



## TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN UNA CUENCA MEDITERRÁNEA AGRÍCOLA

*Suspended sediment transport in a Mediterranean agricultural catchment*

Joan Estrany<sup>a\*</sup>, Celso García<sup>a</sup> y Ramón J. Batalla<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup>Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears,  
E-07122 Palma de Mallorca, Illes Balears

<sup>b</sup>Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, E-25918, Lleida, Catalunya

<sup>c</sup>Centre Tecnològic i Forestal de Catalunya, E-25240, Solsona, Catalunya

\*Autor al que se enviará la correspondencia. E-mail: joan.estrany@uib.cat. Fax 971 17 23 09

**Resumen:** Se analiza el transporte de sedimento en suspensión en una cuenca agrícola mediterránea de 1,03 km<sup>2</sup> en la isla de Mallorca durante 3 años hidrológicos mediante el registro continuo de la turbidez. La concentración media anual de sedimento en suspensión fue de 17,3 mg l<sup>-1</sup> con un máximo de 2.270 mg l<sup>-1</sup>. Los fuertes contrastes estacionales de la escorrentía base provocan diferentes grados de dilución causando una elevada dispersión en la CSS y en la regresión Q-CSS indicando que otros factores controlan el transporte de sedimento. Los modelos de regresión múltiple indican que la intensidad de precipitación es la variable que controla este aporte. Considerando que las intensidades de precipitación registradas durante el período de estudio son análogas a aquéllas registradas a largo plazo, la exportación de sedimento en suspensión fue un orden de magnitud inferior a la registrada en otras cuencas mediterráneas debido a la aplicación de prácticas de conservación del suelo.

**Palabras clave:** transporte de sedimento en suspensión; regresiones múltiples; magnitud y frecuencia; Mediterráneo; cuenca agrícola.

**Abstract:** The aim of this study is to analyze suspended sediment transport in a Mediterranean agricultural catchment under traditional soil and water conservation practices. Field measurements were conducted in Can Revull, a small catchment (1.03 km<sup>2</sup>) on the island of Mallorca. The mean annual precipitation is 517 mm. The hydrological regime is intermittent, with a mean annual discharge of 4.1 l s<sup>-1</sup>. This study analyses suspended sediment transport regime, interprets multiple regression models of total suspended sediment concentration (SSC) and of SSC related to storm-flow discharge (storm-SSC), and assesses sediment loads and yields based on 3 hydrological years of turbidity records (2004-2005, 2005-2006 and 2006-2007). Annual average SSC was 17.3 mg l<sup>-1</sup> with a maximum value of 2,270 mg l<sup>-1</sup> (recorded at the middle of the winter period when rainfall intensities are high and headwater slopes are ploughed and thus bare). Strong seasonal contrasts of baseflow dynamics associated with different degrees of dilution provide a large



Estrany, J., Gacía, C. y Batalla R. J. (2009). Transporte de sedimento en suspensión en una cuenca mediterránea agrícola. *Rev. C. & G.*, 23 (1-2), 9-28.

scatter in SSC and in the derived rating curves reflecting that factors other than discharge primarily control the supply of suspended sediment. Multiple regression models identify rainfall intensity as the most significant variable in sediment supply. However, when there is baseflow, physical and biological processes generate sediment in the channel which is easily removed during high flows. In contrast, when baseflow is not present, rainfall intensity is the only variable that supplies sediment to the channel mostly from slopes. Considering study period as average in terms of mean annual rainfall and related intensities, suspended sediment yields were an order of magnitude lower than other catchments in Mediterranean rivers caused by the historical implementation of soil conservation practices.

**Keywords:** Suspended-sediment transport; multiple regressions; magnitude and frequency; Mediterranean; agricultural catchment.

## 1. Introducción

Un número considerable de estudios sobre la dinámica y el transporte de sedimento han sido realizados en cuencas mediterráneas (e.g. Inbar, 1992; Batalla et al., 1995; Serrat, 1999; García Ruiz et al., 2000; Gallart et al., 2005; Achite y Ouillon, 2007). A pesar de que el número de trabajos es elevado, las investigaciones sobre transporte de sedimento en cuencas agrícolas han recibido poca atención, considerando que este uso del suelo representa uno de los factores de mayor efecto en los procesos de erosión (Douglas, 1993). Aunque es necesario establecer un balance integrado de sedimentos para conocer los procesos que actúan en la generación y transporte de sedimento en el conjunto de una cuenca (Dietrich y Dune, 1978; Trimble, 1983; Slaymaker, 2003; Walling y Collins, 2008), se debe valorar que la implementación de prácticas de conservación del suelo permite la reducción de la exportación de sedimento. En muchos casos, estas prácticas tienen como objetivo incrementar la capacidad de retención de humedad así como reducir los impactos que provoca la erosión en las laderas (*on-site impacts*) tales como la disminución de productividad de los suelos y de las cosechas (Walling, 2006). Estas técnicas tradicionales se han aplicado históricamente para proporcionar una protección efectiva de las tierras cultivadas, destacando los bancales y las albarradas en las zonas abruptas (Grimalt et al., 1992; Zgaier y Inbar, 2005) y los sistemas de drenaje subsuperficiales en las zonas llanas (Estrany et al., en revisión).

La exportación de sedimento en suspensión (a partir de ahora SS) representa la suma de los valo-

res de la erosión de todas aquellas zonas activas dentro de una cuenca de drenaje. Sin embargo, los valores de exportación de SS no pueden ser usados como un indicador fiable de la erosión en la cuenca de drenaje aguas arriba de una sección de control, ya que existen una serie de limitaciones relacionadas con el almacenamiento de sedimento y su origen heterogéneo (Walling y Collins, 2000).

Los valores de exportación de SS han sido calculados tradicionalmente a partir de las curvas de regresión establecidas entre la concentración de sedimento en suspensión (a partir de ahora CSS) y el caudal (a partir de ahora Q), basándose en la recogida de muestras infrecuentes para determinar la CSS. La disponibilidad de registros detallados de CSS proporcionados por la monitorización continua de la turbidez, además de permitir una notable mejora en el cálculo de la exportación del sedimento, ayuda a obtener un conocimiento detallado de los procesos activos de producción de SS en una cuenca de drenaje (Walling y Webb, 1987). Al mismo tiempo, en áreas con un fuerte contraste estacional –como el Mediterráneo– las curvas de regresión no pueden ser establecidas siempre entre el caudal y la CSS, hecho que sugiere que la energía del flujo no sea un factor predominante en el transporte de SS (Sutherland y Bryan, 1989). Por este motivo, algunos autores han evaluado las formas multivariantes incluyendo factores derivados de cada crecida (Walling, 1974; Richards y Moore, 2003; Seeger et al., 2004; Francke et al., 2008). Otros modelos han intentado mejorar la comprensión de la dinámica del transporte de SS usando técnicas como la de separación de los componentes del hidrograma y así poder establecer relaciones

entre la CSS y el caudal (Walling y Webb, 1982).

Este estudio investiga el transporte de SS en una cuenca representativa de las áreas dominadas por cultivos herbáceos de secano en regiones mediterráneas, así como el papel que ejercen las prácticas tradicionales de conservación del suelo en la producción y exportación de sedimentos. El principal objetivo es analizar el transporte de sedimento en suspensión teniendo en cuenta las variaciones hidrológicas a escala anual, estacional y a nivel de evento mediante (a) el análisis de los regímenes hidrológicos y de transporte de SS; (b) la interpretación de la CSS así como de la CSS relacionada con la escorrentía superficial a través de los modelos de regresión múltiple; y (c) la evaluación detallada de la producción y exportación de SS además de su magnitud y frecuencia.

## 2. Área de estudio

Un proyecto de investigación se está llevando a cabo en la cuenca del *torrent de na Borges* desde el

2004 con el objetivo de establecer un balance hidrológico y sedimentológico (Estrany y Garcia, 2005). En este contexto, se seleccionó una pequeña cuenca representativa de cabecera de 1 km<sup>2</sup> para analizar la dinámica hidrológica y sedimentológica así como la contribución de las subcuencas de cabecera al *torrent de na Borges*.

La acequia de Can Revull (102,6 ha) se sitúa en la zona central de la isla de Mallorca, concretamente en la comarca conocida con el nombre de Pla de Mallorca (Fig. 1). Se trata de una microcuenca que forma parte de la subcuenca del *torrent de Boscana* (7,91 km<sup>2</sup>) situada en la parte alta de la cuenca del *torrent de Na Borges* (Estrany y Garcia, 2004). Geológicamente se sitúa en los relieves alpinos estructurales de modelado suave que conforman las sierras Centrales de Mallorca y que se caracterizan por la presencia de turbiditas sinorogénicas (margas y calcarenitas) del Mioceno inferior, las cuales se encuentran discordantes sobre el resto de materiales mesozoicos y cenozoicos de la zona (Jenkins et al., 1990). Los cabalgamientos y pliegues de orientación aproximada N-S y despla-

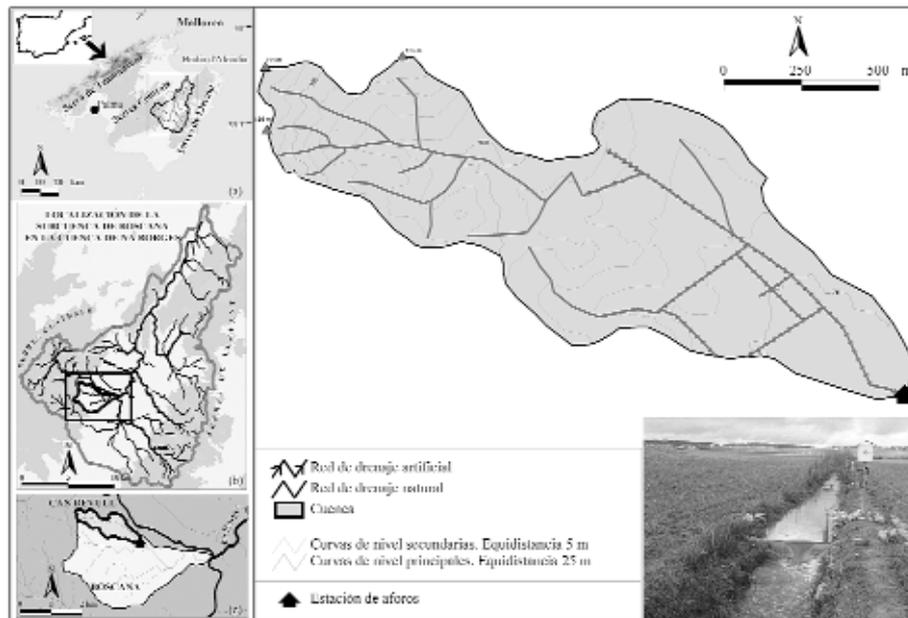


Figura 1. Mapa de la cuenca de Can Revull. Los mapas pequeños muestran: (a) Localización de Mallorca y la cuenca del torrent de Na Borges; (b) Localización de la cuenca de Boscana en la cuenca de Na Borges; (c) Localización de Can Revull en la sub-cuenca de Boscana. La fotografía muestra la estación de aforos con vistas aguas arriba.

