



**Acumulación de sedimentos finos en el lecho del río Isábena:
efectos sobre el transporte y la dinámica sedimentaria**

*In-channel fine sediment accumulations in the Isábena river:
effects over sediment transport and dynamics*

López-Tarazón, J.A.⁽¹⁾; Tena, A.⁽¹⁾; Vericat, D.^(1,2,3); Batalla, R.J.^(1,2,4)

(1) Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida,
Av. Alcalde Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, España. jlopez@macs.udl.cat

(2) Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Àrea d'Hidrologia,

Ctra. St. Llorenç de Morunys, km 2 (direcció Port del Comte), E-25280 Solsona, España.

(3) Centre for Catchment and Coastal Research, Institute of Geography and Earth Sciences,
Aberystwyth University, Wales, Ceredigion SY23 3DB, UK.

(4) Institut Català de Recerca de l'Aigua, Edifici H2O Building, E-17003 Girona, España.

Resumen

El almacenamiento de sedimentos y sus efectos sobre el transporte de sedimentos y su dinámica ha sido estudiado en un tramo de ~3 km en el río Isábena durante un año hidrológico medio (2007-2008). La acumulación total de sedimentos para el tramo y el período de estudio ha sido estimada en aproximadamente 679 t, que equivale al 0,32% de la carga total anual de sedimentos calculada en la salida de la cuenca. Estos valores de acumulación han sido extrapolados a la totalidad del cauce principal (45 km), resultando en un almacenamiento de 9.810 t, que supone un 4,7% de la carga sedimentaria anual. El almacenamiento en el cauce muestra una tendencia temporal y otra espacial. En relación a la primera, los sedimentos se acumulan continuamente durante los períodos de caudal bajo mientras que la segunda demuestra una acumulación creciente en la dirección aguas abajo. Los resultados sugieren que los sedimentos finos acumulados en el lecho del río pueden controlar el transporte de sedimentos puntual de la cuenca del río Isábena y su dinámica, actuando algunas veces como la fuente de sedimentos y otras como un sumidero en el cual los sedimentos se acumulan.

Palabras clave: acumulación de sedimentos finos, transporte de sedimentos en suspensión, dinámica temporal, histéresis, río Isábena, cuenca Ebro.



Abstract

In-channel fine-sediment storage can constitute an important part of the sediment budget of a drainage basin. This phenomenon occurs when sediment production in the basin is greater than the river's transport capacity, resulting in large accumulations of fines along the river channel. In-channel sediment storage and its effects over the basin's sediment transport and dynamics have been studied in a ~3-km channel length reach of the River Isábena during an average hydrological year (2007-2008). Total in-channel sediment storage for the study period has been estimated at approximately 679 t, which equates to 0.32% of the annual suspended sediment load calculated at the basin's outlet. Sediment storage values obtained in the study reach have been extrapolated to the whole main channel length (45 km), resulting in a total storage of 9,810 t, representing the 4.7% of the annual total load. In-channel storage shows both temporal and spatial trends. In relation to the former, sediment is continuously accumulated during low-flows while the latter shows that sediment accumulation increases in the downstream direction. Results suggest that the fine-grained sediment stored in the channel may control the sediment transport of the Isábena basin and its dynamic, acting some times as a sediment source and some other times as sediment sink where the sediment is accumulated.

Keywords: fine sediment accumulation, suspended sediment transport, temporal dynamics, hysteresis, Isábena River, Ebro basin.

1. Introducción

El transporte de sedimentos en suspensión en medios fluviales es un proceso que tiende a ocurrir de manera discontinua durante crecidas. Los sedimentos, una vez erosionados desde las áreas fuente, son transferidos a la red de drenaje por la que se transportarán hasta las zonas de deposición de manera espacialmente continua. Dicha continuidad puede ser interrumpida por la sedimentación de los mismos cuando las fuerzas tractivas no disponen de suficiente competencia como para movilizar la carga sedimentaria. Así, los sedimentos, pueden ser almacenados tanto en el lecho del río como en las llanuras de inundación (Wilson *et al.*, 2004). El almacenamiento de sedimentos finos suele constituir una parte muy importante del balance sedimentario de una cuenca de drenaje y, en muchos casos, la cantidad de sedimentos acumulada en el lecho o zonas próximas puede ser incluso mayor que la exportación sedimentaria total de la cuenca en períodos relativamente cortos de tiempo (Trimble, 1983; Walling, 1983; Phillips, 1991; Owens *et al.*, 1997). Este fenómeno es especialmente destacable en aquellas áreas que drenan sobre

materiales altamente erosionables, cuya producción sedimentaria es típicamente superior a la capacidad de transporte del río, generando elevadas acumulaciones de finos, tanto a lo largo del cauce principal como de los tributarios (Walling y Amos, 1999; López-Tarazón *et al.*, 2009; López-Tarazón *et al.*, 2010). A consecuencia de esto, la acumulación de sedimentos finos en el lecho del río complica el cálculo y la interpretación de los balances sedimentarios de las cuencas, sobre todo en relación a las fuentes de los sedimentos y su disponibilidad, al atenuar la relevancia de la generación de sedimentos en las laderas así como la de la transferencia de sedimentos aguas abajo (Walling *et al.*, 1998).

A pesar de la limitada información disponible sobre el almacenamiento de sedimentos en el lecho así como su rol como regulador del transporte de sedimentos en suspensión en sistemas fluviales, la sedimentación en el cauce es un punto de interés creciente por diversas razones. La deposición de sedimentos rellena los poros (i.e., reduce la porosidad del lecho) por los que circulan los flujos de agua, reduciendo así las tasas de intercambio hiporreico (e.g., Wood y Armitage, 1997; Packman

y Mackay, 2003) y altera la calidad del hábitat fluvial y la biodiversidad; estos impactos han sido estudiados para la freza ictícola por Acornley y Sear (1999), en macroinvertebrados por Quinn *et al.* (1992) y en comunidades de macrófitos por Clarke y Wharton (2001). Además de esto, la acumulación de sedimentos pueden incrementar la carga sedimentaria durante crecidas cambiando, de esta manera, tanto la dinámica del transporte de sedimentos (esto es, los flujos de alta densidad incrementan la viscosidad del fluido y, por lo tanto, la capacidad del río para poner en movimiento y transportar carga de fondo y elevadas cargas de sedimentos finos) como las curvas h/Q en estaciones de aforo.

Aunque el almacenamiento de sedimentos juega un papel crucial en el desarrollo de los balances sedimentarios, muy poca atención se ha prestado a este proceso en grandes cuencas fluviales. La mayoría de los estudios se han desarrollado en cuencas pequeñas (generalmente < 100 km²), como por ejemplo, Loughran *et al.* (1992), Owens *et al.* (1997), Walling y Amos (1999), Hodgkins *et al.* (2003), y Smith y Dragovich (2008), pero muy pocos investigadores han intentado cuantificar los sedimentos acumulados en áreas mayores (100-10000 km²). Excepciones notables son Lambert y Walling (1988), Jordan y Slaymaker (1991), Phillips (1991), Meade (1994), Walling *et al.* (1998) y Collins y Walling (2007).

Así mismo, la investigación referente a la sedimentación de embalses, calidad del agua superficial, dinámica sedimentaria en la relación río-estuario-costa, los procesos de denudación continental y los balances de sedimentos junto con los impactos ecológicos derivados tanto de la ingeniería como de la minería fluvial enfatiza la necesidad de una mejor comprensión del transporte de sedimentos y su dinámica en diferentes cuencas de drenaje y sistemas fluviales. La cuantificación de la carga sedimentaria es fundamental en cuencas que drenan a embalses, ya que pueden crear problemas de aterramiento (o agravarlos si ya existían) en los mismos (Valero-Garcés *et*

al., 1999). Una vez que los sedimentos llegan a los embalses, el aterramiento se convierte en un gran problema socio-económico a largo plazo debido a la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua. Este hecho, a su vez, puede hacer peligrar el abastecimiento de agua doméstica así como otras actividades económicas como el riego, la producción de energía hidroeléctrica o nuclear y el turismo costero.

El principal objetivo de este artículo es el estudio de la dinámica del transporte de sedimentos en suspensión y de la acumulación de sedimentos finos en el lecho del río Isábena (NE de la Península Ibérica) así como los efectos que estas acumulaciones tienen sobre el transporte y la dinámica sedimentaria del río durante el año 2007-2008.

