mm). Si bien en casi todos los meses se ha registrado precipitación, con las excepciones de marzo a junio de 1995, la escorrentía sólo está presente entre octubre y marzo, con máximos que pueden ser de otoño o de invierno (Figura 3). Las causas de este hecho son, por una parte, la permeabilidad de la capa meteorizada de granito, con buena porosidad incluso en los

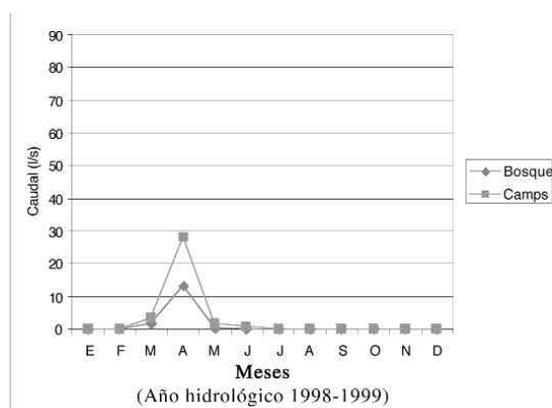
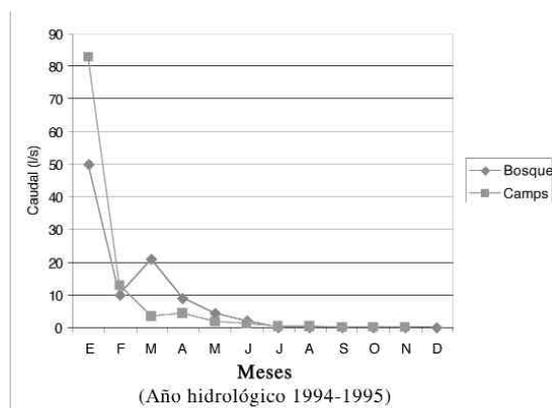


Figura 3: Caudales medios mensuales 1994-95 y 1998-99.  
Figure 3: Monthly mean discharges 1994-95 and 1998-99.

horizontes profundos (Ubeda 1994), que favorece tasas altas de infiltración, y el consumo de agua por parte de la masa forestal. Por otro lado, bajo estas condiciones, el nivel freático tarda mucho en recuperar los niveles del invierno después de la larga sequía estival, lo cual se ve agravado por la extracción de agua para el regadío desde finales de primavera hasta pasado el verano, como puede verse a partir del control llevado a cabo de la evolución anual de uno de los pozos del área de estudio, en el que se registra un descenso muy acusado de nivel a partir de junio que no recupera el nivel inicial hasta diciembre (Figura 4).

El hecho de que no siempre se produzca escorrentía como respuesta a la precipitación hace que los valores hidrológicos medios anuales sean muy bajos, (excepto para el año 1996 que sin embargo no se contabiliza dado que la estación de *Bosc* no funcionó), y siempre ligeramente inferiores en la pequeña cuenca forestal (Tabla 1). Así, los valores medios de escorrentía anuales en *Bosc* y *Campàs* son de 40 mm y de 46 mm respectivamente, los caudales de 6 l/s y de 8 l/s y los coeficientes de escorrentía van del 8% al 9%. La diferencia entre las cuencas es más notable en relación al volumen total de agua recogida, dada la diferencia en tamaño entre ambas cuencas.

Debido a la estacionalidad de la escorrentía, el volumen de agua aportado durante el año es muy bajo, variando desde los 8.000 m<sup>3</sup> hasta los 215.000 m<sup>3</sup> en la cuenca forestal y desde 10.000 m<sup>3</sup> hasta los 321.788 m<sup>3</sup> en la cuenca forestal y agrícola (Tabla 1). La crecida de octubre de 1994 fue

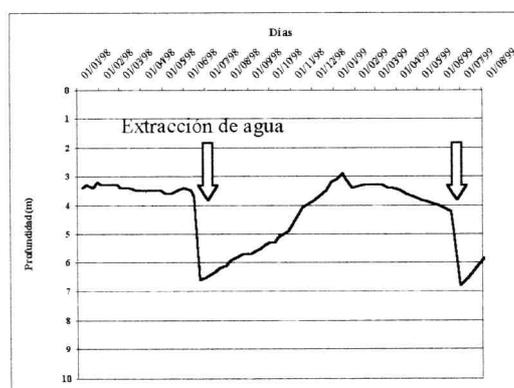


Figura 4: Evolución del nivel piezométrico 1998-99.  
Figure 4: Piezometric evolution level 1998-99.

Tabla 1: Valores hidrológicos medios 1994-1999.  
 Table 1: Mean hydrological values 1994-1999.

Año	P (mm)	e (mm)		Q (l/s)		V. T. (m <sup>3</sup> )		Ce (%)		Qs (l/s/km <sup>2</sup> )	
		Bosc	Campás	Bosc	Campás	Bosc	Campás	Bosc	Campás	Bosc	Campás
1994	529	135	134	27	33,1	215663	321788	25,5	25,4	17	16,7
1995	416	24	23	1,3	2	39102	55539	5,9	5,6	0,8	1
1996	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
1997	608	16	37	0,8	2,8	24807	88253	2,6	6,0	0,5	1
1998	649	5	4	0,3	0,4	8258	10098	0,8	0,6	0,2	0
1999	638	22	33	1,1	2,5	34899	78710	3,4	5,1	0,7	1

Tabla 2: Valores hidrológicos de crecida 1993-1999, ordenados en años hidrológicos.  
 Table 2: Flood hydrological values 1993-1999, ordered by hydrological years.