Figure 1. Map of the Can Revull catchment. Small maps show: (a) Mallorca and Na Borges basin locations; (b) Boscana sub-basin location into Na Borges basin; (c) Can Revull location into Boscana basin. The photograph shows an upstream view of the measuring section.

zamiento o vergencia general hacia el oeste son las estructuras tectónicas que predominan en la zona (Silva et al., 2005). Las altitudes van desde los 144 m de la cabecera hasta los 70 m.s.n.m. en la estación de aforo. La longitud del canal principal es de 2,4 km. La pendiente media de la cuenca es del 3,8%, mientras que la pendiente media del canal es del 4,7%

El clima puede ser clasificado como Mediterráneo Subseco según Thornthwaite (1948), con una temperatura media anual de 16,5°C en la B-346 Porreres de la AEMET. La precipitación media anual durante el período 1974-2006 es de 517 mm mientras que durante el período de estudio (2004-2007) fue de 496 mm, en la estación pluviométrica B-614 Boscana Nou de la AEMET. La distribución estacional de la precipitación es Otoño>Invierno>Primavera>Verano, con un coeficiente de variación interanual del 23%. La principal característica de la precipitación son las tormentas de elevada intensidad que pueden sobrepasar los 100 mm en 24 horas en un período de retorno de 25 años (YACU, 2002). Durante el invierno, las advecciones del oeste con sistemas frontales asociados aportan lluvias generales y continuadas (Romero et al., 1998). Este patrón de precipitación hace que el régimen fluvial sea estacional, con presencia de caudal normalmente desde noviembre-diciembre hasta marzo-abril. El caudal medio diario anual durante el período de monitorización 2004-2007 fue de 4 l s<sup>-1</sup>. La evapotranspiración potencial media anual fue de 1.010 mm durante el citado período y se calculó siguiendo el método de Thornthwaite (1948).

Los suelos se caracterizan por su profundidad y buen desarrollo sobre sedimentos aluviales del Cuaternario, los cuales se disponen sobre las turbiditas impermeables del Mioceno inferior. Su textura es franco-arcillosa (Díaz Palmer et al., 2006), mostrando una elevada capacidad de campo y una elevada capacidad de intercambio catiónico que proporciona una importante reserva de nutrientes. Cabe destacar que los suelos arcillosos tienden a elevados puntos de marchitez que los hace resistentes al cultivo. Por tanto, la textura del suelo, la topografía cóncava y arreica de las zonas de llanura y unos inviernos muy húmedos son los principales factores que hacen necesaria la aplicación de una práctica tradicional de gestión agrícola como es la construcción de un sistema de drenaje subsu-

perficial, práctica iniciada en época romana y perfeccionada a lo largo de los siglos. Este sistema ocupa un 75% de la microcuenca. Los drenajes se sitúan a una profundidad aproximada de 1 m y se construyen a partir de la colocación de una o dos capas de losas de piedra recubiertas de materiales porosos. Esta estructura se dispone a lo largo de las vertientes en forma de espina de pez y con los laterales colocados en diagonal para acabar interceptando un drenaje principal en la parte baja de la vertiente hasta una acequia artificial donde se vierten las aguas.

De hecho, la conducción de este flujo subsuperficial se realiza mediante una red de acequias que siguen un patrón geométrico ortogonal (Fig. 1). En concreto, la cuenca de Can Revull se compone de una acequia principal que recibe las aguas de otras acequias tributarias que van recogiendo el flujo del drenaje subsuperficial. En total, se han contabilizado hasta 12 vertederos en la acequia principal.

En las áreas de mayor pendiente y topografía convexa se han construido bancales y albarradas (Grimalt y Rodríguez, 1997), unas prácticas de gestión del suelo que son históricas en la isla (Reynés y Riera, 1994) y que juegan un importantísimo papel en la prevención y reducción de la erosión del suelo. Ambas se localizan en su totalidad en la cabecera en áreas con una pendiente media del 6% y ocupan el 10,5% de la cuenca de drenaje.

Los cultivos herbáceos de secano son el principal uso del suelo (91%). Se localizan en las zonas llanas donde la pendiente media es del 1,98% además de estar mayoritariamente drenadas subsuperficialmente. Los principales cultivos son el trigo y el centeno, destacando además que tienen la mayor demanda hídrica durante los meses de abril y mayo (un 65%). Este hecho indica que estas especies están bien adaptadas a este tipo de suelo y condiciones climáticas. Los cultivos arbóreos de secano ocupan el 6,2% de la cuenca, la mayoría en zonas abancaladas situadas en la cabecera. Predomina el almendro y en segundo lugar el algarrobo. El 2,7% restante de suelo está ocupado por masas forestales como el encinar (*Quercion ilicis*) -alianza climática predominante en la isla de Mallorca- mientras que la garriga (*Oleo-Ceratonion*) es la alianza que ocupa aquellas zonas más secas y de suelos menos desarrollados (Bonner, 1994).

### 3. Métodos

#### 3.1. Trabajo de campo

En este artículo se aportan datos de una serie temporal comprendida entre octubre de 2004 y septiembre de 2007, totalizando 3 años hidrológicos. La estación de aforos fue construida en septiembre de 2003 a partir de una sección basada en un vertedero de pared delgada en forma de V de 90°. En diciembre de 2003 fue instrumentada con un acumulador de datos *Campbell Scientific CR10X* que recibe señales del nivel de la lámina de agua (sonda de presión *Druck PDCR-1830-3*) y de turbidez (turbidímetro auto-limpiable *McVan Analite NEP-9516-G* con un rango de lectura 0-1.600 NTU). Todo ello, de forma minutal, acumulando un dato cada quince minutos después de haber realizado una media aritmética de las señales minutales. Los datos fueron descargados semanalmente en un ordenador portátil para su posterior análisis. Entre el nivel de la lámina de agua y el caudal se estableció una curva de regresión siguiendo las formulaciones estándares fijadas por la *International Organization of Standards* (1980).

Adicionalmente, se instaló un muestreador de botellas por sifón con 7 botellas y 1 m de altura (Estrany y Garcia, 2005), para proporcionar más información sobre la dinámica de la CSS. Igualmente, se recogieron muestras manuales integradas en profundidad en la medida de lo posible durante los eventos y semanalmente durante caudales bajos. Las muestras se recogieron en la parte central del canal, en la misma sección donde se encuentran el turbidímetro y el muestreador de botellas. Algunos autores (p.e. Batalla, 1993) han encontrado diferencias significativas entre las muestras manuales y las del muestreador de botellas. En el caso de Can Revull las pequeñas dimensiones del canal (1 m x 1 m) y la observación directa de la turbulencia del flujo hacen que las diferencias espaciales de la CSS a lo largo de la sección se puedan considerar insignificantes.

Las muestras son analizadas en el laboratorio para determinar la concentración de sedimento en suspensión mediante el filtraje de 250 ml a través de un equipo de filtraje *Millipore*, modelo *Sterfil* y unos filtros de celulosa de 0,45  $\mu\text{m}$  *Schleicher* y *Schuell* previamente tarados.

Finalmente, se mide la precipitación y su intensidad mediante un pluviógrafo de cazoletas *Davis* conectado a un acumulador de datos modelo *HOBO H7 Logger* que registra incrementos de 0,2 mm de precipitación. Está ubicado en la estación de aforos a una altura de 1 m sobre el suelo.

#### 3.2. Computación y análisis de datos

##### 3.2.1. Determinación de la CSS

La turbidez ha sido usada exitosamente para investigar la dinámica del transporte de sedimento en suspensión (Gippel, 1995; Foster et al., 1992) y así mejorar la fiabilidad de las estimaciones del transporte (Walling, 1977; Lewis, 1996). Es necesario calibrar los valores proporcionados por el turbidímetro para poder relacionarlos con la concentración de sedimento en suspensión. Por ello, las muestras manuales y las del muestreador de botellas por sifón se han usado para crear una relación lineal entre la turbidez y la concentración de sedimento en suspensión a partir de 45 muestras ( $\text{CSS} [\text{mg l}^{-1}] = 0,93 \text{ NTU} + 8,67; r^2 = 0,98$ ).

##### 3.2.2. Relaciones multivariantes en la concentración del sedimento en suspensión (CSS)

Debido a la falta de capacidad de transporte, la exportación del SS está más influenciada por la disponibilidad de sedimento que por el caudal (Walling y Webb, 1987). Esta falta de capacidad y el fuerte contraste estacional de las cuencas mediterráneas (Inbar, 1992), da lugar a una baja significación de las curvas de regresión Q-CSS demostrando que son otros los factores que controlan el aporte de SS al canal. De este modo, la relación entre la CSS y el Q es compleja y multivariada en origen. Por tanto, la aplicación de un análisis multivariante debería aportar mayor significancia a la relación durante los eventos.