2. Área de estudio

La cuenca del río Isábena se encuentra en el Pre-Pirineo Aragonés (NE de la cuenca del Ebro) (Figura 1a). La cuenca comprende una superficie de 445 km² (0,48% del área total de la cuenca del Ebro) y desemboca, junto al río Ésera, en la cola del embalse de Barasona, encargado de aportar agua de riego a más de 100.000 ha y que experimenta graves problemas de aterramiento desde su construcción (e.g., Avendaño *et al.*, 1997a; Avendaño *et al.*, 1997b; Navas *et al.*, 1998). Ambos ríos son tributarios del río Cinca, el segundo afluente más importante del Ebro. Se trata de una cuenca no regulada hidráulicamente, ya que no existen embalses a lo largo del curso del río, por lo que su régimen hidrológico viene dado, exclusivamente, por factores naturales. Por otro lado, tanto el cauce principal como diferentes tributarios han sufrido severas extracciones de áridos con el paso de los años.

El rango de altitudes de la cuenca del río Isábena oscila entre los 650 m s.n.m. en su desembocadura y los 2.720 m s.n.m. en su extremo norte. Geológicamente, la cuenca forma parte de la cuenca terciaria de Tremp-Graus. En su parte media, el río Isábena atraviesa un área de margas grises eocenas, drenada por

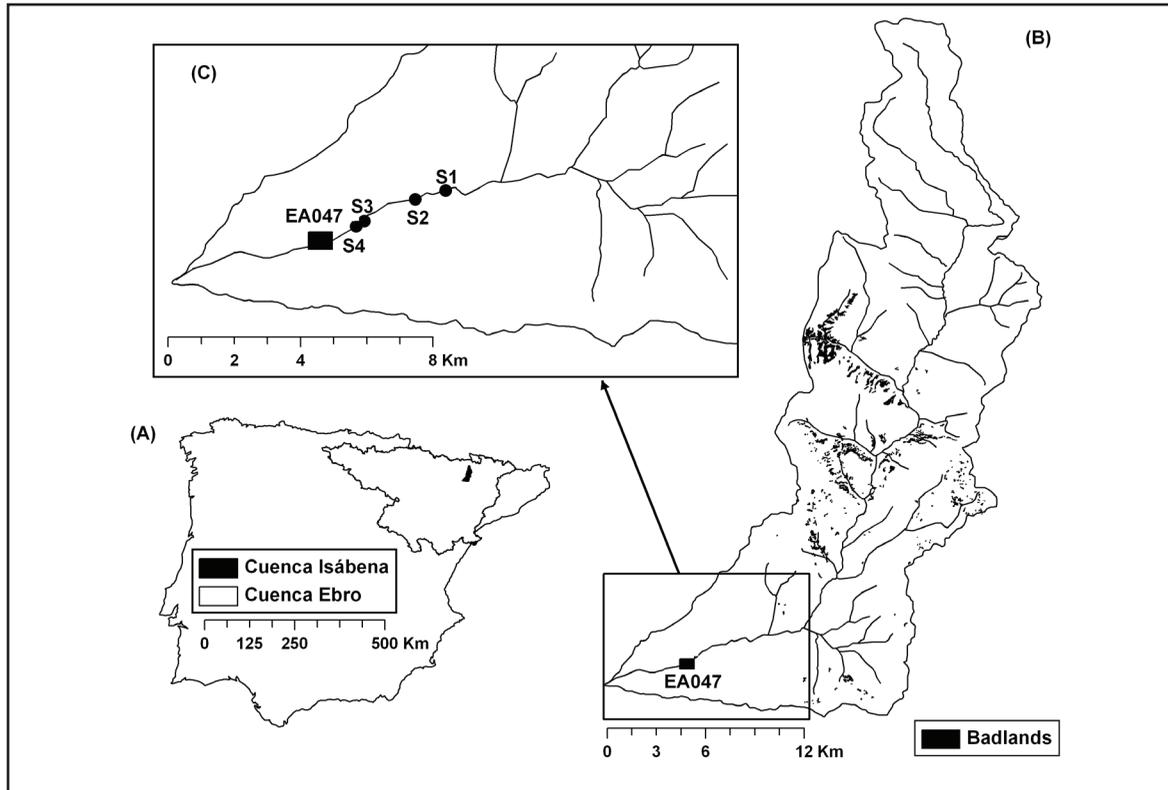


Figura 1. (A) Localización de la cuenca del río Isábena en la Península Ibérica y en la cuenca del Ebro; (B) Distribución de las zonas de badlands en la cuenca del río Isábena y localización de la estación de aforo de Capella (i.e., EA047) cercana a su desembocadura en el río Ésera; (C) Ubicación de las secciones de muestreo en el tramo bajo del Isábena.

Figure 1. (A) Location of the Isábena River basin in the Iberian Peninsula and in the Ebro basin; (B) Distribution of the badlands zones in the Isábena River basin and location of the Capella gauging station (i.e., EA047) close to its confluence with the Ésera River; (C) Location of the sampling sections in the lower Isábena.

una densa red de sistemas de cárcavas (e.g., *badlands*; Francke *et al.*, 2008a). Esta zona, pese a representar menos del 1% del área total de la cuenca (ver localización en Figura 1b), es la fuente más importante de sedimentos en suspensión (Francke *et al.*, 2008b). No se observan procesos de incisión activos importantes en los cursos principales, por lo que los procesos geomorfológicos más activos son los movimientos en masa y la erosión hídrica en laderas y en los *badlands* (López-Tarazón *et al.*, 2010). Los suelos de la cuenca están desarrollados sobre calcilutitas, calizas, areniscas y conglomerados eocenos y, en términos generales, se caracterizan por su escaso desarrollo. Suelen ser suelos básicos, de textura franco-limosa. En general, son poco profundos y con contenidos de materia orgá-

nica bajos (<2%). Son suelos bien drenados, con capacidades de retención de agua limitadas y con estabilidad estructural moderada y/o baja (López-Tarazón *et al.*, 2010).

La cuenca se encuadra dentro del dominio climático mediterráneo, siendo el gran contraste térmico una de las características principales (i.e., temperatura media anual de 10 °C en la parte norte y 12,5 °C en la zona sur), con un invierno seco y un verano más tormentoso, con gran número de lluvias de carácter torrencial. Desde el punto de vista climático, el área de estudio puede subdividirse en dos grandes mitades, una al sur más cálida y seca, de clima mediterráneo seco, y otra al norte, típicamente pirenaica, con las características climáticas propias de la vertiente sur de los

Pirineos (López-Tarazón *et al.*, 2011b). A ello hay que añadir además la influencia altitudinal fruto del relieve, de manera que el clima pasa de tener carácter submediterráneo en la parte sur, a tener rasgos subalpinos a partir de 1.600 m (Verdú *et al.*, 2007), presentando un elevado número de ciclos diarios de hielo-deshielo. La precipitación media anual en la cuenca varía entre 450 y 1600 mm, siendo la lluvia media de la cuenca de 767 mm, con máximos estacionales en primavera y otoño (López-Tarazón *et al.*, 2009).

El régimen hidrológico presenta un comportamiento pluvionival, con gran irregularidad interanual (período de deshielo) e intranual, presentando mínimos durante el verano, aunque el río nunca se seca completamente. Los máximos absolutos pertenecen al otoño (291 m³/s el 9 de noviembre de 1966, 192 m³/s el 18 de diciembre de 1997), con una media de los caudales máximos anuales de alrededor de 40 m³/s. Sin embargo, el máximo caudal registrado en el río Isábena fue 318 m³/s el 3 de agosto de 1963. El caudal medio anual para el período del que hay registro (1945-2008) fue 4,1 m³/s (1,04% del caudal total anual del Ebro), con una desviación estándar (σ) de 2,2 m³/s. El volumen medio anual de escorrentía para el mismo período fue 177 hm³ ($\sigma = 92$ hm³).