Eventos por años hidrológicos	Lluvia mm	Escorrentía mm		Coef. Escorr. %		Volumen Total m <sup>3</sup>		Caudal Pico l/s	
		Bosc	Campás	Bosc	Campás	Bosc	Campás	Bosc	Campás
04/11/93	31	SD	4,0	SD	12,7	SD	7.022	SD	310,0
25/11/93	12	SD	0,5	SD	4,1	SD	1.143	SD	14,0
01/12/93	5	SD	0,1	SD	2,5	SD	336	SD	11,0
07/01/94	29	SD	0,3	SD	1,1	SD	720	SD	10,0
04/02/94	15	SD	0,03	SD	0,2	SD	84	SD	3,4
14/02/94	43	SD	2,3	SD	5,4	SD	5.746	SD	68,0
22/03/94	13	0,04	0,03	0,3	0,2	70	74	3,5	3,7
17/05/94	27	0,009	0,006	0,03	0,02	14	15	0,3	0,4
10/10/94	165	48,4	59,5	29,3	36,1	77.388	142.862	468,8	879,0
19/10/94	48	27,3	26,4	57,5	55,6	43.640	63.374	201,7	281,0
28/10/94	34	9,6	7,8	28,1	22,9	16.252	18.757	89,0	87,7
01/01/95	14	0,7	1,5	5,4	10,7	1.192	3.522	15,7	12,8
08/12/95	86	SD	5,9	SD	6,8	SD	14.260	SD	270,0
16/12/95	29	SD	7,5	SD	26,2	SD	17.942	SD	84,8
14/01/96	42	SD	22,3	SD	53,1	SD	53.614	SD	
17/04/96	47	SD	3,6	SD	7,6	SD	9.111	SD	8,1
29/04/96	19	SD	4,3	SD	22,6	SD	10.267	SD	13,7
02/01/97	60	SD	27,9	SD	47	SD	67.916	SD	137,7
28/01/97	17	SD	3,3	SD	20,1	SD	7.966	SD	17,8
26/11/97	69	3,2	SD	4,6	SD	5.175	SD	50,6	SD
19/12/97	65	12,7	SD	19,6	SD	19.340	SD	120,5	SD
03/02/98	31	1,5	SD	4,9	SD	2.441	SD	26,9	SD
04/12/98	119	2,7	3,4	2,3	2,9	4.375	8.264	34,9	44,2
31/12/98	47	0,3	2,1	0,5	4,5	403	5.099	4,8	56,6
09/01/99	56	1,5	2,7	2,7	4,4	2.428	6.812	14,3	56,6
17/01/99	49	14,6	2,2	29	20	23.401	24.121	55,1	51,1

excepcional puesto que, como respuesta a los 165 mm de precipitación, se llegó a valores de 93 mm de escorrentía y una aportación de 149.000 m<sup>3</sup> de agua en la cuenca forestal, y de hasta 98 mm y 236.788 m<sup>3</sup> en la cuenca más grande.

## 5.2 Crecidas

### 5.2.1 Cuenca de Campàs

La estación hidrométrica que cierra esta cuenca de 2,4 km<sup>2</sup> empezó a funcionar en noviembre de 1993, es decir que incluyen prácticamente todo el año hidrológico 1993-1994 y llega hasta el 1998-1999 (Tabla 2). Durante el primer período se registraron ocho crecidas, ninguna de ellas significativa excepto la del 4 de noviembre del 93 y la del 14 de febrero del 94, con escorrentías de 4 mm y 2,3 mm en respuesta a precipitaciones de 31 mm y 43 mm respectivamente, si bien en la primera crecida tuvo lugar un pico de 310 l/s, el segundo más elevado registrado hasta este momento en la estación. En el siguiente año hidrológico, 1994-1995, tuvieron lugar 5 crecidas, siendo la de octubre de 1994 la mayor, con una escorrentía de 98,7 mm para una precipitación de 165 mm y un caudal pico de 879 l/s el más elevado registrado en la estación. Sin embargo fue el período 1995-1996 el que registró en conjunto las mayores crecidas, seis en total, con valores de escorrentía desde 3,5 mm hasta 256,5 mm, siendo ésta la mayor registrada en la estación como respuesta a un máximo de precipitación de 125 mm. En los siguientes años no se registraron crecidas importantes, aunque hay que tener en

cuenta que en el año hidrológico 1997-98 la estación estuvo la mayor parte del tiempo fuera de servicio.

La crecida del 10/10/94 fue el evento de mayor magnitud registrado en la cuenca, con un caudal pico 2,8, 3,3 y 6,4 veces mayor que los siguientes dos máximos (4/11/93, 8/12/95 y 2/1/97), entre 13 y 20 veces las del siguiente grupo (caudales entre 68 l/s y 44 l/s), y entre 63 y 87 veces los de las crecidas menores

La observación de un hidrograma tipo de la estación (04/11/93) (Figura 5) muestra como la respuesta a la precipitación concentrada en un día es rápida, generando una escorrentía directa total de 6,9 mm y una escorrentía base de 1,7 mm, y desciende asimismo con rapidez, partiendo de un caudal base inexistente que llega a su máximo a las 72 horas y desaparece a los cuatro días. Tanto la repuesta al segundo pico de lluvia como las características del caudal base se explican por tratarse de una crecida de otoño, es decir cuando el nivel freático está todavía bajo tras la sequía estival. En cambio, el episodio del 1-27/01/97 (Figura 6) muestra asimismo una respuesta directa rápida a los sucesivos picos de lluvia, si bien en este caso, puesto que estamos en enero, cuando se produce la crecida existe un caudal base, que se incrementa hasta contribuir con una escorrentía de 8,2 mm que se mantiene hasta la siguiente crecida (28/01/97).