De este modo, para cada evento se seleccionaron aquellas variables independientes que fueron deducidas como importantes en el control de la movilización de sedimento durante una tormenta (Walling, 1974; Seeger et al. 2004; Zabaleta et al. 2007) y así introducirlas en un análisis multiva-

Tabla 1. Variables independientes usadas en la regresión múltiple por pasos para explicar la dinámica del transporte de sedimento en suspensión.

Table 1. Independent variables used in stepwise multiple regressions to explain suspended-sediment dynamics.

<b>Relaciones temporales entre la escorrentía y el sedimento en suspensión</b>	
<i>T sedimento</i>	Duración del evento de sedimento en suspensión (min)
<i>T inicio CSS</i>	Intervalo de tiempo entre el inicio de la tormenta y el inicio del transporte de SS (min)
<b>Variables de escorrentía</b>	
<i>Icree</i>	Índice de intensidad de crecida definido como (Q <sub>máx</sub> -Q <sub>precedente</sub> ) / Tiempo crecida
<b>Precipitación y variables derivadas</b>	
<i>IPmedia</i>	Intensidad de precipitación media (mm)
<i>IPmáx30'</i>	Intensidad de precipitación máxima en 30' (mm)

riante. Estas variables están relacionadas con la precipitación, la escorrentía y las relaciones temporales entre la escorrentía y la CSS (Tabla 1) y se dispusieron para 17 eventos de un solo pico y de 3 eventos multi-pico, que contenían 9 sub-eventos totalizando por tanto 26 eventos. La CSS media (CSS-media) fue definida como variable dependiente. Además, la media de CSS correspondiente a la escorrentía superficial (CSS-stormflow) también fue clasificada como variable dependiente ya que la dinámica de la escorrentía base ha sido identificada como característica teniendo en cuenta que a las peculiaridades topográficas y geológicas hay que añadir el drenaje subsuperficial artificial (Estrany et al., en revisión). Este hecho causa que el SS movilizado por la escorrentía superficial sea diluido. Por este motivo, se aplicó un modelo mixto simple que permitió separar la escorrentía superficial y el CSS correspondiente de la escorrentía total así como también de aquél relacionado a la escorrentía base (Walling y Webb, 1982; Carling, 1983).

Todas estas regresiones múltiples por pasos fueron desarrolladas a partir de la subdivisión de los datos teniendo en cuenta todos los eventos, la estación del año y según si el evento estaba compuesto de uno o diversos picos. En esta última subdivisión, se estableció el límite entre picos de los eventos multi-pico y sus variables asociadas en el caudal mínimo registrado entre picos. En referencia a la subdivisión estacional, cabe considerar que se ha hecho sólo teniendo en cuenta la estación seca y la húmeda debido a que el bajo número de eventos dificultaba la aplicación de las regresiones múltiples utilizando la división tradicional en cuatro estaciones. En este sentido, el invierno es el período húmedo que va de octubre a marzo (ambos incluidos) y el verano es el período seco definido entre abril y septiembre (ambos incluidos). Con el objetivo de proporcionar coherencia a la estructura de los resultados, éstos serán expuestos según esta división estacional, la cual fue aplicada a toda la serie de datos disponibles.

El análisis de correlaciones de *Pearson* fue

Tabla 2. Matriz de correlación de Pearson entre los parámetros calculados. Los coeficientes en negrita son significativos a un nivel de 0,01 y en itálica a un nivel de 0,05 para n=26.

Table 2. Pearson correlation matrix between calculated parameters. Coefficients in bold are significant at the 0.01 level and coefficients in italics at the 0.05 level with n=26.

	<i>T sedimento</i>	<i>T inicio SSC</i>	<i>Icree</i>	<i>IPmáx30'</i>	<i>IPmedia</i>	<i>CSS-stormflow</i>	<i>CSS-media</i>
T sedimento	1	0.09	0.07	0.19	0.15	0.22	0.32
T inicio SSC		1	-0.04	-0.18	-0.21	-0.19	-0.20
Icree			1	0.32	0.24	<b>0.62</b>	<b>0.64</b>
IPmáx30'				1	<b>0.96</b>	<b>0.81</b>	<b>0.81</b>
IPmedia					1	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>
CSS-stormflow						1	<b>0.97</b>
CSS-media							1

aplicado para evaluar la magnitud de las relaciones entre variables (Tabla 2). Se encontró una fuerte correlación entre las variables de precipitación, la intensidad de crecida y las variables de SS, hecho que permitió la aplicación de diversas regresiones múltiples por pasos y así analizar los patrones de transporte de SS durante los eventos utilizando el paquete estadístico *SPSS*. Con la probabilidad de un valor menor de *F* en cada paso se van descartando las variables independientes. Así, se usó un nivel *F* del 5%. Por tanto, las variables ya introducidas en la ecuación de regresión fueron eliminadas si su probabilidad *F* era suficientemente elevada. El método acaba cuando ninguna otra variable no es susceptible de ser incluida o eliminada. La influencia exacta de cada una de estas variables fue medida a través de los coeficientes  $\beta$ . Estos coeficientes son parámetros dimensionales y miden el efecto de una variable independiente particular sobre la variación de la variable dependiente *y*, como son dimensionales, pueden ser directamente comparadas (Gregory y Walling, 1973).

### 3.2.3. Exportación de sedimento en suspensión

La producción de sedimento en suspensión de la cuenca (*sediment yield*) se calculó la exportación de SS a partir de la integración de los valores quinceminutales de CSS derivados de los registros de turbidez con los valores quinceminutales de caudal extraídos de la estación de aforos a partir de:

$$L = \sum_{i=1}^n C_i Q_i \quad (1)$$

donde *L* es la exportación de SS (kg),  $C_i$  es la CSS (mg l<sup>-1</sup>) y  $Q_i$  es el caudal (l s<sup>-1</sup>) acumulado a lo largo de todo el período de monitorización, *n*.

## 4. Resultados

### 4.1. Régimen del transporte del sedimento en suspensión

La magnitud de la CSS de un curso fluvial está muy relacionada con la magnitud del sedimento en suspensión producida en su cuenca de drenaje. El volumen de escorrentía también ejercerá un control importante ya que la media de concentración repre-

senta la carga anual dividida por el volumen de escorrentía anual (Walling, 1996). La figura 2 y la tabla 3 informan sobre los valores quinceminutales de caudal y CSS durante el período de estudio así como también de las curvas de duración y frecuencia para estos valores.

Considerando que el canal estuvo seco durante el 67,9% del período de estudio (Estrany et al., en revisión), las estadísticas de SS sólo fueron calculadas cuando la escorrentía estuvo presente. Los datos fueron segregados en las siguientes subdivisiones para proporcionar una mejor lectura del comportamiento de la CSS:

- Período de estudio. La media de la CSS fue de 17,3 mg l<sup>-1</sup>. Las concentraciones permanecieron por debajo de 14 mg l<sup>-1</sup> al menos un 65% del período de estudio y superaron los 100 mg l<sup>-1</sup> sólo el 0,63% del tiempo. Aunque las concentraciones máximas oscilaron normalmente entre 100 y 500 mg l<sup>-1</sup>, el pico máximo fue de 2.270 mg l<sup>-1</sup>, el cual se registró en diciembre cuando las intensidades de la precipitación aún eran elevadas y las vertientes de cabecera estaban labradas y por tanto desprovistas de vegetación. Con estas condiciones, un volumen importante de sedimento estaba disponible para ser movilizado. Por ende, se debe considerar que la variabilidad de la CSS fue muy elevada, tal y como indica el coeficiente de variación anual (307%), el cual es bastante superior al registrado en otras cuencas mediterráneas (Batalla y Sala, 1994; Gallart et al., 2005; Farguell, 2005). Estos fuertes contrastes estacionales se asocian a diferencias en la dinámica estacional de la escorrentía base (Tabla 3b), provocando diferentes efectos dilución según la estación. A resultas, el invierno presentó caudal durante el 55,2% del tiempo y un coeficiente de variación más bajo (280%) debido a que los importantes volúmenes de agua libre de sedimento procedentes del sistema de drenaje subsuperficial causaron la dilución y estabilidad de la CSS. En cambio, el verano exhibió el coeficiente de variación más elevado (361%), justo cuando el caudal sólo estuvo presente el 9,6% del tiempo y con un comportamiento muy variado de la escorrentía base (Estrany et al., en revisión).