3. Materiales y métodos

3.1. Transporte de sedimentos

3.1.1. Toma de datos

El transporte de sedimentos en suspensión ha sido medido en la estación de aforo que la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) tiene instalada en el río Isábena, junto a la población de Capella (EA047), cercana a la salida de la cuenca (Figura 1b). Los datos de altura de agua son proporcionados por la CHE, con una resolución temporal quincenal, y posteriormente son transformados en caudal (Q) mediante la curva de tarado desarrollada por los autores (López-Tarazón *et al.*, 2010). Los sedimentos en suspensión

han sido medidos, de una manera indirecta, mediante un turbidímetro de retrodispersión de alto rango Endress+Hauser Turbimax W CUS41 (con un rango de medida de hasta 300 g/l). Este turbidímetro, conectado a un data-logger Campbell CR-510, fue programado para obtener medidas a intervalos de 5 segundos, registrando los datos cada 15 minutos (i.e., el valor medio del período). Para complementar el registro de datos de sedimentos en suspensión, así como para calibrar el turbidímetro se tomaron, con una frecuencia semanal, muestras integradas en profundidad; con el mismo objetivo, se instaló un muestreador automático ISCO 3700 para tomar muestras de agua y sedimentos, exclusivamente, durante crecidas. Adicionalmente se tomaron muestras manuales con un muestreador de integración en profundidad US DH59. De este modo, 428 muestras de agua y sedimentos fueron obtenidas durante el período 2007-2008 (94 de manera manual y 334 de manera automática), cubriendo un gran rango de caudales (desde 0,2 hasta 68 m³/s), los cuales representan >99% de la curva de frecuencias de caudal del período 1997-2008.

Las muestras obtenidas se procesaron de dos modos: i) aquellas con una concentración de sedimentos en suspensión (CSS) < 2 g/l fueron filtradas con filtros de celulosa y microfibras de vidrio (Millipore, 0,045 mm de tamaño de poro); ii) aquellas muestras con CSS > 2 g/l fueron procesadas mediante un sistema de decantación, siendo posteriormente secadas en estufa durante 24 horas a una temperatura constante de 60°C. Todas las muestras fueron finalmente pesadas para determinar su CSS.

3.1.2. Calibración del registro de turbidez

El diseño de muestreo (Figura 2) fue desarrollado para obtener un registro de sedimentos en suspensión continuo mediante la transformación de los datos de turbidez. De este modo, todas las muestras de CSS obtenidas fueron utilizadas para calibrar los valores de turbidez medidos y, de este modo, transfor-

marlos en CSS, obteniendo un sedimentograma continuo para todo el período de estudio.

La calibración del registro de turbidez fue realizada en 2 pasos: i) identificación y eliminación de todos los datos erróneos registrados medidos por el turbidímetro y ii) obtención de una recta de calibración entre el registro de turbidez y los valores de CSS simultáneos provenientes de las muestras manuales y automáticas. Los valores erróneos registrados por el turbidímetro pueden ser debidos, fundamentalmente, a 2 tipos de problemas: i) problemas de medida: turbidímetro fuera de su rango de medida; aparición del blind effect, que consiste en un registro de turbidez inferior al real debido al desarrollo de un biofilm en la lente o a un extenso período de CSS extremadamente elevadas; bloqueo de la lente

debido a la proliferación de algas; presencia de burbujas; discontinuidad en la densidad de los sedimentos; sedimentos finos provenientes de diferentes lugares y con diferentes granulometrías, etc (Lawler, 2005; Lawler *et al.*, 2006; Regüés *et al.*, 2002); ii) problemas técnicos: turbidímetro sin batería, averiado, etc. De esta manera, dos rectas de calibración diferentes fueron calculadas (Nadal-Romero *et al.*, 2008; Figura 3): para concentraciones inferiores a 40 g/l, la recta que mejor se ajustó a los datos fue una regresión polinómica, generando una ecuación de 2º grado del tipo $CSS = (0,1436 \times NTU^2) + (1,9673 \times NTU)$ ($N = 145$; $r^2 = 0,96$; $p < 0,01$), mientras que para los valores de CSS superiores, una regresión lineal fue la que mejor se ajustó a los datos mediante una ecuación del tipo $CSS = (5,7738 \times NTU) + 1,9608$ ($N = 6$; $r^2 = 0,94$; $p < 0,01$). En

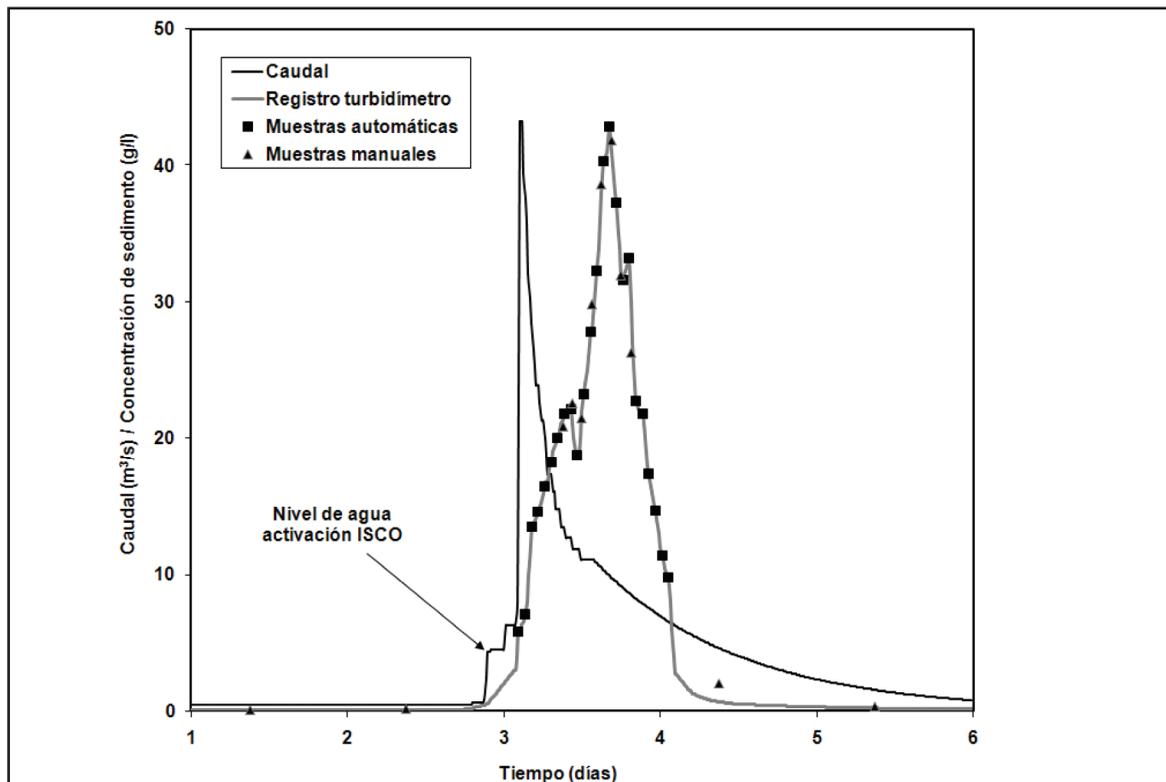


Figura 2. Ejemplo del muestreo de transporte de sedimentos durante una crecida en el Isábena. Se puede observar cómo el muestreador automático está configurado para tomar muestras durante crecidas, a partir de una cierta altura de agua.

Figure 2. Example of the sediment transport sampling during a flood in the Isábena river. It can be seen that the automatic sampler is configured to take samples during floods since a certain water level.

ambas curvas de calibración CSS representa la concentración real de sedimentos en suspensión y NTU los valores registrados por el turbidímetro.

3.1.3. Cálculo de la carga total de sedimentos. Dinámica sedimentaria

La carga sedimentaria que circula a través de la estación de aforo de Capella se calculó, quinceminutalmente, mediante la multiplicación de los valores de CSS (i.e., obtenidos tras la transformación del registro de turbidez) por los valores de Q (i.e., obtenidos tras la aplicación de la curva de gasto calculada por los autores a los valores de altura de agua medidos por la CHE). La dinámica sedimentaria se estudió a dos niveles: i) dinámica individual de cada crecida, mediante el análisis de las curvas de histéresis, que consiste en el estudio de la relación temporal existente entre el hidrograma y el sedimentograma; ii)

dinámica sedimentaria a nivel estacional, mediante la determinación de las cargas totales de sedimentos en suspensión transportados en cada estación.