### 5.2.2. Cuenca de Bosc

La estación de *Bosc* empezó a funcionar en marzo de 1994 pero estuvo fuera de servicio el año 1996, por lo que su estudio se centra en los años

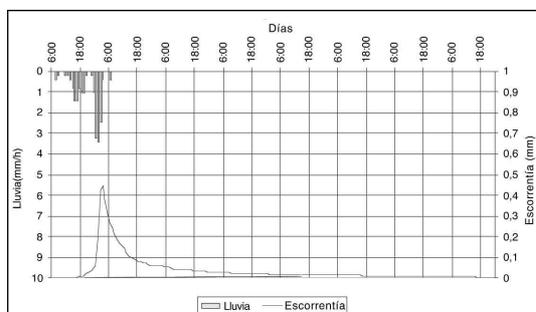


Figura 5: Crecida del 4 noviembre de 1993 en Campàs  
Figure 5: Flood hydrograph of November 4th, 1993 in Campàs.

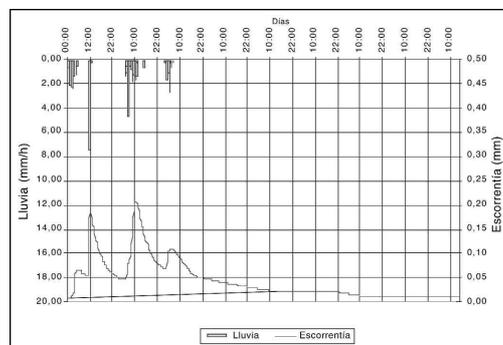


Figura 6: Crecida del 2 al 21 de enero de 1997 en Campàs.  
Figure 6: Flood hydrograph of 2nd to the 21st of January in Campàs.

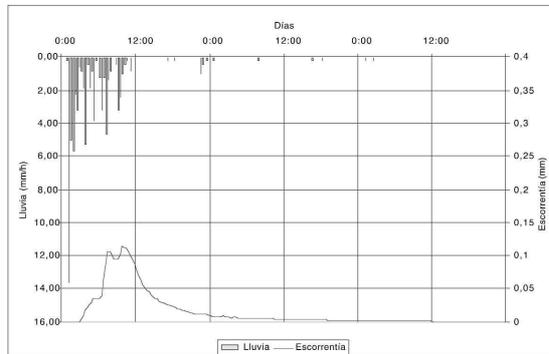


Figura 7: Crecida del 26 de noviembre de 1997 en Bosc.  
Figure 7: Flood hydrograph of November 26th, 1997 in Bosc.

hidrológicos 1994-1995, 1997-1998 y 1998-1999. Lo mismo que en la estación de Campàs, la mayor crecida registrada fue la de octubre de 1994, con una escurrentia de 93 mm, similar a la de la cuenca más grande (98,7 mm) y un caudal pico de 469 l/s, es decir casi el 75 % del registrado en Campàs y cinco veces el siguiente máximo, que fue de 120,5 l/s. Las crecidas medianas alcanzan unos caudales pico que oscilan entre los 55 l/s y los 27 l/s, mientras que otro grupo de menor cuantía no superan los 7 l/s.

El hidrograma de la crecida del 26 de noviembre de 1997 (Figura 7) indica una respuesta más lenta a la precipitación que en la cuenca de Campàs durante una crecida también del mes de noviembre. Igual que en Campàs, se parte de un nivel de base inexistente pero aquí el flujo base no llega a alcanzar un valor significativo, y por tanto la escurrentia total coincide con la directa. En el episodio de diciembre de 1997 (figura 8), la respuesta a los picos de precipitación es más lenta para el primero y más rápida para el segundo, cuando ya se ha generado una escurrentia de base inexistente al principio del evento. Se produce por tanto el caso de que aún siendo más elevado el primer episodio de lluvia la respuesta hidrológica es mayor en el segundo. También es más lenta la recesión de la crecida y el flujo de base se mantiene por más tiempo, a causa de la mayor duración del flujo de base.

### 5.2.3. Comparación de las dos cuencas

No se dispone de muchos valores simultáneos de caudales de las dos cuencas, y por tanto la com-

paración debe de tomarse con precaución. En el análisis de las crecidas coincidentes se observan distintos aspectos que a continuación se comentan.

Los eventos del 22/03/94 y del 17/05/94 fueron de baja magnitud en la respuesta a la precipitación, aunque ligeramente superior en *Bosc*. Esta respuesta puede explicarse por su ocurrencia fuera ya de la estación lluviosa, y por tanto con el acuífero en recesión.

En la crecida del 10/10/94 la respuesta fue elevada, algo más en la cuenca más grande (*Campàs*), especialmente en relación al caudal pico, el cual ha sido en ambos casos el mayor registrado. Para el hidrograma sólo se dispone de datos diarios, que sin embargo muestran en ambas cuencas una respuesta rápida a la precipitación, una duración corta (4 horas), así como una recesión también rápida. En la cuenca grande (*Campàs*) la escurrentia basal fue de 5 mm, lo cual representa un coeficiente de escurrentia de un 3% frente a un 33% del de la escurrentia directa. En la cuenca forestal (*Bosc*) la escurrentia basal llegó a 6,8 mm con un coeficiente de escurrentia del 4% frente al 25 % de escurrentia directa, lo cual muestra un menor valor de crecida pero un mayor flujo de base.