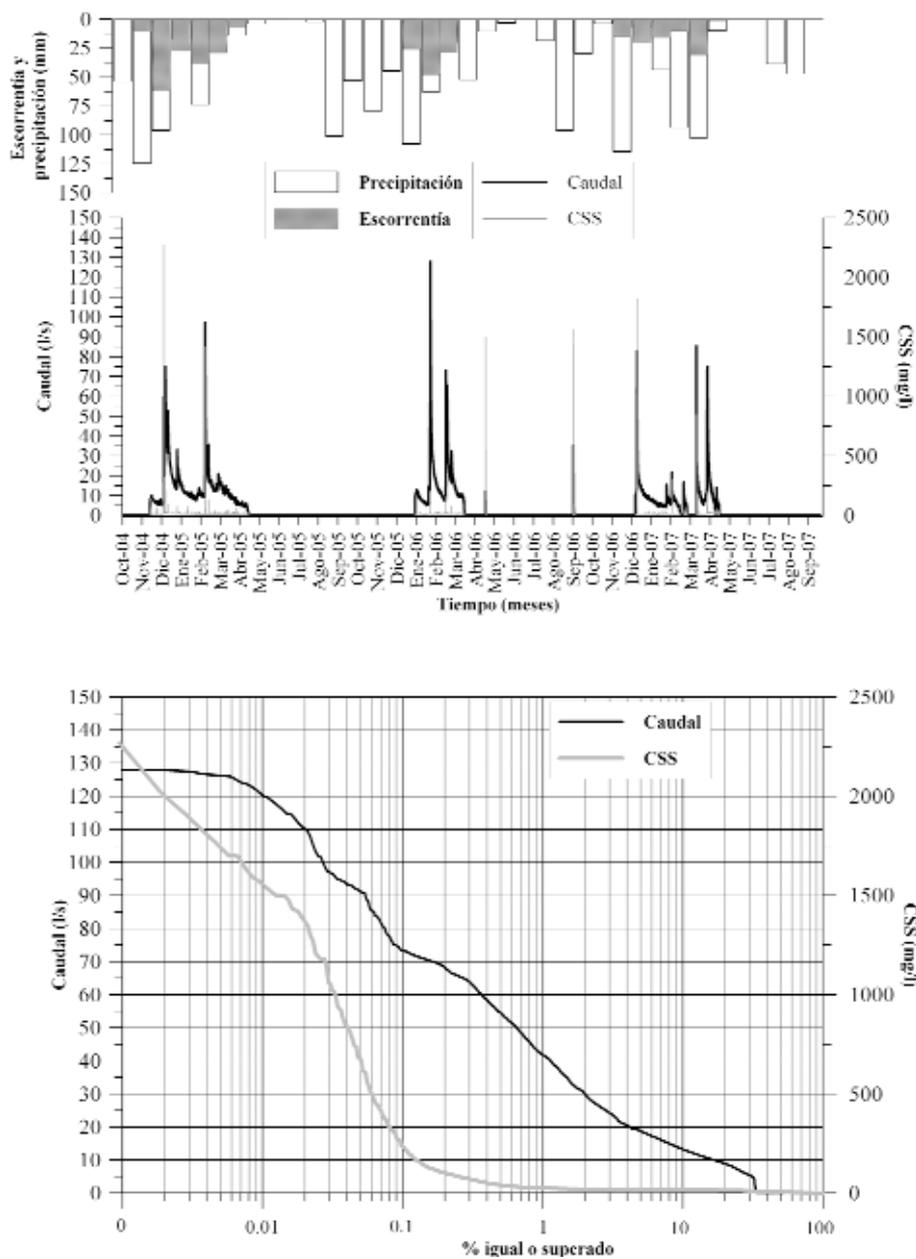


Figura 2. (a) Caudal y CSS basados en las lecturas quinceminutales; los histogramas ilustran la precipitación y la escorrentía mensuales durante el período de estudio (2004-2007) y (b) curvas de duración de caudal y CSS durante el período de estudio (2004-2007).

Figure 2. (a) Discharge and SSC based on 15 minutes readings; histogram shows monthly rainfall and runoff during the period studied (2004-2007) and (b) Flow and sediment concentration duration curves during studied period (2004-2007).

- Subdivisión anual. Con una precipitación media anual durante el período 1974-2006 de 517 mm, un coeficiente de variación del

22,7%, los tres años estudiados (2004-2007) se pueden considerar en la media (496 mm). Se debe destacar que la relación simple entre

Tabla 3. Estadísticas básicas de los valores generales y estacionales de CSS durante el período de estudio 2004-2007.  
 Table 3. Basic statistics for general and seasonal SSC values during studied years 2004-2007.

(a)

Período de estudio 2004-2007			
	<i>Total</i>	<i>Invierno</i>	<i>Verano</i>
Concentración media (mg l <sup>-1</sup> )	17	16	23
Desviación estándar	53	46	84
Concentración máxima (mg l <sup>-1</sup> )	2,270	2,270	1,632
Coefficiente de Variación (%)	307	280	361
Escorrentía relativa (%)	32.4	55.2	9.6

(b)

Estaciones	2004-05				2005-06				2006-07			
	<i>Precipitación</i> mm	<i>Escorrentía</i> %	<i>CSS</i> <i>media</i> mg l <sup>-1</sup>	<i>CSS</i> <i>máxima</i> mg l <sup>-1</sup>	<i>Precipitación</i> mm	<i>Escorrentía</i> %	<i>CSS</i> <i>media</i> mg l <sup>-1</sup>	<i>CSS</i> <i>máxima</i> mg l <sup>-1</sup>	<i>Precipitación</i> mm	<i>Escorrentía</i> %	<i>CSS</i> <i>media</i> mg l <sup>-1</sup>	<i>CSS</i> <i>máxima</i> mg l <sup>-1</sup>
<b>Invierno</b>	380	76,4	16,9	2.270	366	43,6	14,7	162	274	45,7	16,9	1.821
<b>Verano</b>	72	9,9	13,7	31	169	1,6	152,0	1.632	226	17,3	17,0	199
<b>Anual</b>	<b>452</b>	<b>43,0</b>	<b>16,5</b>	<b>2.270</b>	<b>535</b>	<b>22,5</b>	<b>19,4</b>	<b>1.632</b>	<b>501</b>	<b>31,4</b>	<b>17,0</b>	<b>1.821</b>

precipitación y escorrentía es muy pobre debido a la diversidad de escenarios evapotranspirativos. De este modo, más precipitación no implica más escorrentía debido a que la ETP es la principal variable en el control hidrológico de la cuenca (Estrany et al., en revisión), provocando que haya importantes diferencias interanuales en los valores de escorrentía relativos (Tabla 3b). Así, el año 2004-2005 presentó caudal el 43% del tiempo debido a que la mayoría de la precipitación se acumuló durante el invierno. Contrariamente, los otros años hidrológicos presentaron valores relativos menores de escorrentía ya que se acumuló comparativamente más lluvia durante el verano. Los valores medios anuales de CSS presentan un comportamiento inverso al de los valores relativos de escorrentía. Por tanto, cuando hubo más presencia de caudal –el año 2004-2005– la media de la CSS fue la más baja (16,5 mg l<sup>-1</sup>) mientras que durante el año 2005-2006 se registró la media de CSS más elevada (19,4 mg l<sup>-1</sup>) justo cuando el caudal estuvo menos presente.

- Subdivisión estacional. Los valores relativos de escorrentía también muestran una importante dispersión durante el invierno debido a las fluctuaciones hidroclimáticas intra-anuales, aunque la CSS media durante los invier-

nos estudiados fue muy similar debido a los volúmenes significativos de agua libre de sedimento procedente del sistema de drenaje subsuperficial que diluye y estabiliza la CSS. Destaca la media del invierno del año 2005-2006, que fue la más baja (14,7 mg l<sup>-1</sup>) debido a que los principales eventos ocurrieron en enero cuando las vertientes de cabecera están ya cubiertas por los cultivos herbáceos en crecimiento y la intensidad de la precipitación es menor que en diciembre. Además, estos factores causaron que la máxima CSS fuera de un orden de magnitud inferior a los valores máximos ocurridos en los otros inviernos. En cambio, los valores medios de CSS durante el verano presentan una importante dispersión causada por la variedad de escenarios de escorrentía base tal y como demuestran los valores relativos de escorrentía estacional. El año 2004-2005 exhibió el valor medio más bajo (13,7 mg l<sup>-1</sup>) debido a que la dinámica de escorrentía base dominó durante el 9,9% del tiempo en que la escorrentía estuvo presente justo al inicio de la estación con un máximo de sólo 31 mg l<sup>-1</sup>. El verano del 2006-2007 presentó el valor relativo de escorrentía estacional más elevado debido a que se acumularon importantes cantidades de lluvia en la primera mitad del período con diversos eventos

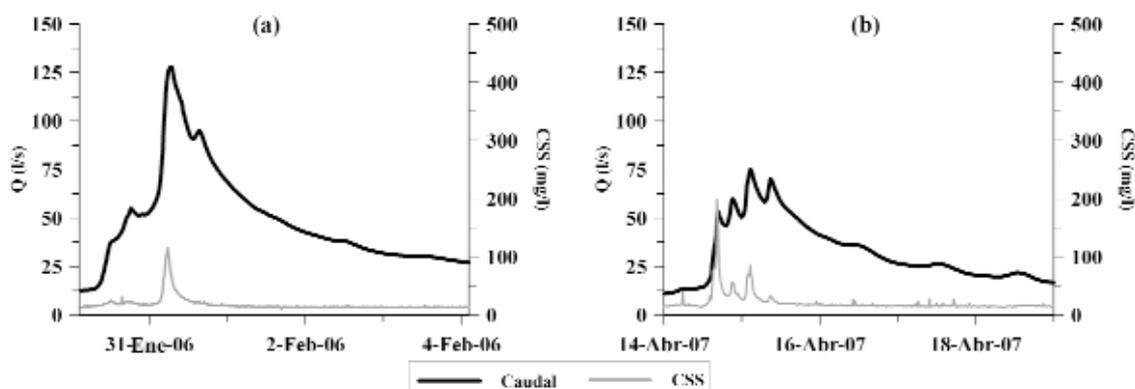


Figura 3. Ejemplos de crecidas (a) con pico individual y (b) multi-pico.  
 Figure 3. Examples of (a) single-peak and (b) multi-peak events.

que aportaron grandes volúmenes de reserva disponible para la escorrentía base, causando que el valor medio de la CSS fuese muy similar a los valores invernales. Además, la CSS máxima fue también muy baja –teniendo en cuenta los importantes volúmenes y elevadas intensidades de precipitación registradas– debido a que los cultivos herbáceos estaban en un avanzado estado de crecimiento. Contrariamente, el verano del 2005-2006 registró el valor medio de CSS más elevado (152,0 mg l<sup>-1</sup>) al predominar la dinámica de escorrentía superficial a través de 2 crecidas espasmódicas cuando la escorrentía base estaba ya agotada y la cosecha de cereales finalizada.

#### 4.2. Relaciones multivariantes en la concentración del sedimento en suspensión durante eventos

El caudal y la CSS mostraron una importante falta de correlación reflejada en la dispersión de las curvas de regresión aun segregando los datos en rama ascendente-descendente (Hall, 1967; Walling y Webb, 1983; Batalla y Sala, 1994), estacionalmente o aplicando diversas técnicas de corrección del sesgo (Dickinson, 1981; Ferguson, 1987; Asselman, 2000). Con todo, deben ser otros los factores que controlan el suministro de sedimento al canal por lo que un análisis multivariante debería mejorar la comprensión de los mecanismos que controlan este proceso.