3.2. Acumulaciones de sedimentos en el lecho

La cantidad de sedimentos acumulados en el lecho del río Isábena se determinó aplicando la metodología desarrollada por Lambert y Walling (1988). Esta técnica permite determinar la acumulación de sedimentos acumulados en secciones específicas del lecho del río, pudiendo ser posteriormente extrapolada a áreas hidráulicamente y morfológicamente equivalentes. La acumulación de sedimentos es, habitualmente, muy variable tanto en el tiempo como en el espacio; a su vez, el sedimento suele resuspenderse y trasladarse aguas abajo durante períodos de caudales altos. En este estudio, se obtuvieron datos

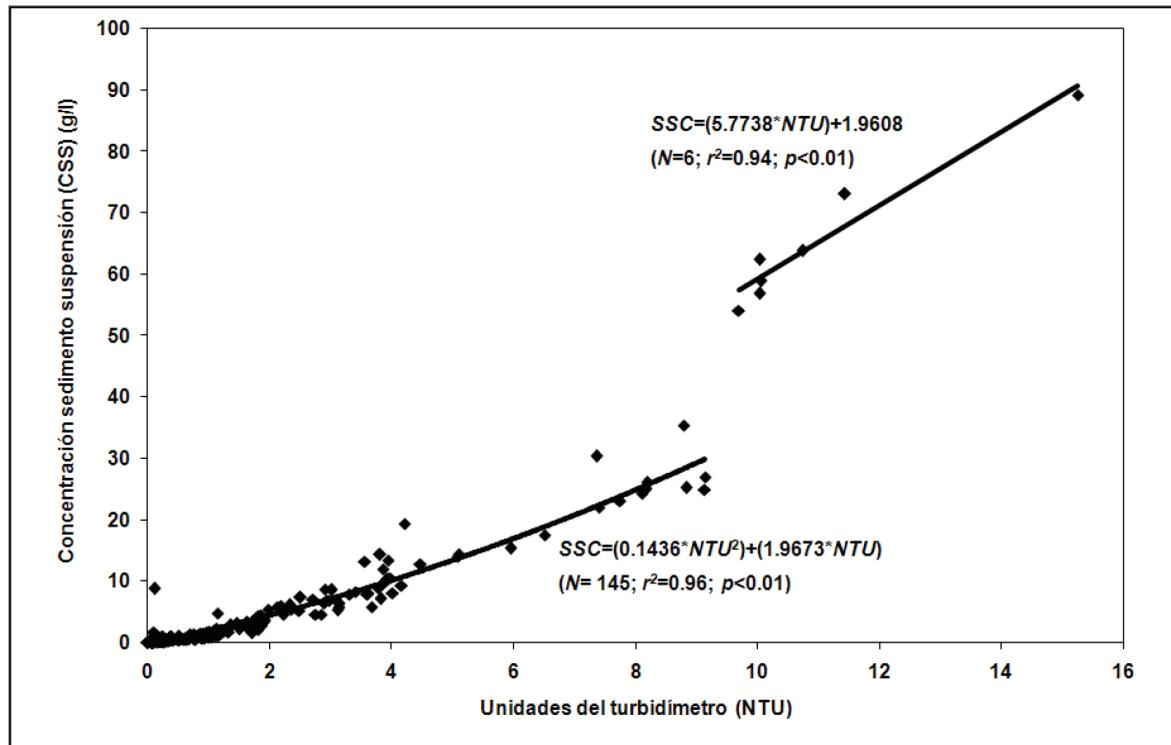


Figura 3. Rectas de calibración del turbidímetro utilizado; se puede ver cómo hay un punto de ruptura alrededor de 40 g/l (ver texto para más información).

Figure 3. Calibration curves of the used turbidimeter; it can be seen that there is a breakpoint near 40 g/l (see text for more details).

de acumulación de sedimentos durante un año (2007-2008) que fueron posteriormente comparados con la exportación de sedimentos de la cuenca para evaluar los efectos que la acumulación tiene sobre ésta.

El muestreo de la acumulación de sedimentos se realizó en 4 secciones diferentes de la parte baja del río Isábena (localizadas entre 1 y 4 km aguas arriba de la estación de aforo de Capella; ver Figuras 1b y 1c). Estas secciones se seleccionaron en base a dos criterios: i) todas ellas están localizadas aguas abajo de los afluentes principales y, por lo tanto, ya incluyen todo el caudal y el transporte de sedimentos generado en la cuenca; ii) son representativas de las características morfológicas del tronco principal del bajo Isábena

(i.e., típico río de gravas con reducida pendiente longitudinal y alternancia de rápidos/pozas). Las secciones 1 (S1; anchura media canal mojado de 36 m y pendiente longitudinal del 1,12%) y 4 (S4; anchura media canal mojado de 48 m y pendiente longitudinal del 0,91%) representan tramos multicanal, con barras centrales y laterales, mientras que las secciones 2 (S2; anchura media canal mojado de 54 m y pendiente longitudinal del 0,63%) y 3 (S3; anchura media canal mojado de 46 m y pendiente longitudinal del 1,40%) son principalmente tramos de lecho plano flanqueados por barras de gravas (Figura 4).

La metodología de muestreo es la siguiente: un cilindro de metal (diámetro de 0,5 m, área de muestreo 0,20 m² y altura 0,6 m) es intro-

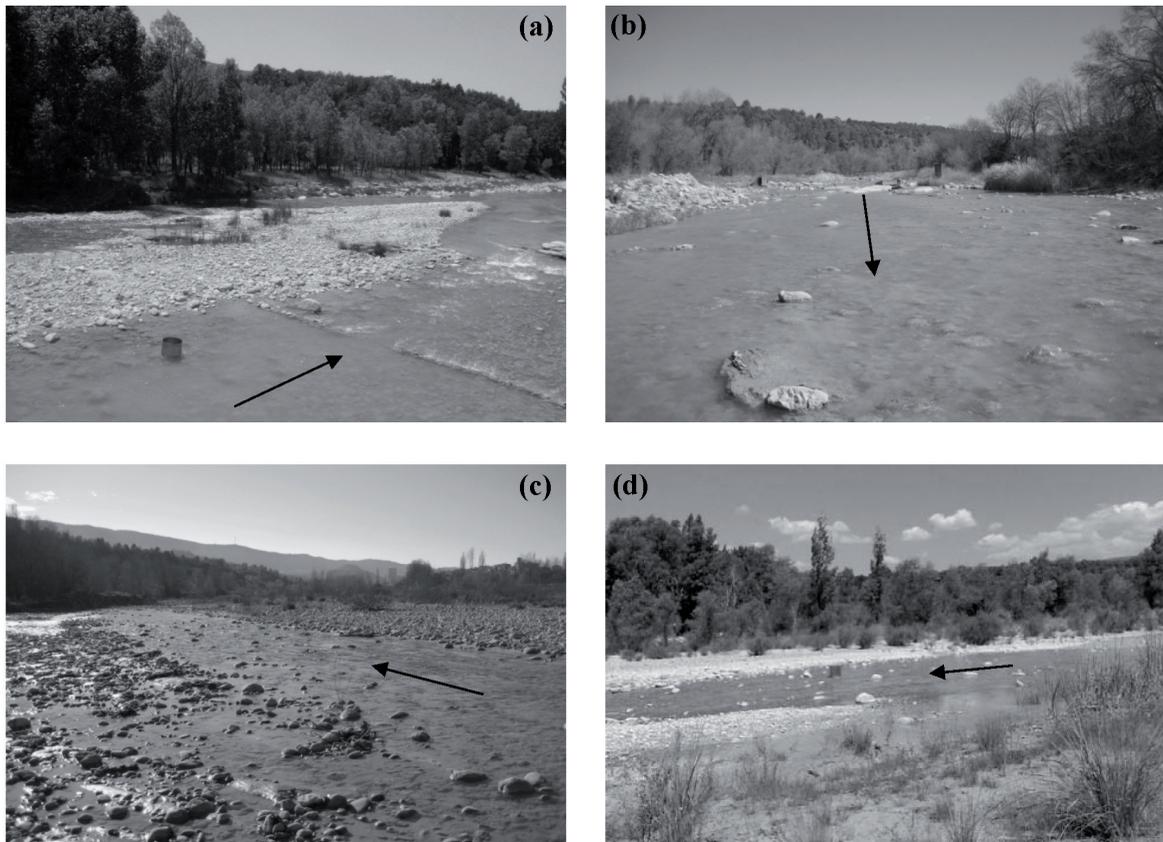


Figura 4. Secciones de muestreo: a) S1, b) S2, c) S3 y d) S4.