La respuesta a la crecida del 19/10/94 fue, a pesar de unas entradas de precipitación inferiores en un tercio a las de la precipitación anterior, la mayor registrada, con coeficientes de escurrentia que superan el 50% en ambas cuencas, si bien ligeramente superiores en la cuenca forestal (*Bosc*) como en el caso anterior. Los picos de crecida en cambio fueron inferiores a los de la crecida anterior

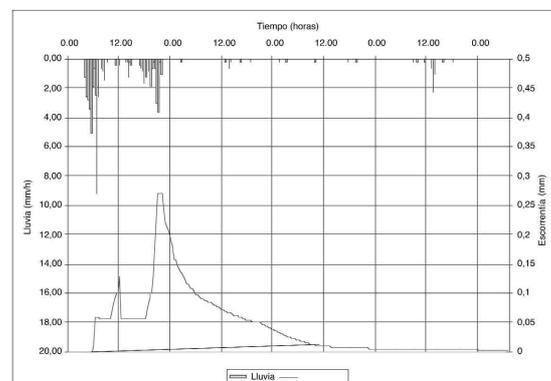


Figura 8: Crecida del 16 de diciembre de 1997 en Bosc.  
Figure 8: Flood hydrograph of December 16th, 1997 in Bosc.

y con una diferencia menor entre las dos estaciones. Los hidrogramas también son con datos diarios y muestran una forma similar en las dos cuencas, tanto en la crecida como en la recesión. Los valores del flujo de base fueron mucho más elevados que en la crecida anterior debido a las condiciones de humedad previa del suelo, pero también con poca diferencia entre las cuencas, si bien ligeramente superiores en el *Bosc*, con un coeficiente del 13,6% frente a un 12,9 % en *Campàs*. El valor del flujo directo fue muy similar con un coeficiente del 42,7% en *Bosc* y del 42,6 % en *Campàs*. El interés de esta crecida se centra en el hecho de que muestra una respuesta mucho más elevada a la precipitación que la crecida anterior, lo cual puede explicarse por el poco tiempo transcurrido entre ambas crecidas y por tanto a una mayor humedad del sustrato al producirse la segunda crecida

En el evento del 28/10/94, con solo 34 mm de precipitación, la respuesta de las dos cuencas fue similar a la producida en la primera crecida, a pesar de que en aquel caso el total de precipitación alcanzó los 165 mm. En cuanto al hidrograma, puede decirse lo mismo que para la crecida anterior. Los coeficientes de escorrentía directa fueron de 18% en *Bosc* y de 12,6% en *Campàs*, mientras que el flujo basal fue similar en ambas cuencas, con un 10% en *Bosc* y un 10,4% en *Campàs*. Es decir que la escorrentía directa fue superior en la cuenca forestal y el flujo basal fue similar en ambas.

La crecida del 04/12/98 tuvo característica similares a la del 10/10/94. Se trata del primer evento de la temporada, con respuesta baja a la precipitación a causa de las pérdidas por infiltración hacia las capas subterráneas. La comparación de los hidrogramas de la crecida del 1998 muestra una similitud de las respuestas de las dos cuencas, si bien con una mayor escorrentía en la pequeña cuenca forestal (Figura 9).

Las crecidas del 31/12/98 y 09/01/99 no pueden analizarse en detalle puesto que tuvo lugar una alteración del limnógrafo, sin embargo, es importante mencionarlas en relación a la siguiente crecida en el sentido de su papel en la recarga del acuífero.

Si bien durante la crecida del 17/01/99 tampoco el limnógrafo funcionó en la totalidad del evento, sí son fiables los datos del caudal base anterior a la misma y el pico de la crecida. Así tenemos que el inicio de la crecida en *Campàs* ocurre a partir de un

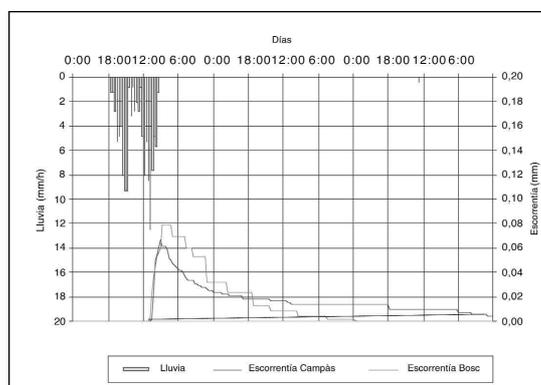


Figura 9: Comparación de las crecidas del 4 de diciembre de 1998 en Campàs y en Bosc

Figure 9: Comparison of flood hydrographs of the 4th of December in Campàs and Bosc.

caudal base de 15 l/s, y alcanza los 51 l/s durante el pico, lo cual representa un coeficiente de escorrentía de 19,3 %, mientras que el coeficiente a partir del caudal base fue de 10,8 %. En *Bosc* el inicio de la crecida ocurre a partir de 14 l/s de caudal base hasta llegar a 30 l/s durante la crecida, los cuales equivalen a un 17,7 % de coeficiente de escorrentía con el caudal base y a 29,3 % durante la crecida.