Por tanto, la explicación de los procesos de transporte de SS durante los eventos fue mejorada significativamente a través de las ecuaciones de regresión múltiple. De esta forma, si el caudal únicamente explicaba un máximo del 20% de la varianza del SS, las variables de regresión múltiple alcanzaron niveles de explicación de la varianza del SS entre el 83 y el 99%. La tabla 4 muestra las ecuaciones y los valores del coeficiente  $\beta$  que permitieron interpretar los procesos involucrados en el suministro de sedimento al canal durante eventos. Posteriormente, la CSS-media y la CSS-stormflow fueron comparadas a través de los coeficientes  $\beta$  teniendo en cuenta todas las subdivisiones realizadas en el conjunto total de datos:

- Ecuaciones del período de estudio. La intensidad de la precipitación media ( $I_{prec}$ ) fue la variable más significativa, tanto para la CSS-media como para la CSS-stormflow. Sin embargo, fue más importante a la CSS-stormflow ( $\beta=0,732$ ) que a la CSS-media ( $\beta=0,697$ ) ya que la  $I_{prec}$  juega un papel muy importante en la movilización de SS por parte de la escorrentía directa, la cual es generada principalmente en las vertientes. La intensidad de crecida ( $I_{crec}$ ) es la segunda variable más significativa (ver la tabla 1 para tener más detalles sobre su cálculo). En este caso, sólo un tanto más influyente en la CSS-media ( $\beta=0,493$ ) que en la CSS-stormflow ( $\beta=0,447$ ). El lavado del canal por parte de caudales elevados está directamente relacionado con la  $I_{crec}$ . En

Tabla 4. (a) Ecuaciones derivadas para la CSS-media y para la CSS-stormflow aplicando la técnica de la regresión múltiple por pasos y (b) los coeficientes  $\beta$  derivados.

Table 4. Derived equations for SSC and storm-SSC applying the stepwise multiple regression technique and subsequent  $\beta$  coefficients.

(a)

<b>Variables dependientes</b>				
<b>CSS-media</b>		<b>CSS-stormflow</b>		
<i>Subdivisión</i>	<i>Ecuación</i>	<i>R<sup>2</sup> ajustado</i>	<i>Ecuación</i>	<i>R<sup>2</sup> ajustado</i>
<i>General</i>	$-105.622+0.095X_1+2754.326X_3+11.493X_5$	0,901	$-170.738+6262.596X_3+31.191X_5$	0,880
<i>Invierno</i>	$-97.207+0.076X_1+2329.822X_3+16.147X_5$	0,959	$-239.237+0.143X_1+3928.361X_3+49.245X_5$	0,974
<i>Verano</i>	$22.325+9.649X_5$	0,833	$81.386-0.595X_1+31.154X_4$	0,996
<i>Pico</i>	$-126.181+0.105X_1+2872.609X_3+11.571X_6$	0,926	$-184.591+6933.951X_3+30.712X_5$	0,899
<i>Multi-pico</i>	$-58.194+1.073X_2+13.705X_4$	0,974	$-130.246+2.124X_2+24.578X_4$	0,959

(b)

<b>Coefficientes <math>\beta</math></b> <i>Variables Independientes</i>	<i>General</i>		<i>Invierno</i>		<i>Verano</i>		<i>Pico</i>		<i>Multi-pico</i>	
	CSS media	CSS stormflow	CSS media	CSS stormflow	CSS media	CSS stormflow	CSS media	CSS stormflow	CSS media	CSS stormflow
$X_1$ : Duración del evento de SS (min)	0,256	-	0,144	0,110	-	-0,405	0,236	-	-	-
$X_2$ : Intervalo de tiempo entre el inicio de la tormenta y el inicio del transporte de SS (min)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,496	0,525
$X_3$ : Índice de intensidad de la crecida	0,493	0,447	0,426	0,293	-	-	0,523	0,481	-	-
$X_4$ : Intensidad máxima de precipitación en 30' (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,734	0,704
$X_5$ : Intensidad de precipitación media (mm)	0,697	0,732	0,576	0,717	0,926	1,065	0,686	0,716	-	-

este sentido, cuando la escorrentía base está presente durante un período largo de tiempo, se producen diversidad de procesos físicos y biológicos dentro del canal que provocan un incremento del almacenamiento de sedimento disponible que será fácilmente removido por estos procesos de lavado relacionados con la  $I_{crec}$  (Imeson, 1977; Walling y Webb, 1982; Carling, 1983). No obstante, durante el verano el sellado y acorazamiento son los procesos más comunes que reducen la disponibilidad de sedimento en el canal (Zhu et al., 1999). Finalmente, la duración del evento de SS fue significativa en la ecuación de la CSS-media ya que el número de eventos de invierno fue superior a los de verano. Además, la duración de los eventos veraniegos fue más corta que la de los invernales debido a que las tormentas de elevada intensidad que se producen en el verano son de corta duración, además de la ausencia de escorrentía base.

- Ecuaciones estacionales. Como los parámetros físicos controlan el suministro de SS al canal de diversas formas tanto durante los períodos secos como en los húmedos, las ecuaciones estacionales deberían evidenciar

mejor estos procesos. Así, la  $I_{prec}$  vuelve a ser la variable más influyente durante el invierno y el verano, tanto para la CSS-media como para la CSS-stormflow. De todos modos, fue más importante en la CSS-stormflow que en la CSS-media como ya ha sido descrito en las ecuaciones generales. Un análisis más detallado muestra como la  $I_{prec}$  es más significativa durante el verano al predominar intensidades de precipitación elevadas asociadas a sistemas convectivos, mientras que en invierno domina la lluvia extensa y continuada vinculada a sistemas frontales (Romero, 2001). La  $I_{crec}$  también controla la CSS-media y la CSS-stormflow durante el invierno, mientras que en verano no es importante debido a la falta de flujo en el canal. Inversamente a las ecuaciones generales, los coeficientes  $\beta$  de la  $I_{crec}$  durante el invierno son claramente diferentes entre la CSS-media ( $\beta=0,426$ ) y la CSS-stormflow ( $\beta=0,293$ ), ya que la  $I_{crec}$  es una variable directamente relacionada con la energía hidráulica del canal, la cual provoca el lavado del sedimento generado por procesos físicos y biológicos y que es almacenado en el canal durante los períodos en que la escorren-

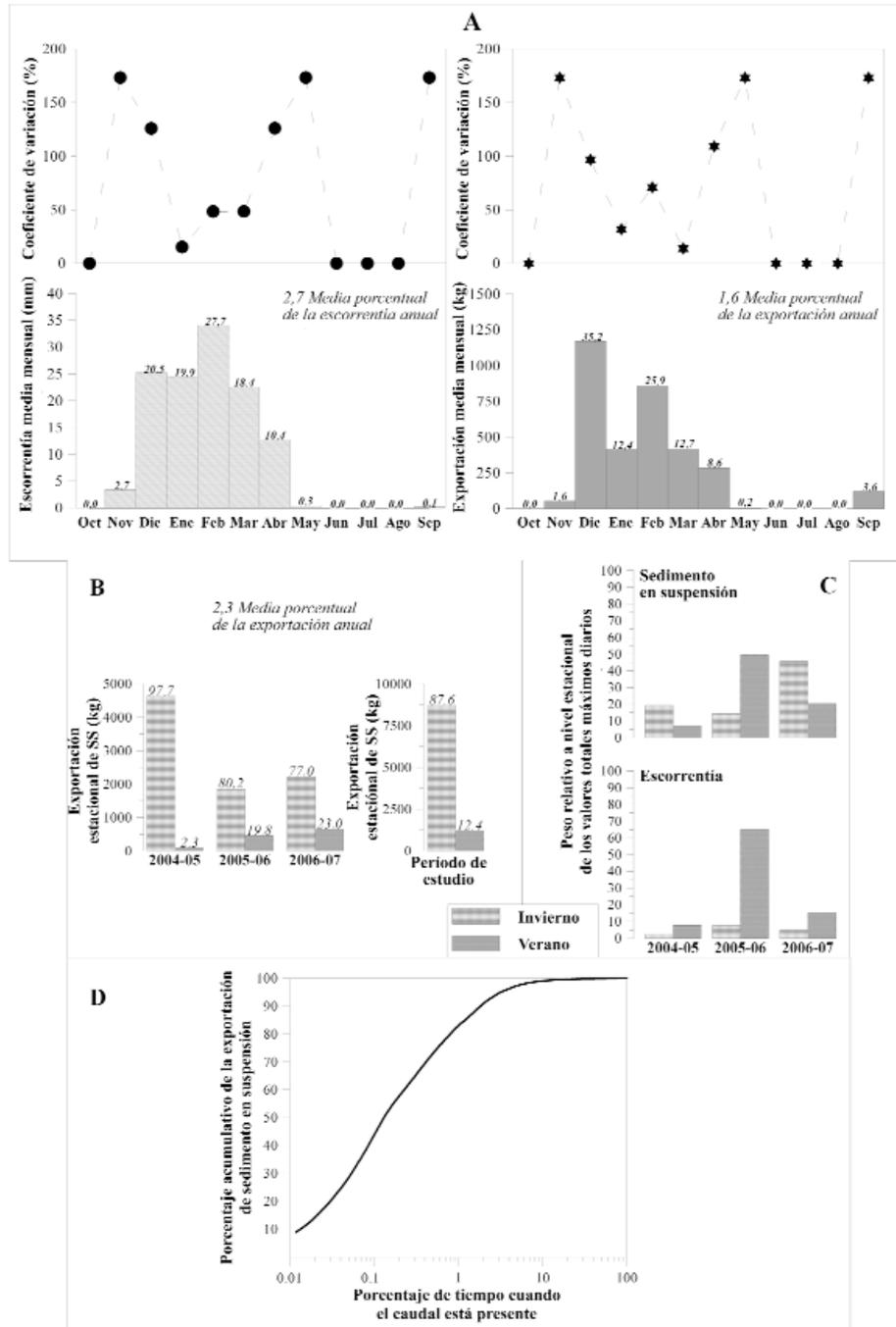


Figura 4. Evaluación de la exportación de SS durante el período de estudio (2004-2007): (a) Exportación media mensual de escorrentía y SS así como los valores de los coeficientes de variación respectivos; (b) Importancia relativa de la exportación estacional de SS para cada año hidrológico y de todo el período de estudio; (c) Importancia relativa estacional de la escorrentía y exportación de SS máximos diarios; (d) Curva de duración acumulativa de exportación de SS.