Todas las imágenes fueron tomadas durante períodos de bajo caudal en julio de 2007 (S1 y S4), noviembre de 2007 (S3) y abril de 2008 (S2). Las flechas negras indican la dirección del flujo.
Figure 4. Sampling sections: a) S1, b) S2, c) S3 and d) S4. Images were taken during low-flow periods in July 2007 (S1 and S4), November 2007 (S3) and April 2008 (S2). Black arrows indicate flow direction.

ducido en el agua cuidadosamente hasta que descansa en el lecho (evitando alterar los sedimentos finos depositados) para, posteriormente, ser rotado lentamente hasta que éste crea un sello con las gravas de la superficie, estableciendo de esta manera el área exacta de muestreo. A continuación, el lecho es manualmente alterado (i.e., utilizando una vara o similar), para resuspender todo los sedimentos finos y, de este modo, estimar la cantidad de sedimentos acumulados. Esta alteración del lecho se hace en dos pasos consecutivos: i) en primer lugar, solo se agita la columna de agua contenida en el cilindro para resuspender los sedimentos acumulados en la superficie del lecho (i.e., nivel de agitación N1); y ii) en segundo lugar, los primeros 10 cm del lecho son vigorosamente removidos para resuspender tanto los sedimentos finos remanentes en la superficie como todos los finos contenidos en la parte superior de la matriz de gravas del lecho (i.e., nivel de agitación N2). En este segundo nivel es necesario remarcar que los 10 cm del lecho corresponden a la profundidad de la capa superficial, teniendo en cuenta que el tamaño medio de partícula de esta capa es de 54 mm, mientras que las fracciones granulométricas extremas se sitúan en torno a los 100 mm. En ambos casos, se tomó una muestra de 1 litro de agua y sedimentos por duplicado.

Además de estas muestras, 2 muestras complementarias más de agua fueron recogidas previamente a la agitación, para usarlas como patrón blanco, restando posteriormente las concentraciones de estas muestras a las de las obtenidas por agitación. Para determinar la variabilidad transversal de la acumulación de los sedimentos en cada sección, varios puntos de muestreo (entre 3 y 5) fueron establecidos en cada una de ellas. Estos puntos de muestreo se mantuvieron en la misma localización en las 4 campañas de muestreo (1 por estación) que se realizaron a lo largo del período de estudio.

Todas las muestras se llevaron al laboratorio para determinar su concentración de sedimentos en suspensión $[C(t)_i]$, en g/l] siguiendo

la metodología descrita en el apartado 3.1.1. La cantidad de sedimentos liberados por el lecho por unidad de superficie y para un punto determinado i $[B(t)_i]$, en g/cm²] se obtuvo mediante la ecuación:

$$B(t)_i = \frac{C(t)_i W(t)_i}{A} \quad (1)$$

donde $[W(t)_i]$, en l] representa el volumen de agua contenido en el cilindro y $[A]$, en cm²] el área de muestreo del cilindro. Los sedimentos acumulados en una sección, período y nivel de agitación determinados fueron calculados como el promedio de la cantidad de sedimentos liberados por el lecho en los diferentes puntos de muestreo.

Finalmente, los resultados obtenidos en cada sección fueron extrapolados al área total del tramo de estudio de ~3 km, para estimar la cantidad total de sedimentos finos acumulados en el cauce (S_s en toneladas). Esta extrapolación se hizo siguiendo la siguiente ecuación:

$$S_s = \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i + R_{i+n}}{2} \right) \left(\frac{L_i + L_{i+n}}{2} \right) D \quad (2)$$

donde R_i son los sedimentos medios liberados en una sección determinada i (t/m²), L_i es la anchura del lecho en la sección i (m) y D es la distancia representativa de cada sección (distancia media entre secciones consecutivas, en m).

4. Resultados y observaciones

El presente artículo continúa y complementa el trabajo recientemente publicado por López-Tarazón *et al.* (2011a), y utiliza sus mismos datos de partida; a pesar de esto, y debido a los distintos enfoques y objetivos de los dos trabajos, la información generada en cada uno de ellos es diferente y totalmente complementaria. La publicación de López-Tarazón *et al.* (2011a) tiene como objetivo la estimación de los sedimentos acumulados en el lecho y la relación de éstos con la carga sedimentaria total; el presente trabajo presenta un enfoque diferente, comparando la se-

dimentación del río Isábena con la dinámica temporal del transporte de sedimentos, con los ciclos de histéresis encontrados así como con la distribución de la precipitación y la localización de los sedimentos en la cuenca.

4.1. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos en suspensión (TSS) de la cuenca del río Isábena ha sido estimado para el período 2007-2008, en la estación de aforo de Capella, localizada en la salida de la cuenca. En la Figura 5 se muestran los datos de caudal, concentración y las muestras manuales y automáticas de sedimentos en suspensión recogidas durante el período de estudio. Es necesario remarcar la gran dispersión existente entre la concentración de sedimentos en suspensión y el caudal, obteniendo valores de concentración de hasta 5 órdenes de magnitud diferentes para el mismo caudal (López-Tarazón *et al.*, 2009). Dicha situación se debe o bien a razones esta-

cionales de elevada producción de sedimentos, o bien al agotamiento de los sedimentos o a la dilución de los mismos durante crecidas (Balasch *et al.*, 2005). Además, el elevado grado de dispersión indica que los sedimentos en suspensión no son estrictamente sensibles al incremento de caudal durante las crecidas (es decir, son hidráulicamente independientes), hecho que puede estar relacionado con la disponibilidad de sedimentos finos en el cauce principal, fácilmente puestos en suspensión durante caudales bajos (Batalla *et al.*, 2005; López-Tarazón *et al.*, 2010).

El caudal medio anual para el período de estudio fue de $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\sigma = 7,3 \text{ m}^3/\text{s}$), con un pico máximo de $79 \text{ m}^3/\text{s}$ registrado el 20 de abril de 2008. La escorrentía total del período de estudio fue de 100 hm^3 , que puede ser considerado como medianamente seco si se compara con la escorrentía media del período para el que existe registro (i.e., 177 hm^3 para el período 1945-2008), pero es un valor en consonan-

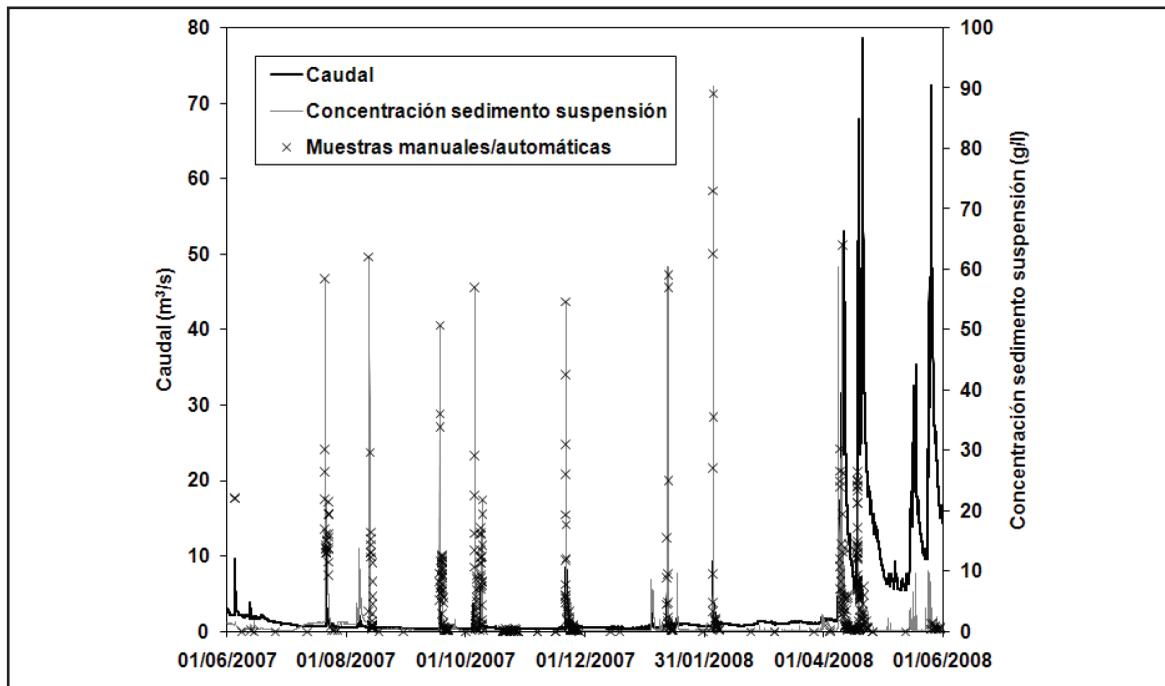


Figura 5. Hidrograma, sedimentograma y totalidad de muestras directas (i.e., manuales o automáticas) recogidas durante el período de estudio.