En resumen, las dos estaciones muestran un comportamiento hidrológico similar, aunque, tal como se ha dicho, los caudales picos fueron menores en la estación pequeña (*Bosc*) dada su menor superficie. Los coeficientes de escorrentía fueron en tres casos mayores en la cuenca forestal, pero en esta estación el volumen total de escorrentía de cualquier crecida siempre es menor que en la estación de *Campàs*.

Estas crecidas aportan el 80% del volumen total de agua que circula por la cuenca durante el año, si bien representan sólo un 20% del tiempo de escorrentía. Se trata por tanto de una cuenca típicamente torrencial, es decir que funciona solamente cuando se producen fuertes lluvias y el acuífero ha tenido tiempo de recargarse después de la sequía estival.

### 5.3. Exportación de solutos y de sedimento en suspensión en caudales base

Los datos de que se dispone en relación a la exportación de solutos y de sedimentos en suspensión de las cuencas de *Bosc* y *Campàs* son discon-

tínuos en el tiempo. Hay una serie de controles llevados a cabo desde noviembre de 1993 a mayo de 1994 que incluyen datos de solutos y de sedimento en suspensión en caudales base y en crecidas de las dos cuencas (Sala *et al.*, 1994, Sala *et al.*, 2001), y otra serie de muestras recogidas entre 1997 y 1999 solamente de la cuenca de *Campàs* en condiciones de crecida y para sedimento en suspensión.

El estudio de caudales base se llevó a cabo mediante muestreos manuales, y el de los caudales de crecida mediante el muestreador fijo de nivel en la cuenca forestal y con el muestreador automático en la cuenca de *Campàs*.

### 5.3.1 Cuenca de *Campàs*

Para los caudales base existe una variabilidad pequeña en las concentraciones de solutos y una ausencia de sedimento en suspensión (Figura 10). La conductividad eléctrica media es de 250 mS/cm. El transporte de solutos calculado es de 152 mg/l, compuesto por 37,5%  $\text{HCO}_3^-$ , 13%  $\text{Cl}^-$ , 12,5%  $\text{Ca}^{2+}$ , 12%  $\text{Na}^+$ , 10%  $\text{SO}_4^{2-}$ , 6%  $\text{Si}$ , 3%  $\text{Mg}^{2+}$ , 3%  $\text{NO}_3^-$  y 1,2%  $\text{K}^+$ . A partir de la escorrentía anual de este período se ha calculado una producción de 5 kg/ha/año.

### 5.3.2. Cuenca de *Bosc*

Igual que en la cuenca de *Campàs* (Figura 10), para los caudales base la variabilidad es pequeña en las concentraciones de solutos y no aparece sedimento en suspensión. La conductividad eléctrica media es de 230 mS/cm y el transporte de solutos alcanza concentraciones de 105 mg/l, es decir inferior al de la cuenca de *Campàs*. La composición química del agua de esta cuenca presenta cantidades inferiores en nitratos y fosfatos, atribuible a que aquí no hay ninguna superficie agrícola. Sin embargo la mayor diferencia se encuentra en los bicarbonatos, muy inferiores a los de la otra estación, posiblemente debido a una menor meteorización de los feldespatos de la roca madre. Sólo el  $\text{K}^+$ , el  $\text{Na}^+$ , y el  $\text{SiO}_2$  tienen valores superiores, explicables por un mayor impacto de la vegetación natural ( $\text{K}^+$ ) y por un predominio de leucogranito rico en Na. Estimaciones basadas en la cantidad total de agua drenada durante el periodo de estudio se obtienen exportaciones similares a las de *Campàs*.

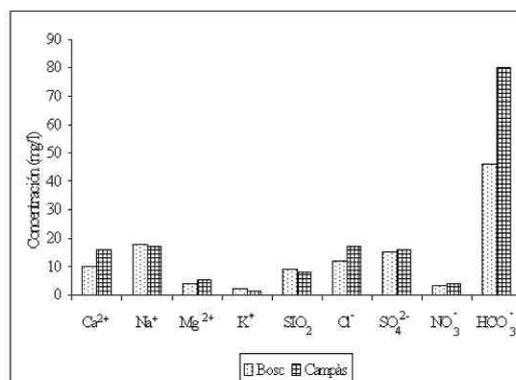


Figura 10: Concentración media de solutos con caudales base en *Campàs*.(1993-94)

Figure 10: Mean solutes concentration with base discharge in *Campàs*. (1993-94).

### 5.4. Exportación de solutos y de sedimento en suspensión en condiciones de crecida

En las crecidas el sedimento en suspensión aumenta drásticamente mientras que se observa un efecto de dilución en la carga química del río. Durante el periodo 1993-1994 el muestreador automático de la estación de *Campàs* tomó muestras cada 30 minutos de las crecidas del 4/11/93 y del 16/02/94. En ambas el muestreo incluye el pico de la crecida. En la estación de *Bosc* las muestras se tomaron manualmente y no coinciden con el pico de la crecida. La relación entre caudal y concentración de sedimento en suspensión no es estadísticamente significativa ( $r^2 = 0,23$ ) debido a la fuerte variación temporal de este transporte (138% de coeficiente de variación). Por tanto la producción media de sedimento en suspensión se ha calculado multiplicando el caudal medio por la concentración media.