Figure 4. Sediment load assessment during the period studied (2004-2007): (a) Average monthly yields of runoff and suspended sediment and associated coefficient of variation values; (b) Relative importance of seasonal suspended sediment load for each water year and average period; (c) Seasonal relative importance of maximum daily runoff and sediment load; (d) Cumulative sediment load duration curve.

tía base está presente de manera continuada, sobretodo durante el invierno. Finalmente, la duración del evento de SS fue significativa sólo para la CSS-stormflow durante el verano ( $\beta=-0,405$ ) denotando que un incremento de la duración del evento está asociado a una disminución de la CSS-stormflow, ya que cuando el evento dura más implica la presencia de un período de recesión que genera escorrentía base y que provoca un efecto dilución.

- Ecuaciones de evento con pico individual o multi-pico. La figura 3 muestra un ejemplo de evento con pico individual y otro de evento multi-pico. Los eventos multi-pico se producen cuando la ciclogénesis mediterránea genera sistemas de bajas presiones con frentes asociados de lluvia continuada y extensa que se van sucediendo (Romero, 2001). Por otro lado, los eventos con pico individual están relacionados a otras condiciones sinópticas como sistemas convectivos o sistemas frontales atlánticos. Las ecuaciones de evento con pico individual muestran una dinámica de SS muy parecida a la de las ecuaciones generales ya que un 77% de los eventos son de pico individual. En cambio, las ecuaciones de evento multi-pico muestran un patrón muy diferenciado. La  $I_{prec}$  continúa siendo la variable más significativa mediante la intensidad de precipitación máxima en 30'; mientras que la  $I_{crec}$  es reemplazada ya que el primer pico fue considerado como un evento con pico individual. Por tanto, los procesos de lavado relacionados con la  $I_{crec}$  no tienen lugar, haciendo que la relación temporal entre la precipitación y el SS sea la segunda variable más significativa, revelando que la CSS se incrementa cuando el desfase entre el inicio de la tormenta y el inicio del transporte de SS es más largo.

#### 4.3. Exportación de sedimento en suspensión

La figura 4 y la tabla 5 resumen los valores de exportación y producción de SS durante el período de estudio, estacionalmente y para cada año hidrológico así como la curva de duración y frecuencia. En consecuencia, estos valores son comparados a continuación:

- Período de estudio. La exportación de SS se estimó en 9.962 kg, mostrando un elevado grado de variabilidad interanual. Así, un 47,7% se exportó durante el primer año y un 52,3% el resto del período de estudio, tal y como ha sido demostrado por otros autores en cuencas mediterráneas (Rovira et al., 2005; Farguell, 2005). Esta exportación supuso una producción media anual de 3,1 t km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. La falta de estudios de transporte de sedimento en cuencas agrícolas mediterráneas dificulta cualquier intento de comparación de las tasas de producción. En cambio, si se considera que el uso de suelo es probablemente el factor de control dominante de los flujos de SS en áreas llanas, contrariamente a lo que sucede en regiones montañosas donde los procesos naturales continúan dominando (Syvitski, 2003), la roturación de tierras en estas áreas de relieves suaves debería incrementar las tasas de producción de sedimento en más de un orden de magnitud (Douglas, 1993). Además, es un efecto que se incrementa cuanto más pequeña sea el área de drenaje ya que las cuencas de menor superficie tienen una mayor capacidad de respuesta hidrológica además de una menor capacidad de almacenamiento de los sedimentos erosionados (Milliman y Syvitski, 1992). Estos factores condicionantes deberían ilustrar unas tasas de producción de sedimento elevadas ya que Can Revull drena un área de sólo 1 km<sup>2</sup> predominando además los usos agrícolas. Sin embargo, las tasas de producción de sedimento fueron mucho menores si se comparan con aquellas calculadas en otras cuencas de clima mediterráneo (Milliman y Mead, 1983; Inbar, 1992; Walling y Webb, 1996; Batalla et al., 2005a; Batalla et al., 2005b; Achite y Ouillon, 2007), incluso en cuencas forestales (García-Ruíz et al., 1995; Zabaleta, 2007). Este hecho puede ser relacionado con una combinación de diversos factores. El primero de ellos está relacionado con aquellas áreas de mayor pendiente y de topografía convexa que han sido modificadas históricamente por la construcción de estructuras de retención para evitar la erosión tales como bancales y albarrañas. El segundo factor está relacionado con las áreas llanas que son ocupadas mayoritariamente por cultivos herbáceos de secano, culti-



Figura 5. Cárcavas efímeras formadas al inicio del período invernal en la zona de cabecera.  
*Figure 5. Ephemeral rills formed at the beginning of winter period.*

vos que están asociados inicialmente con tasas de erosión elevadas (Kosmas et al., 1997). Pero, en las áreas llanas de Can Revull, la conectividad entre las vertientes y el canal es prácticamente nula porque la acequia se construyó por encima del tálveg natural además del claro predominio de la arreicidad con formas topográficas cóncavas. Ambos factores provocan que el sedimento no sea transferido a los canales.

- División mensual y estacional. La figura 4A muestra la exportación media mensual de SS y de la escorrentía durante el período de estudio además de los coeficientes de variación. Las formas generales de la exportación de SS y de la escorrentía muestran algunas diferencias significativas. Así, la exportación máxima de SS se produjo en diciembre cuando el sedimento disponible en las vertientes labradas de cabecera es movilizado (Fig.5). En enero, el Mediterráneo occidental se encuentra normalmente bajo la influencia de altas presiones frías que estabilizan el tiempo. Así, la exportación de sedimento en enero fue unas tres veces menor que en diciembre, mientras que la escorrentía fue prácticamente la misma gracias al predominio de la escorrentía base

reforzada por el sistema de drenaje subsuperficial. En febrero, la retirada de las altas presiones frías da paso a situaciones sinópticas que permiten la acumulación de más lluvia incrementando la ya elevada escorrentía base mantenida gracias a los bajos valores de ETP diarios ( $<2$  mm). En consecuencia, febrero registra el máximo mensual de escorrentía. En cambio, el transporte de SS fue menor que en diciembre evidenciando un agotamiento del sedimento movilizado en las vertientes durante diciembre, añadiendo que la cobertura vegetal de estas vertientes ya es mucho mayor por el crecimiento de los cultivos herbáceos. Además, en febrero la movilización de sedimento en el canal es destacable gracias a los procesos de lavado vinculados a la generación física y biológica de sedimento relacionada con la presencia continuada de escorrentía base. El régimen anual de la exportación de SS es análogo al de escorrentía. Así, el período comprendido entre diciembre y febrero supone el 73% del transporte de SS anual y el 68% de la escorrentía anual. Contrariamente, durante los meses de verano el transporte de SS queda limitado y menos del 13% de la exportación anual de SS se transfiere

Tabla 5. Exportación, tasas de producción de sedimento en suspensión y escorrentía durante el período de estudio 2004-2007.  
*Table 5. Sediment loads and yields and runoff during study period 2004-2007.*

Año	Exportación (kg)	Tasa producción (t km <sup>2</sup> año <sup>-1</sup> )	Escorrentía (mm)
2004-05	4.753,3	4,5	173,3
2005-06	2.325,9	2,2	102,8
2006-07	2.883,3	2,7	92,7
<b>Media período</b>	<b>3.320,8</b>	<b>3,1</b>	<b>122,9</b>

durante el período de 6 meses comprendido entre abril y septiembre (ambos inclusive). En ambientes húmedos templados, la escorrentía es relativamente más importante que la exportación de SS durante el verano (Walling y Webb, 1982). En cambio, en Can Revull la escorrentía estival representa menos del 11% de la escorrentía anual ya que el comportamiento efímero es predominante. La analogía de estos regímenes se basa en unos coeficientes de variación muy similares de los valores derivados del promedio mensual de la exportación de SS y de la escorrentía. La figura 4B muestra la exportación de SS estacionalmente durante cada año hidrológico estudiado reforzando la comparación mensual expuesta anteriormente. Para todo el período de estudio, durante el invierno se exportó un 87,6% del SS y en verano el 12,4%. Cabe reseñar que existen diferencias entre los años hidrológicos estudiados en los valores estacionales de exportación de SS. Durante el año 2004-2005, un 97,7% de la exportación se concentró durante el invierno debido a que la mayoría de la precipitación se acumuló a mediados de esta estación considerando que las intensidades de precipitación eran aún notables y las vertientes de cabecera estaban labradas y por tanto desprovistas de vegetación. En cambio, durante el invierno del resto de años hidrológicos estudiados los valores relativos de exportación de SS fueron inferiores al 81% ya que se acumuló un mayor volumen de precipitación durante el verano propiciando una mayor movilización de sedimento.

- Durante eventos. La figura 4C muestra la importancia de los eventos de mayor magnitud en el transporte de SS y en la escorrentía. Los valores fueron calculados a partir de los datos instantáneos quinceminutales y se

expresan en porcentaje de la exportación total estacional. Cuando la escorrentía estuvo presente, el evento diario más extremo de cada estación tuvo un impacto mucho mayor en el transporte de SS que en la escorrentía. Las proporciones pueden variar considerablemente a nivel estacional y anual debido a la distribución irregular de la precipitación típica del clima mediterráneo. Durante el año 2004-2005, el máximo diario de la exportación de SS supuso un 20% de la exportación estacional de SS mientras que el máximo diario de escorrentía únicamente contabilizó un 5,1% del volumen estacional. Por otro lado, durante el año 2005-2006 el peso relativo del valor máximo diario de la exportación estacional de SS fue del 31,9%, mientras que para la escorrentía estacional fue del 36,3%. Por tanto, durante el año 2004-2005 los principales eventos de precipitación ocurrieron a mediados del período invernal cuando las reservas hídricas de la cuenca habían sido recargadas y las pérdidas por evapotranspiración eran mínimas comparadas con la precipitación. Con este escenario, importantes volúmenes de escorrentía base fueron generados permitiendo diferencias significativas entre las proporciones relativas de los valores máximos diarios de SS y de escorrentía. En cambio, durante el año 2005-2006 los principales eventos de precipitación se produjeron durante la primavera y el verano cuando la demanda evapotranspirativa era muy elevada, los suelos estaban secos y la escorrentía base no estaba presente. Con estas condiciones, las pocas tormentas de corta duración y elevada intensidad que se produjeron provocaron que el peso relativo a nivel estacional de los valores máximos diarios de escorrentía fuese más importante que el de la exportación de SS.