Figure 5. Hydrograph, sedigraph and total samples taken (i.e., manually or automatically) during the study period.

cia con los obtenidos en el Isábena durante los últimos años de monitoreo (i.e., 94 hm^3 para el período 2005-2008; para más detalles ver López-Tarazón *et al.*, 2009). Los sedimentos en suspensión que circularon a través de la estación de aforo de Capella durante el período de estudio (2007-2008) fueron 209.559 t, representando una producción específica de sedimentos de $471 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$. Ambos valores pueden ser considerados también como representativos de las condiciones medias de transporte del río de los últimos años ya que, para el período Mayo 2005 – Mayo 2008 se calculó una exportación media anual de 180,000 t/año y una específica de $414 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ (López-Tarazón *et al.*, 2009). La concentración de sedimentos en suspensión media para todo el período de estudio, calculada como el valor medio de todas las medidas obtenidas (tanto muestras manuales y automáticas como derivadas del registro de turbidez), fue de $0,8 \text{ g/l}$ ($\sigma = 3,1 \text{ g/l}$; coeficiente de variación (CV) = 375%) con un máximo de 90 g/l registrado el 4 de febrero de 2008, durante una crecida de relativa baja magnitud (i.e., caudal pico de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$, y un período de retorno de 0,6 años, Tabla 1). Al comparar estos valores con cuencas de tamaños similares se puede observar que la producción específica de sedimentos en suspensión del Isábena para el período de estudio es considerablemente elevada. Las $471 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ calculadas para el caso del Isábena son casi 15 veces superior a las $32 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ observadas por Batalla *et al.* (1995) en la cuenca de Arbúcies (106 km^2), más del doble de las $210 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ obtenidas por Batalla *et al.* (2005) y casi 40 veces superior a las $12 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ obtenidas por Vericat y Batalla (2010), ambas calculadas en la cuenca de la Ribera Salada (222 km^2) y casi 10 veces superior a las $50 \text{ t/km}^2\cdot\text{año}$ calculadas por Rovira y Batalla (2006) en la cuenca de la Tordera (785 km^2). Los valores del Isábena son del mismo orden que los descritos por Sanz-Montero *et al.* (1996) para la cuenca del Ésera (1.250 km^2 , incluyendo la propia cuenca del Isábena). Según los datos publicados por de Vente *et al.* (2006) para 44 cuencas mediterráneas, los valores calculados para la cuenca del Isábena serían de moderados a altos.

4.2. Acumulaciones en el lecho

Es habitual que los sedimentos finos se depositen en el lecho del río durante el período de recesión de las avenidas, cuando la energía necesaria para mantenerlo en suspensión decrece. Bajo estas condiciones, un manto de sedimentos (de espesor milimétrico o incluso centimétrico) cubre la superficie del cauce y los sedimentos se introducen a través del lecho, incorporándose de esta manera a la matriz de gravas (Walling *et al.*, 1998). Este proceso resulta importante en ríos como el Isábena, donde enormes cantidades de sedimentos finos son suministradas durante crecidas y pueden ser transferidas aguas abajo durante caudales bajos (para más detalles sobre el papel de los caudales bajos en el transporte de sedimentos en el Isábena ver López-Tarazón *et al.*, 2009). Los sedimentos finos se mantienen en el cauce hasta que un caudal competente resuspende estas partículas de nuevo, actuando el lecho del río, de esta manera, como almacén temporal de sedimentos, y controlando a su vez la dinámica temporal del transporte de sedimentos del río. La magnitud y la eficiencia de este rol del lecho como regulador del transporte de sedimentos es aún desconocido en la mayoría de los ríos, debido fundamentalmente a la falta de medidas y estudios.

En este estudio se ha asumido que los sedimentos resuspendidos durante los muestreos individuales son una estimación representativa de los sedimentos finos acumulados en el cauce del río de la sección muestreada y para el momento del muestreo (es decir, los resultados generan un dato puntual de la acumulación de sedimentos en cada sección). También se supone que las acumulaciones en el cauce están en su máximo durante períodos de caudales bajos y durante pequeñas crecidas. La mayor parte de los sedimentos se remobilizan con los caudales elevados que habitualmente ocurren al final de la primavera, el final del verano y el otoño. De todas maneras y debido a las condiciones mediterráneas del Isábena (i.e., irregularidad de la precipitación, largos períodos secos) este proceso puede no

Tabla 1. Valores de caudal, transporte de sedimentos y tipo de histéresis de todas las crecidas ocurridas durante el período de estudio.

Table 1. Discharge and sediment transport values and type of hysteresis of all the flood events occurred during the study period.

Flood Histéresis	Qmed ^a (m ³ /s)	Qpico ^b (m ³ /s)	Volumen total (hm ³)	CSSmed ^c (g/l)	CSSmax ^d (g/l)	TSS ^e (t)	
04/06/07	2,67	3,39	0,07	1,13	1,25	84	Antihoraria
05/06/07	4,48	9,64	0,20	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
12/06/07	2,23	3,84	0,17	0,66	1,22	109	Antihoraria
21/07/07	5,62	16,72	0,49	17,99	58,31	9.821	Horaria
12/08/07	2,82	9,64	0,09	19,84	62,13	2.714	Antihoraria
17/09/07	1,55	4,84	0,11	13,18	50,82	1.744	Antihoraria
23/09/07	0,52	0,72	0,06	0,45	1,19	25	Horaria
24/09/07	0,54	0,87	0,08	0,62	1,93	49	Horaria
04/10/07	1,42	3,61	0,05	0,51	1,62	39	Antihoraria
05/10/07	2,17	6,32	0,05	24,06	56,87	1.441	Horaria
08/10/07	2,32	5,70	0,07	9,65	16,97	691	Antihoraria
21/11/07	3,88	8,43	0,64	6,48	54,74	6.897	Horaria
03/01/08	1,26	2,79	0,10	4,39	8,66	437	No Histéresis
11/01/08	1,89	5,41	0,28	9,49	58,89	3.049	Antihoraria
16/01/08	1,14	1,65	0,18	2,11	9,54	391	Antihoraria
04/02/08	4,11	9,22	0,21	42,59	89,18	8.987	Antihoraria
08/04/08	13,93	31,59	3,12	13,73	63,88	54.001	Horaria
10/04/08	30,48	53,01	4,96	4,41	14,45	25.318	Horaria
17/04/08	24,92	67,96	5,34	2,98	24,23	30.739	No Histéresis
19/04/08	34,61	78,74	12,05	1,26	7,33	23.332	No Histéresis
07/05/08	7,44	9,22	0,98	0,06	0,22	63	Horaria
10/05/08	6,34	6,98	1,13	0,02	0,09	27	Horaria
13/05/08	6,66	7,68	0,94	0,08	0,25	80	Antihoraria
14/05/08	14,28	18,58	2,24	1,08	3,89	2.562	No Histéresis
16/05/08	23,22	32,52	2,82	1,41	6,58	4.654	Horaria
17/05/08	22,61	35,32	1,23	3,61	9,69	4.621	Antihoraria
23/05/08	33,44	72,45	14,36	1,79	10,06	30.866	Horaria

^a Caudal medio de la crecida^b Caudal pico de la crecida^c Concentración de sedimentos en suspensión media de la crecida^d Concentración de sedimentos en suspensión máxima de la crecida^e Exportación total de sedimentos en suspensión de la crecida

ocurrir anualmente, ya que dependerá de las características de la precipitación (y su distribución espacial) y la generación de caudales competentes.

La Tabla 2 y la Figura 6 muestran los resultados de los muestreos realizados para cada sección de muestreo y estación expresados en g/cm². Los autores son conscientes de los posibles problemas y errores derivados de la naturaleza manual de la metodología, así como de otras limitaciones de campo que pueden producir alguna desviación sobre el material almacenado realmente. Por ejemplo, observaciones hechas en el propio campo

indican que durante el proceso de agitación existen pérdidas de sedimentos debidas al imperfecto sellado entre el cilindro y el lecho o debidas a la rápida sedimentación del material más fino. A pesar de estas limitaciones, algunas tendencias consistentes pueden ser observadas. Primero, se puede comprobar la existencia de una considerable variación de los sedimentos acumulados entre las diferentes secciones de muestreo y los 2 niveles de agitación, lo que refleja la alta variabilidad tanto en el material del lecho como en las acumulaciones de finos en el cauce (e.g., Lambert y Walling, 1988). Por otro lado, el nivel de agitación N1 representa el sedimen-

to fino que puede ser resuspendido durante crecidas de pequeña entidad, poco competentes desde el punto de vista del transporte de la carga de fondo, mientras que N2 representa el sedimento fino que solamente puede ser removido durante crecidas de mayor magnitud, en las cuales la matriz de gravas del lecho se convierte en inestable, es decir, aquellas que son capaces de superar la tensión de inicio de movimiento. No obstante, debido a que para el presente estudio no se tuvo suficiente información de campo como para definir los umbrales de resuspensión del sedimento fino asociados a diferentes magnitudes de crecidas, no se pudo identificar con precisión qué nivel de agitación del lecho es el más adecuado para inferir la acumulación sedimentaria anual de las secciones de muestreo. Este motivo, junto con la alta variabili-

dad existente entre niveles de agitación (N1, N2) hizo que, para posteriores cálculos, se utilizase el valor medio de ambos como valor de acumulación de sedimentos en el lecho. Además de esto, existe una clara tendencia estacional en la acumulación media de sedimentos para cada sección de muestreo y en ambos niveles de agitación, incrementando progresivamente de verano a invierno, pero con una drástica reducción en primavera, que fue la estación más lluviosa y en la que ocurrieron la mayoría de las crecidas.