#### 5.4.1. Cuenca de *Campàs*

Durante las crecidas del 4/11/93 y del 16/02/94 la carga de solutos se ha estimado en 1.990 kg y 2.152 kg respectivamente, lo cual da una carga específica de 7,1 kg/ha y 7,7 kg/ha. La evolución de la conductividad durante las crecidas refleja un efecto de dilución. Así, en la crecida del 4/11/93 desciende desde 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al inicio del hidrograma hasta 122  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el pico y 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al

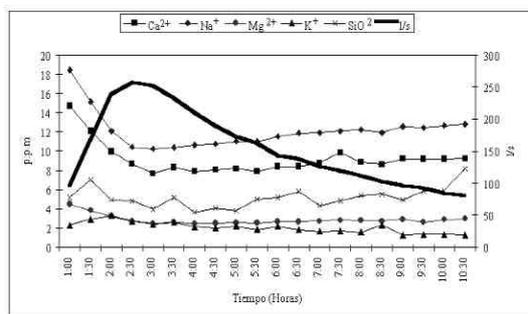


Figura 11: Evolución de la concentración de solutos en Campàs durante la crecida del 4 de noviembre de 1993.  
 Figure 11: Solute concentration evolution in Campàs during November 4th, 1993.

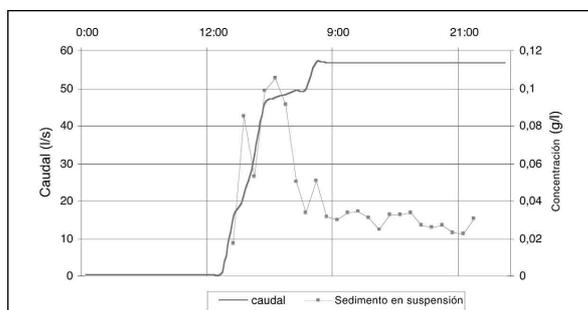


Figura 12: Sedigráfico de la crecida del 31 de diciembre de 1998 en Campàs.  
 Figure 12: Sedigraph of the 31st December 1998 flood.

final de la recesión, y en la crecida del 16/02/94 pasa de 255  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al inicio del hidrograma a 141  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durante el pico, para volver a casi 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  al final del evento. Este proceso de dilución afecta, en ambas crecidas, sobre todo al calcio, sodio y bicarbonatos, explicable por la aportación de agua de lluvia pobre en estos elementos, mientras magnesio, potasio y sílice varían poco. La concentración de nitratos, cloruros y sulfatos aparece más errática, con un incremento durante el pico de la crecida, atribuible al lavado de abonos agrícolas (nitratos), y al aumento del ion sulfato a medida que va diluyéndose el sulfato cálcico presente en el granito meteorizado (Figura 11).

En cuanto a la concentración del sedimento en suspensión su variabilidad es superior al 100%, similar a los datos obtenidos en la cuenca de Arbúcies (154%) (Batalla *et al.*, 1995). La concentración media estimada durante el período 1993-1994 fue de 7 kg/ha/año.

La Figura 12 muestra el hidrograma y sedigráfico de la crecida del 31/12/98. El pico de sedimentos llega un poco antes que el pico de la crecida, y la curva de recesión de la concentración de sedimento es mucho más marcada que la del caudal. La concentración máxima durante esta crecida fue de 0,1 g/l y la carga total se ha estimado en 47,5 kg, valor probablemente subestimado dado que sólo se toman 24 muestras en cada crecida. En otros eventos la concentración ha llegado a 0,8 g/l. Sólo en un caso (noviembre de 1999) la concentración llegó a un valor muy alto, de 2,9 g/l, como consecuencia de la coincidencia de una crecida de baja magnitud y duración con trabajos agrícolas.

Hay que tener en cuenta que los campos de cultivo están bien conectados con el curso fluvial (Figura 2). La erosión es del orden de 1,3 kg/ha/año, valores menores que en el período previo de 1993-1994 cuando se llegó a los 7 kg/ha/año.

#### 5.4.2. Cuenca de Bosc

La concentración media estimada de sedimento en suspensión durante el período 1993-1994 fue de 5 kg/ha/año, mientras que en el período 1997-1999 las concentraciones fueron despreciables, si bien hay que tener presente que se poseen menos datos de esta estación durante este período.

## 6. Discusión

A pesar de la ocurrencia de precipitación durante todo el año, si bien con un descenso estival, la escorrentía superficial sólo empieza a finales de otoño o principios de invierno. Esto indica que las pérdidas de agua son importantes, y pueden relacionarse con la presencia de un bosque denso con un estrato arbustivo bien desarrollado y también a la existencia de suelos graníticos permeables. También resulta importante el impacto humano debido a la extracción de agua de los pozos durante la sequía estival. Estos factores, estacionalidad y pérdidas de agua naturales y antrópicas, determinan una baja aportación hídrica superficial anual de la cuenca, alimentada solamente por las crecidas que tienen lugar durante la estación fría, que apor-

tan el 80% del volumen total de agua en solamente un 20% del tiempo.

En cuanto al comportamiento hidrológico durante las crecidas, si bien la forma del hidrograma es similar en ambas cuencas, mostrando una respuesta rápida a la precipitación y también una recesión rápida, es decir un comportamiento típicamente torrencial. Pero mientras que los caudales pico y los volúmenes totales de escorrentía son mayores en la estación de Campàs, que drena una cuenca algo más extensa, el flujo de base en muchas ocasiones es superior en la cuenca forestal. Después de la sequía estival ambas cuencas responden con coeficientes de escorrentía bajos, que se incrementan progresivamente con el aumento de humedad del suelo con las lluvias de invierno. Inmediatamente después de la sequía estival la estación de Campàs tiene una respuesta mayor, pero esta dinámica se modifica y durante los eventos de invierno es la estación del Bosque la que tiene mayor respuesta.