Finalmente, para analizar la exportación de SS con más detalle fue necesario estudiar la periodicidad del transporte (Fig.4D). Así, la realización de las curvas de duración acumulativas de las exportaciones de SS basadas en los valores quincenales, cuando la escorrentía estuvo presente, proporciona una mejor perspectiva. Exportaciones elevadas, asociadas a tormentas de corta duración, son más evidentes con la información de la duración de la exportación expresada en formato acumulativo. Por tanto, estos datos indican que el 50% de la exportación total fue movilizada durante sólo un 0,13% del período de estudio cuando la escorrentía estuvo presente. La mayor parte (90%) del SS fue transportado en sólo un 1,1% del tiempo cuando la escorrentía estuvo presente. Considerando que la construcción de las curvas de duración acumulativas se basó en valores de exportación únicamente cuando la escorrentía estaba presente, dicha exportación puede ser considerada extremadamente efímera si se compara con otros ambientes tales como los templados húmedos (Webb y Walling, 1982). Además, estos datos corroboran los valores y las causas de la baja producción de SS explicados anteriormente, demostrando una limitada disponibilidad de sedimento haciendo que las áreas fuente más importantes sean sólo erosionadas durante los eventos más intensos. Por otro lado, la falta de efectividad del transporte del sedimento durante los períodos de caudales bajos también se evidencia por el hecho de que menos del 1% de la exportación total de SS fue transferida durante un período de tiempo que supone un 90% del período de estudio.

## 5. Conclusiones

Se ha realizado un análisis detallado del transporte de sedimento en suspensión y sus procesos relacionados en Can Revull durante un período de estudio de 3 años a través de la monitorización continua de la turbidez. Esta cuenca es particularmente interesante por la actividad agrícola extensiva herbácea de secano y por la aplicación de prácticas tradicionales de evacuación del sobrante de agua del suelo y de prevención de la erosión de los suelos. Los principales resultados extraídos de este estudio detallado son los siguientes:

1. La media anual de concentración de sedimento en suspensión fue de 17,3 mg l<sup>-1</sup>, con un valor máximo alcanzado de 2.270 mg l<sup>-1</sup>. De todos modos, las concentraciones máximas oscilaron normalmente entre los 100 y 500 mg l<sup>-1</sup>. Valores comparables han sido expuestos en otras cuencas con usos del suelo similares en ambientes mediterráneos. Las concentraciones permanecieron por debajo de 15 mg l<sup>-1</sup> durante un 79% del período de estudio cuando hubo flujo en el canal; y superaron los 100 mg l<sup>-1</sup> sólo durante un 0,6% del tiempo. No obstante, la variabilidad de la CSS fue muy elevada (CV 307%), siendo mucho más amplia que en otras cuencas mediterráneas. Esta gran variabilidad se explica por los fuertes contrastes estacionales de la dinámica de escorrentía base, los cuales se asocian a diferentes grados de dilución.

2. La energía hidráulica no fue el factor predominante en los procesos de transporte de SS. Por tanto, la regresión múltiple por pasos fue aplicada para la CSS-media y para la CSS-stormflow, generando valores de R<sup>2</sup> entre 0,83 y 0,99. La interpretación de los valores de  $\beta$  muestran que la intensidad de la precipitación fue la variable más significativa, sobre todo para la CSS-stormflow ya que la intensidad de precipitación implica que la escorrentía superficial moviliza el sedimento de las vertientes. Este proceso tiene lugar principalmente durante el verano cuando predominan las precipitaciones convectivas y la disponibilidad de sedimento es mayor en las vertientes desprovistas de vegetación. Por otro lado, la intensidad de crecida es la segunda variable más influyente, controlando sólo las regresiones del período de estudio y la del invierno. Es más significativa para la CSS-media que para la CSS-stormflow ya que la intensidad de crecida está directamente relacionada con los procesos de lavado dentro del canal. Por tanto, cuando la escorrentía base está presente, el lavado moviliza fácilmente el sedimento almacenado en el canal que previamente había sido generado por procesos físicos y biológicos. En cambio, durante el verano la disponibilidad de sedimento en el canal es reducida debido a los procesos de sellado y formación de costras.

3. La exportación total transportada fue calculada en 9,96 t durante el período de estudio, ofreciendo una tasa de producción específica de sedimento en suspensión de 3,1 t km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. Se trata de

un valor bajo que se explica a partir de dos factores: (a) históricamente, las zonas de cabecera fueron modificadas mediante banales y albarradas para evitar la erosión; (b) en las zonas llanas, la topografía cóncava y la desviación del canal por encima del tálveg natural proporciona una baja conectividad entre las vertientes y el canal que limita los procesos de redistribución del sedimento a lo largo del sistema fluvial.

4. La mayoría del sedimento fue transportado durante cortos períodos de tiempo. Un 50% de la exportación total fue movilizada en sólo un 0,13% del período de estudio. Además, cuando la escorrentía base estuvo presente, el evento diario más extremo de cada estación tuvo un impacto mucho mayor en el transporte de SS que en la escorrentía. Contrariamente, cuando la demanda evapotranspirativa fue muy elevada y la escorrentía base no estuvo presente, las tormentas de elevada intensidad y corta duración provocaron que el peso relativo a nivel estacional de los valores máximos diarios de escorrentía fuese más importante que el de exportación de sedimento.

A modo de conclusión, cabe destacar que la movilización de sedimento se produce a partir de las intensidades de precipitación y de crecida. Asimismo, la disponibilidad de sedimento en las vertientes oscila en función del estado de los campos de cultivo mientras que en el canal depende de la presencia de escorrentía base. Igualmente, esta variabilidad de la escorrentía base y las prácticas tradicionales de conservación del suelo restringen la exportación de sedimento en suspensión. Específicamente, la producción de SS en Can Revull es de un orden de magnitud inferior a otras cuencas mediterráneas, incluso de aquéllas afectadas por usos del suelo forestales. Se debe considerar que la movilización del sedimento es el principal factor en el transporte de SS de las pequeñas cuencas de cabecera (Milliman y Syvitsky, 1992). En cambio, los procesos de redistribución del sedimento (*sediment delivery*) son el principal factor del transporte de SS en grandes cuencas, donde la deposición es la principal característica (Walling, 1983). Por tanto, la baja producción de SS registrada en Can Revull debería perturbar significativamente estos procesos de redistribución aguas abajo en el torrent de Na Borges. En definitiva, el caso de Can Revull ejemplifica claramente como las prác-

ticas tradicionales de conservación del suelo reducen substancialmente la exportación de SS, incluso en un ambiente energéticamente elevado como el mediterráneo.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha beneficiado del proyecto REN2001-0281 “Caracterización hidrológica y transporte de sedimentos bajo diferentes usos del suelo en la cuenca del torrent de na Borges (Mallorca)” y del convenio con el Ministerio de Medio Ambiente “Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL)”. Igualmente se agradece a Sebastià Barceló Sansó su amabilidad y predisposición para construir la estación de aforos en Can Revull, finca de su propiedad. También la ayuda técnica durante el proceso de construcción y en el trabajo de campo de Joan Miquel Carmona. Las revisiones de David Regúés y Montserrat Soler han ayudado a mejorar el artículo.

### Bibliografía

- Achite, M. y Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*, 343, 187-202.
- Asselman, N.E.M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234 (3-4), 228-248.
- Batalla R.J. (1993). *Contribució del transport de sorres al balanç de sediments d'una conca de drenatge mediterrània granítica*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona (España).
- Batalla R.J. y Sala, M. (1994). Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. En: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport* (L.J. Olive, R.J. Loughran, J.A. Kesby, eds.). IAHS Red-Book n° 224. International Association of Hydrological Science, Wallingford (Reino Unido), 299-305.
- Batalla, R.J., Sala, M. y Werrity, A. (1995). Sediment budget focused in solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39 (2), 249-264.
- Batalla R.J., Garcia, C. y Rovira, A. (2005a). A decade of sediment transport measurements in a large Mediterranean river (the Tordera, Catalan Ranges, NE Spain). En: *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and other Climate Regions* (C. Garcia y R.J. Batalla, eds.). Elsevier, Amsterdam (Holanda), 117-140.