Los resultados de la Tabla 2 indican que los valores de sedimentos almacenados obtenidos en todas las secciones de muestreo ponen de manifiesto una considerable variabilidad espacial y temporal, variando las medias desde 0,026 hasta 0,75 g/cm². Estos valores

Tabla 2. Medias estacionales de acumulación de finos en el lecho para cada sección de muestreo (n = 5 para S1 y S3; n = 3 para S2 y S4; donde n es el número de puntos de muestreo en cada sección) y niveles de agitación del lecho (ver texto para una mayor descripción).

Table 2. Mean seasonal in-channel fine accumulation for each sampled section (n= 5 for S1 and S3; n= 3 for S2 and S4; where n is the number of sampling points at each section) and agitation level (see text for a detailed description).

Estación	Sección	N1 ^a (g/cm ²)	N2 ^b (g/cm ²)	Media ^c (g/cm ²)	σ ^d (g/cm ²)	CV ^e (%)
Verano	S1	0,005	0,049	0,027	0,032	117
	S2	0,009	0,053	0,031	0,031	100
	S3	0,007	0,078	0,043	0,050	117
	S4	0,006	0,215	0,111	0,147	133
	Media	0,007	0,099	0,053	0,065	122
	σ	0,002	0,079	0,039	0,055	141
Otoño	S1	0,013	0,128	0,070	0,081	115
	S2	0,006	0,056	0,031	0,035	115
	S3	0,009	0,162	0,085	0,108	127
	S4	0,004	0,092	0,048	0,063	131
	Media	0,008	0,109	0,059	0,072	122
	σ	0,004	0,046	0,024	0,031	129
Invierno	S1	0,362	1,130	0,746	0,543	73
	S2	0,016	0,101	0,059	0,060	102
	S3	0,057	0,255	0,156	0,140	90
	S4	0,034	0,844	0,439	0,572	130
	Media	0,118	0,583	0,349	0,329	94
	σ	0,164	0,485	0,309	0,267	86
Primavera	S1	0,023	0,030	0,026	0,005	19
	S2	0,045	0,055	0,050	0,007	14
	S3	0,007	0,107	0,057	0,071	124
	S4	0,009	0,104	0,057	0,067	117
	Media	0,021	0,074	0,047	0,038	81
	σ	0,017	0,038	0,014	0,036	257

^a Nivel de agitación superficial

^b Nivel de agitación superficial y subsuperficial

^c Promedio de los 2 niveles de agitación

^d Desviación estándar

^e Coeficiente de variación

obtenidos se pueden utilizar para comparar con los valores obtenidos en otros ríos por otros autores. Por ejemplo, Lambert y Walling (1988) encontraron que la media de los sedimentos acumulados el lecho del río Exe, Reino Unido, variaba entre 0,017 (N1, agitación del agua solamente) y 0,04 g/cm² (N2, agitación del agua y el lecho). Walling *et al.* (1998) encontraron una considerable variabilidad en los valores medios de finos almacenados, variando entre 0,017 (N1) y 0,92 g/cm² (N2) en cuatro ríos de Yorkshire, Reino Unido. Walling y Quine (1993) estimaron una elevada variación en la acumulación en el lecho del cauce principal del río Severn, Reino Unido, variando entre 0,063 y 8 g/cm². Finalmente, Droppo y Stone (1994) calcularon que la acumulación de sedimentos en el lecho fluctuaba entre 0,066 y 0,22 g/cm² en tres ríos en el SO de Ontario, Canadá.

Los resultados presentados en la Tabla 3 y la Figura 7 tras expresarlos por unidad de longitud de cauce (t/km), sugieren una tendencia al incremento de la acumulación de sedimentos aguas abajo, con solo dos excepciones: S3 en otoño y S2 en invierno. Esta tendencia espacial puede ser relacionada con el incremento en anchura del cauce que implica una reducción la capacidad de transporte, la cual, a su vez, puede aumentar la deposición de sedimentos y el almacenamiento por unidad de superficie. Otra tendencia evidente se puede derivar de los datos de campo: los sedimentos almacenados en el lecho (por unidad de longitud del cauce) incrementan estacionalmente desde verano hasta invierno y se reducen bruscamente en primavera, después de un período de grandes crecidas (Figuras 5 y 6). Esta observación sugiere que el río Isábena puede llegar a alcanzar la capacidad máxima de transporte durante ciertos períodos del año (i.e., estación del deshielo, que transportó aproximadamente el 80% de la escorrentía total del período y generó un pico de caudal de 79 m³/s, el más elevado del período de estudio) y que los sedimentos finos son depositados y acumulados en lugares del cauce donde las condiciones del flujo no son suficientemente competentes como para

mantenerlo en suspensión. Características similares se pueden encontrar entre los datos del Isábena y aquellos publicados por Walling *et al.* (1998) para el río Ouse (Reino Unido), donde el almacenamiento de sedimentos finos representa una parte muy importante del balance de sedimento anual. El valor promedio de la acumulación de sedimentos en el cauce en el Isábena es de 55 t/km, con un máximo de 297 t/km, mientras que en el Ouse el promedio fue de 48 t/km con un máximo de 204 t/km, aunque estas cifras están relacionadas con la anchura del lecho.

4.3. Efectos de la acumulación de finos sobre el transporte de sedimentos

La estimación del almacenamiento de sedimentos permite realizar comparaciones con la exportación de sedimentos en la salida de la cuenca para el período de estudio (i.e., año 2007-2008, condiciones hidrológicas medias). Previamente a abordar dicha comparación, es importante considerar la representatividad temporal y espacial de la estimación de los sedimentos acumulados en el cauce. El almacenamiento se ha derivado a partir del muestreo realizado al final de cada estación, por lo que los datos de almacenamiento estacional deben ser interpretados como valores netos, reflejando tanto la secuencia de crecidas que resuspenden sedimentos como períodos de caudales bajos donde se produce acumulación. Además de esto, no se conoce la profundidad exacta hasta la que los sedimentos se acumulan en la matriz de gravas y, por lo tanto, no se sabe claramente como de representativos son los niveles de agitación para la estimación de los sedimentos almacenados.

Finalmente, los experimentos se han realizado en diversos puntos de muestreo (de 3 a 5) de cada una de las 4 secciones del tramo bajo del Isábena, cubriendo una fracción determinada de la longitud total del cauce (i.e., 3,125 km aguas arriba de la estación de aforo de Capella). Es bien sabido que el balance de sedimentos está influenciado por la contribución sedimentaria de toda la cuenca, no solamente del tramo bajo y, a consecuen-

Tabla 3. Acumulación total de sedimentos en el bajo Isábena para cada una de las estaciones del año. Se muestra también el máximo caudal registrado durante cada estación así como el período de retorno de este caudal como información adicional.

Table 3. Total sediment accumulation in the lower Isábena river for each season of the year. Additionally, the maximum discharge recorded during each season and the return period of this discharge is also shown.