Las condiciones de humedad del suelo antes de las crecidas, son el factor que determina la escorrentía total, directa y basal, el volumen total generado, el coeficiente de escorrentía y el caudal pico. Prueba de ello es que los valores obtenidos de caudal pico o de caudal base no son estadísticamente representativos dada la variedad de valores obtenidos para precipitaciones similares. Este hecho también marca el comportamiento hidrológico de otras cuencas aunque estén localizadas en ambientes muy diferentes, como la de Guadalperón en Extremadura (Ceballos y Schnabel, 1998), las de Vallcebre en el Pre-Pirineo (Gallart *et al.*, 1997), y la de Arás en el Pirineo Aragonés (Arnáez *et al.*, 1999).

La producción anual media de solutos se incrementa poco aguas abajo, siendo más notable durante las crecidas a pesar del efecto de dilución, y es similar a la de otras cuencas del Sistema Costero Catalán con predominio de usos forestales (Batalla y Sala, 1993), y del mismo orden de magnitud de los 6-7 kg/ha/año que mencionan Buckman y Brady (1991). Existen ligeras diferencias entre las cuencas en la composición química, que pueden ser achacadas por un lado a la litología, como la disminución que se da en *Campàs* de las concentraciones de sodio y el aumento del calcio magnesio y carbonatos, mientras que el incremento en esta

cuenca de las concentraciones de nitratos y sulfatos pueden relacionarse con la actividad agrícola.

La carga en suspensión refleja una erosión muy baja, con valores desde 1,3 kg/ha/año (*Bosc*) hasta 7 kg/ha/año (*Campàs*). El hecho de que el valor más bajo se dé en la cuenca *Bosc* se debe a que está totalmente forestada, con pocos caminos y baja actividad humana. El aumento (80%) aguas abajo del transporte de sedimento registrado en *Campàs* puede relacionarse con las prácticas agrícolas, la situación de los campos de cultivo a lo largo del curso fluvial y cercanos a la estación de aforos de dicha cuenca. También hay que señalar la importancia del papel de los caminos forestales (Ubeda *et al.*, 1998), los cuales a menudo se comportan como verdaderos arroyos que drenan directamente al curso fluvial, y son por tanto grandes productores de sedimentos en medios forestales (Reid y Dunne, 1984). En el balance de sedimentos de la riera de Arbúcies, Batalla y Sala (1996) atribuyen un 17% de la exportación total anual al impacto de los caminos forestales. De hecho, en *Campàs* incluso visualmente puede apreciarse una gran diferencia de color entre el tramo de río arriba de la desembocadura del camino y el de después de dicha desembocadura (Ubeda *et al.*, 1998). La máxima contribución de sedimentos se da al principio de la crecida y baja rápidamente, similar a la recesión del caudal pero de forma más marcada. Por otro lado, la variabilidad entre crecidas es grande, lo cual puede explicarse por un proceso de agotamiento del material disponible, hecho que ha sido descrito por diversos autores (Walling, 1974) y más recientemente en un medio Mediterráneo (Batalla y Sala, 1996). Y lo mismo ocurre a lo largo de las vertientes (Sala y Rubio, 2000).

Por otro lado, el hecho de que prevalezca la carga en disolución sobre la carga en suspensión es un rasgo común para el continente europeo (Meybeck, 1976).

## 7. Conclusiones

Las dos cuencas estudiadas muestran una secuencia mensual y diaria discontinua de la generación de escorrentía, que sólo aparece después de varios períodos lluviosos de otoño y sólo se mantiene hasta el fin del invierno. La respuesta hidro-

lógica a la precipitación es rápida en ambas cuencas, pero mientras una alcanza mayores caudales pico la otra, más pequeña y totalmente forestal, mantiene mayores caudales base. Mientras que la producción de solutos es similar en las dos cuencas, el sedimento en suspensión sólo es significativo en la cuenca que presenta actividad agrícola y abundancia de caminos forestales, lo que ilustra el papel relevante de los usos del suelo en los procesos de erosión.

### Agradecimientos

El inicio del trabajo y la instrumentación de las cuencas pudo llevarse a cabo gracias al proyecto europeo EV5V-0043. El mantenimiento de las estaciones hasta el presente ha sido posible gracias a la ayuda recibida del proyecto RESEL del Ministerio de Medio Ambiente. También ha contribuido a la continuidad de la investigación la ayuda recibida del proyecto HID97-0397.