- Batalla R.J., García, C. y Balasch, J.C. (2005b). Total sediment load in a Mediterranean mountainous catchment (the Ribera Salada River, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49 (4), 495-514.
- Bonner, A. (1994). *Plantas de les Balears*. Editorial Moll, Palma de Mallorca, 147 pp.
- Carling P.A. (1983). Particulate dynamics, dissolved and total load, in two small basins, northern Pennines, UK. *Hydrological Sciences Journal*, 28, 355-375.
- Díaz Palmer, A., García, C., Servera, J. y Úbeda, X. (2006). Spatial variability of total nitrogen, total carbon and organic carbon content in the top-soil of the Na Borges basin, Mallorca, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplement Band*, 143, 83-94.
- Dickinson, W.T. (1981). Accuracy and precision of suspended sediment loads. En: *Erosion and Sediment Transport Measurement*, (D.E. Walling y P. Tacconi, eds.). IAHS Red-Book n° 133, International Association of Hydrological Science, Wallingford (Reino Unido), 195-202.
- Dietrich, W.E., Dunne, T. (1978). Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplement-Band*, 29, 191-206.
- Douglas, I. (1993). Sediment transfer and siltation. En: *The Earth as Transformed by Human Action* (B.L. Turner, W.C. Clark, R.W. Kates, J.F. Richards, J.T. Mathews, W.B. Meyer, eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge (Reino Unido), 215-234.
- Estrany J. y García, C. (2004). Monitorización del transporte de sedimento en suspensión en la cuenca del torrent de na Borges (Mallorca): resultados preliminares. En: *Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología* (G. Benito y A. Díaz Herrero, eds.). CSIC, Toledo (España), 159-170.
- Estrany, J. y García, C. (2005). Monitoring suspended sediment fluxes in the Na Borges basin, Mallorca, Spain. En: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins* (R.J., Batalla y C. García, eds.). IAHS Red-Book n° 299, International Association of Hydrological Science, Wallingford (Reino Unido), 119-125.
- Estrany, J., García, C. y Batalla, R.J. Hydrological Dynamics in a Small Mediterranean Agricultural Catchment. *Journal of Hydrology* (en revisión).
- Farguell, J. (2005). *Suspended sediment dynamics and yield in the Mediterranean Anóia River basin under different land uses*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona (España), 217 pp.
- Ferguson, R.I. (1987). Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surface Processes y Landforms*, 12 (1), 95-104.
- Foster, I.D.L., Millington, R. y Grew, R.G. (1992). The impact of particle size controls on stream turbidity measurements: some implications for suspended sediment yield estimation. En: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins* (J. Bogen, D.E. Walling y T.J. Day, eds.). IAHS Red-Book n° 210, International Association of Hydrological Science, Wallingford (Reino Unido), 51-62.
- Francke, T., López-Tarazón, J.A., Vericat, D., Bronstert, A. y Batalla, R.J. (2008). Flood-based analysis of high-magnitude sediment transport using a non-parametric method. *Earth Surface Processes and Landforms*, Aceptado.
- Gallart, F., Balasch, J.C., Regúés, D., Soler, M. y Castelltort, X. (2005). Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment The Vallcebre research basins (southeastern Pyrenees) II: temporal and spatial dynamics of erosion and stream sediment transport. En: *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions* (C. García y R.J. Batalla, eds.), Elsevier, Amsterdam (Holanda), 17-29.
- García-Ruiz, J.M., Lasanta, T., Ortigosa, L., Ruiz-Flaño, P., Martí-Bono, C. y González, C. (1995). Sediment yield under different land uses in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research Development*, 15, 229-240.
- García-Ruiz, J.M., Martí, C., Arnáez, J., Beguería, S., Lorente, A. y Seeger M. (2000). Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo central español: escorrenia y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 23-40.
- Gippel, C.J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes*, 9, 83-97.
- Grimalt, M., Blázquez, M. y Rodríguez, R. (1992). Physical factors, distribution and present land-use of terraces in the Tramuntana mountain range. *Pirineos*, 139, 15-25.
- Grimalt, M. y Rodríguez, R. (1997). Caracterització dels murs de pedra transversals als cursos d'aigua del terme de Manacor (Mallorca). En: *La pedra en sec. Obra, paisatge i patrimoni*, FODESMA (ed.). Consell Insular de Mallorca, Palma de Mallorca, 285-293.
- Gregory, K.J. y Walling, D.E. (1973). *Drainage Basin Form and Process. A geomorphological approach*. Edward Arnold (Publishers) Ltd, London, 457 pp.
- Hall, D.G. (1967). The pattern of sediment movement in the River Tyne. En: *Symposium on River Morphology*, IAHS Red-Book n° 75. General Assembly of Bern. International Association of Hydrological Science Publication, Wallingford (Reino Unido), 117-140.
- International Organization of Standards (1980). *Water flow measurement in open channels using weirs and venturi flumes - Part 1: Thin plate weirs*. ISO 1438/1-1980(E).
- Inbar, M. (1992). Rates of fluvial erosion in basins with a Mediterranean type climate. *Catena*, 19, 393-409.
- Imeson, A.C. (1977). Splash erosion, animal activity and sediment supply in a small forested Luxembourg catchment. *Earth Surface Processes*, 2, 153-160.
- Jenkins, H.C., Sellwood, B.W. y Pomar, L. (1990). *A Field Excursion Guide to the Island of Mallorca*. Geologists' Association Guides. The Geologist's Association, London.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H. y Martínez-Fernández, J. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29 (1), 45-59.
- Lewis, J. (1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research*, 32, 2299-2310.
- Milliman, J.D. y Meade, R.H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91 (1), 1-21.

- Milliman, J.D. y Syvitski, J.P.M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*, 100, 525-544.
- Reynés, A. y Riera, J. (1994). *La construcció de pedra en sec a Mallorca*. Consell Insular de Mallorca, Palma (España).
- Richards, G. y Moore, R.D. (2003). Suspended sediment dynamics in a steep, glacier-fed mountain stream, Place Creek, Canada. *Hydrological Processes*, 17 (9), 1733-1753.
- Romero, R., Guijarro, J.A., Ramis, C. y Alonso, S. (1998). A 30-year (1964-93) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology*, 18, 541-560.
- Romero, R. (2001). Sensitivity of a heavy rain producing Western Mediterranean cyclone to embedded potential vorticity anomalies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127, 2559-2597.
- Rovira, A., Batalla, R.J. y Sala, M. (2005). Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). *Catena*, 60 (1), 19-42.
- Seeger, M., Errea, M.P., Begueria, S., Arnaez, J., Marti, C. y Garcia-Ruiz, J.M. (2004). Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288 (3-4), 299-311.
- Serrat, P. (1999). Present sediment yield from a Mediterranean fluvial system: the Agly river (France). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 329 (3), 189-196.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Giménez, J., Fornós, J., Cabero, A., Bardají, T., Mateos, R., González-Hernández, F.M., Hillaire-Marcel, C., Bassam, G. (2005). Mallorca Island: geomorphological evolution and neotectonics. En: *Field Trip Guides of Sixth International Conference on Geomorphology, vol. II* (G. Desir, F. Gutiérrez y M. Gutiérrez, eds.). Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España), 433-472.
- Slaymaker, O. (2003). The sediment budget as conceptual framework and management tool. *Hydrobiologia*, 494 (1-3), 71-82.
- Sutherland, R.A. y Bryan, R.B. (1989). Flow Dynamics and the Variability of Suspended Sediment in a Semiarid Tropical Stream, Baringo District, Kenya. *Geografiska Annaler*, 72A, 23-39.
- Syvitski, J.P.M. (2003). The supply of flux of sediment along hydrological pathways: Anthropogenic influences at the global scale. *Global and Planetary Change*, 39 (1-2), 1-11.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Trimble, S.W. (1983). A sediment budget for Coon Creek Basin in the Driftless Area, Wisconsin, 1853-1977. *American Journal of Science*, 283, 454-474.
- Walling, D.E. (1974). Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. En: *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds. Studies of small watersheds in the British Isles* (K.J. Gregory y D.E. Walling, eds.). Institute of British Geographers, Londres (Reino Unido), 169-191.
- Walling, D.E. (1977). Suspended sediment and solute response characteristics of the River Exe, Devon, England. En: *Research in Fluvial Systems* (R. Davidson-Arnott, W. Nickling, eds.). Geo Abstracts, Norwich (Reino Unido), 58-87.
- Walling, D.E. (1983). The Sediment Delivery Problem. *Journal of Hydrology*, 65, 209-237.
- Walling, D.E. (1996). Suspended sediment transport by rivers: a geomorphological and hydrological perspective. *Archives Hydrobiological Special Issues Advanced Limnology*, 47, 1-27.
- Walling, D.E. (2006). Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79 (3-4), 192-216.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1982). Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. En: *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield* (D.E. Walling, ed.). IAHS Red-Book n° 137, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford (Reino Unido), 327-337.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1983). Patterns of sediment yield. En: *Background to Paleohydrology* (K.J. Gregory, ed.). John Wiley and Sons, New York (Estados Unidos), 69-100.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1987). Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience. En: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* (C.R.B. Thorne, J.C. Bathurst y R.D. Hey, eds.). John Wiley and Sons Ltd, Londres (Reino Unido), 691-723.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1996). Erosion and sediment yield: a global overview. En: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* (D.E. Walling y B.W. Webb, eds.). IAHS Red-Book n° 236, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford (Reino Unido), 3-19.
- Walling, D.E. y Collins, A.L. (2000). *Integrated Assessment of Catchment Sediment Budgets: A Technical Manual*. UK Department for International Development, Exeter, 168 pp.
- Walling, D.E. y Collins, A.L. (2008). The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental Science & Policy*, 11 (2), 136-143.
- Webb, B.W. y Walling, D.E. (1982). Magnitude and frequency characteristics of suspended sediment transport in Devon rivers. En: *Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology* (T.P. Burt, D.E. Walling, eds.). Geo-Books, Norwich (Reino Unido).
- YACU (2002). *Estudio de caracterización del régimen extremo de precipitaciones en la isla de Mallorca. Memoria*. Secció d'Estudis i Projectes, Direcció General de Recursos Hídrics, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears: Palma.
- Zabaleta, A. (2007). *Análisis de la respuesta hidro-sedimentaria en pequeñas cuencas de Gipuzkoa*. Tesis Doctoral, Euskal Herriko Unibertsitatea, Leioa (España), 359 pp.
- Zabaleta, A., Martínez, M., Uriarte, J.A. y Antigüedad, I. (2007). Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*, 71 (1), 179-190.
- Zgaier, A. y Inbar, M. (2005). The influence of soil saturation on the stability of abandoned agricultural hillslope terraces

under Mediterranean climatic conditions. En: *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and other Climate Regions* (C. García y R.J. Batalla, eds.), Elsevier, Amsterdam (Holanda), 69-86.

Zhu, T.X., Band, L.E. y Vertessy, R.A. (1999). Continuous modeling of intermittent stormflows on a semi-arid agricultural catchment. *Journal of Hydrology*, 226 (1-2), 11-29.