### Referencias Bibliográficas

- Arnáez, J.; Martí-Bono, C.; Beguería, S.; Lorente, A.; Errea, M.P. & García Ruiz, J.M. (1999). Factores en la generación de crecidas en una cuenca de campos abandonados en el Pirineo Central Español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25, 7-24.
- Ávila, A. & Rodà, A.F. (1985). Variaciones del quimismo del arroyo durante las crecidas en una cuenca de encinar montano. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 1, 21-31.
- Ávila, A. & Rodà, A.F. (1988). Export of dissolved elements in an evergreen-oak forested watershed in the Montseny mountain (NE Spain). *Catena Supp.* 12, 1-12.
- Balash, J.C. & Castelltort, X. (1993). Pautas para la modelización con parámetros físicos del transporte de sedimentos en suspensión en una cuenca montañosa. *V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*. 2, 637-644.
- Batalla, R. & Sala, M. (1993). Balanç hidroquímic d'una conca granítica Mediterrània en estat seminatural. *Acta Geologica Hispanica*, 28, 1.
- Batalla, R.; Werritty, A. & Sala, M. (1995). Sediment budget focused on solid material transport in a sub-humid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphology*, 39, 2: 249-264.
- Batalla, R. & Sala, M. (1996). Impact of land use practices on the sediment yield of a partially disturbed Mediterranean catchment. *Zeitschrift für Geomorphology: Supp.* 107, 79-93.
- Buckman, J. & Brady, R. (1991). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Limusa, Mexico.
- Carson, M.A.; Taylor, C.H. & Grey, B.J. (1973). Sediment production in a small Appalachian watershed during spring runoff. The Eaton Basin, 1970-1972. *Canadian Journal of earth Sciences*, 1. 1707-1734.
- Ceballos, A. & Schnabel, S. (1998). Hydrological behaviour of a small catchment in the *dehesa* landuse system (Extremadura, SWSpain). *Journal of Hydrology*, 210, 146-160.
- Clotet, N.; Gallart, F. & Balash, J. C. (1988). Medium-term erosion rates in a small scarcely vegetated catchment in the Pyrenees. *Catena Supplent 13. Geomorphic processes*, II, 37-47.
- Diez, J.C.; Alvera, B.; Puigdefábregas, J. & Gallart, F. (1988). Assessing sediment sources in a small drainage basin above the timberline in the Pyrenees. *Proceedings of the Porto Alegre Symposium, IAHS, Publ.174*, 197-205.
- Douglas, I. (1967). Man, vegetation and sediment yields of rivers, *Nature*, 215, 925-928.
- Escarré, A.; Lledó, M.J.; Bellot, J.; Martín, J.; Esclapés, A.; Seva, E. & Sánchez, J.R. (1986). Balance hídrico, meteorización y erosión en una pequeña cuenca de encinar mediterráneo. *Proyecto LUCDEME, Serie Monografías de ICONA*, 47, 57-115.
- Farguell, J. & Sala, M. (en prensa). Magnitud y frecuencia de eventos en una pequeña cuenca experimental mediterránea: Riera de Vernegà, macizo de les Gavarres (Girona). *Actas VI Congreso Nacional de Geomorfología*, Madrid.
- Gallart, F.; Latron, J.; Llorens, P. & Rabada, D. (1997). Hydrological functioning of Mediterranean basins in Vallcebre, Catalonia: some challenges for hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 11, 1263-1272.
- García Ruiz, J.M., Lasanta, T. & Ruiz Flaño, P. (1995): Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the Central Spanish Pyrenees. *Physics and chemistry of the earth* 20 (3-4), 301.
- Hall, F.R. (1971). Dissolved solids-discharge relationships. 2, Applications to field data, *Water Resources Research*, 7, 591-601.
- Leopold, L.B.; Emmett, W.W. & Myrick, R.M. (1966). Channel and hillslope processes in a semi-arid area, New Mexico. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 352G, 193-253
- Llorens, P. & Gallart, F. (1992). Small Basin Response in a Mediterranean Mountainous Abandoned Farming Area: Research Design and Preliminary Results. *Catena*. 19: 309-320.
- Meyerbeck, M. (1976). Total dissolved transport in major world rivers. *Hydrological Science Bulletin*, 21, 265-284.
- Piñol, J.; Lledó, M.J. & Escarré, A. (1991). Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, north-east Spain), *Journal of Hydrological Sciences*, 36, 95-108.
- Reid, L. & Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research* 20 (11): 1753-1761.

- Sala, M. (1979). *L'organització de l'espai natural a les Gavarres*. Barcelona, Editorial Rafael Dalmau, 148 p.
- Sala, M.; Pernas, J.; Ubeda, X. & Batalla, R.J. (1994). Studying downstream influence of land use changes on runoff, solutes and sediment transport in a hilly Mediterranean coastal area. *Proceedings of the 3rd. Conference on Assessment of Hydrological Temporal Variability Changes. European Network of Experimental and Representative Basins (ERB)*, Barcelona, 179-187.
- Sala, M. & Rubio, C. (2000). Estudi i mesura de l'escolament i l'erosió en parcel·les experimentals al massís de les Gavarres. *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 68, 135-148.
- Sala, M.; Llorens, P. & Farguell, J. (2001). Runoff, storm runoff and water quality in two instrumented small catchments in the Catalan Coastal Ranges. *ERB2000 Proceedings*, Gent, Belgium.
- Schnabel, S. (1997). *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvo-pastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain*. Geoforma Ediciones. 160pp.
- Ubeda, X. (1994). Caracterització del sòl i quantificació del transport de sediment en un bosc mediterrani (les Gavarres, Massís Litoral Català), *Notes de Geografia Física*, 23, 31-38.
- Ubeda, X.; Reina, L. & Sala, M. (1998). Cuantificación de la erosión en un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. *Norba*, 10, 185-195.
- Walling, D.E. (1974). Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. En: Gregory, K.J. y Walling, D.E. (eds.) *Fluvial processes in instrumented watersheds*. Institute of British Geographers Special Publication, 6, 169-192.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1983). Patterns of sediment yield. In K.J. Gregory (ed.) *Background to Paleohydrology*. John Wiley and Sons, 69-100.

Recibido 24 de abril de 2001

Aceptado 6 de mayo de 2002