Estación	Sección	AT ^a (t)	AE ^b (t/km)	Q _{max} (m ³ /s)	Período retorno (años)
Verano	S1	5	11	16.72	0.61
	S2	20	16		
	S3	44	40		
	S4	17	67		
	Total	87	28		
Otoño	S1	9	20	8.43	0.54
	S2	35	27		
	S3	44	39		
	S4	8	32		
	Total	96	31		
Invierno	S1	70	159	9.22	0.55
	S2	65	50		
	S3	199	177		
	S4	74	297		
	Total	408	130		
Primavera	S1	7	15	78.74	1.46
	S2	33	25		
	S3	39	35		
	S4	10	40		
	Total	88	28		
	Media	170	55	3.16	0.51

^a Sedimentos finos acumulados totales por estación y sección

^b Sedimentos finos acumulados específicos (relativos a la longitud del cauce) por estación y sección

cia de esto, la variabilidad espacial puede ser considerable. Numerosos estudios (e.g., Lambert y Walling, 1988; Diplas y Parker, 1992; Meade, 1994; Walling *et al.*, 1998) han informado sobre las grandes y complicadas variaciones espaciales existentes en el almacenamiento de sedimentos en el lecho, por lo que las extrapolaciones presentadas en este estudio para el resto de la red de drenaje tienen que ser tratadas con precaución. Para estimar los sedimentos acumulados en todo el cauce principal del Isábena, se ha extrapolado el valor medio de los sedimentos acumulados por unidad de longitud de lecho a los 45 km que tienen el tronco principal, asumiendo la incertidumbre que puede acompañar a esta extrapolación.

La Tabla 4 compara los valores de acumulación de sedimentos obtenidos en el tramo de estudio, así como la extrapolación a la totali-

dad del tronco principal con el transporte de sedimentos en suspensión calculado a partir de los datos de la estación de aforo EA047, tanto para cada estación como para todo el período de estudio. Una acumulación progresiva de sedimentos finos en la totalidad del lecho del río puede ser observada a medida que avanza el año (Figura 7) debido a la ausencia de precipitaciones capaces de generar caudales elevados que removilicen los sedimentos así como por el elevado y continuo suministro de sedimento. Esta acumulación se redujo rápidamente a niveles similares a aquellos medidos al inicio del período de muestreo tras las grandes crecidas ocurridas en primavera. De acuerdo con los datos de campo, parece que el almacenamiento de sedimentos en el cauce en el río Isábena sigue un patrón cíclico: los sedimentos que son generados a lo largo del año (especialmente en la época invernal) en las áreas

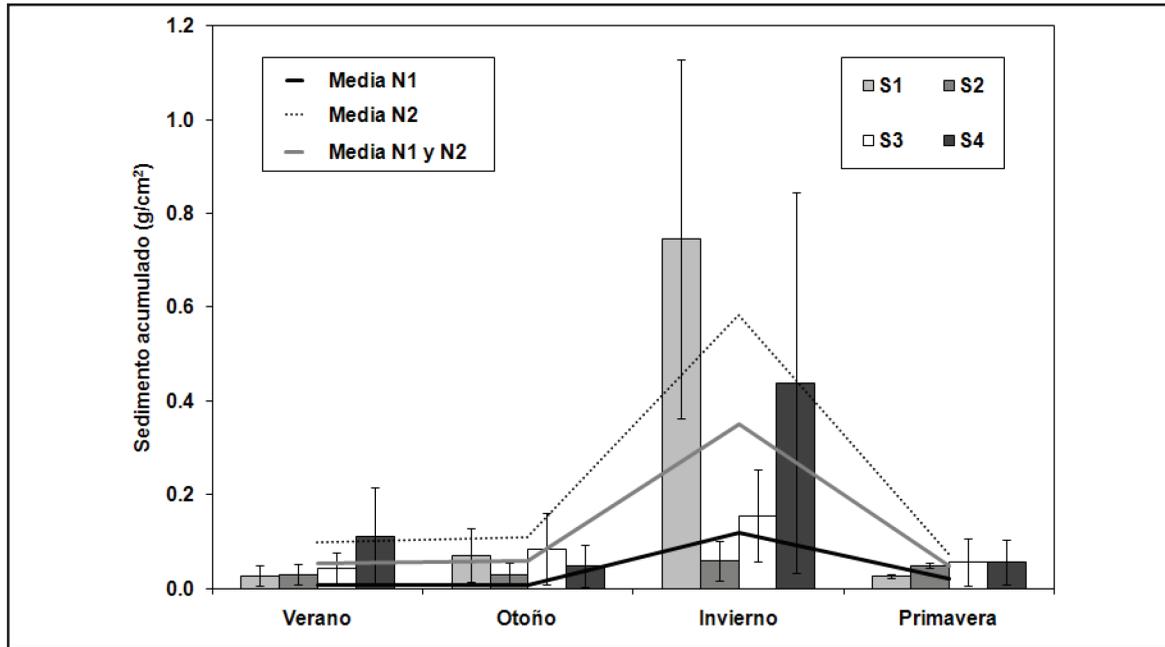


Figura 6. Resultados obtenidos a través de los muestreos de la acumulación de sedimentos en el lecho para cada estación, sección de muestreo y nivel de agitación (ver texto para más información).

Figure 6. Obtained results from the in-channel sediment accumulation samplings for each season, sampling section and agitation level (see text for more information).

fuentes (*badlands*) son episódicamente exportados y depositados en el lecho del río durante los caudales bajos (e.g., períodos entre crecidas, pequeñas crecidas, caudales base, recesiones de crecidas) hasta que nuevos caudales altos los resuspenden y transportan aguas abajo. Debido a las condiciones mediterráneas de la cuenca (i.e., distribución irregular de la precipitación intra e inter-anual), el ciclo no es regular en el tiempo y es difícil establecer en qué estaciones predomina la acumulación o la resuspensión. A pesar de esta limitación, los datos muestran como el tronco principal del río actúa como un compartimento temporal de sedimentos (con una marcada dinámica de sumidero-fuente) localizado entre las áreas fuente y la salida de la cuenca. Este proceso parece que module el transporte de sedimentos del río y la capacidad de transporte asociada, así como el balance de sedimentos en una cuenca de escala intermedia, donde las fuentes están alejadas de la salida de la cuenca y el suministro de sedimentos es muy elevado y continuo en el tiempo.

En el caso del Isábena, los sedimentos acumulados estacionalmente en los ~3 km de cauce muestreado equivale prácticamente al 4% de la carga total de sedimentos transportada en invierno, mientras que representa un 0,3% de la carga total anual. La extrapolación a la totalidad del tronco principal (i.e., 45 km) sugiere que los sedimentos almacenados se incrementan en más de 1 orden de magnitud, alcanzando el 55% de la carga sedimentaria del invierno y el 5% de la carga total anual, aunque esta asunción requeriría confirmación mediante mediciones de la acumulación en tramos intermedios y de cabecera.

Los datos de acumulación de sedimentos presentados en el presente trabajo son comparables a los niveles de almacenamiento estimados en otras cuencas. Por ejemplo, Lambert y Walling (1988) estimaron que la acumulación del lecho representaba alrededor del 2% de la carga sedimentaria total del río Exe en el Reino Unido. Walling y Quine (1993) publicaron que, en el río Severn (Reino Unido), el almacenamiento del lecho

representaba el 2% de la exportación de sedimentos, mientras que Walling *et al.* (1998) encontraron que la acumulación de sedimentos suponía un 10% de la carga total anual de las cuencas de los ríos Ouse y Wharfe, en el Reino Unido.

4.4. Dinámica durante crecidas y relación con la acumulación de finos

La dinámica sedimentaria ha sido analizada de manera individual para cada uno de los episodios de crecida, mediante el estudio de sus curvas de histéresis, y de manera general para todo el periodo mediante el estudio de la variabilidad temporal del TSS. Además de esto, se han estudiado los posibles efectos que tiene el almacenamiento de sedimentos en el lecho sobre la dinámica sedimentaria del río Isábena.

El análisis de las histéresis de las 27 crecidas del período de estudio (Tabla 1) ha sido realizado siguiendo la metodología publicada por Williams (1989). Este método se basa en el análisis de la relación temporal entre los picos del hidrograma y del sedimentograma de cada una de las crecidas. De este modo, las curvas de histéresis (relación sincrónica entre caudal y concentración de sedimentos en suspensión) pueden ser de sentido horario

(i.e., el pico del sedimentograma está adelantado respecto del hidrograma) o antihorario (i.e., el pico del hidrograma está adelantado respecto del sedimentograma). En el caso de que ambos picos estén sincronizados en el tiempo se dice que no existe histéresis, el patrón es lineal y la magnitud de los procesos está directamente controlada por la energía del flujo (competencia). Habitualmente, el comportamiento histerético viene definido por la situación de los sedimentos dentro de la cuenca, con curvas horarias si los sedimentos están localizados cerca de la sección de medida y curvas antihorarias si los sedimentos están alejados de esta sección. En el caso del Isábena, durante el período de estudio, y a la escala anual, no se observa dominancia de ningún tipo de histéresis; 11 crecidas presentaron ciclos de histéresis horarios mientras que otras 11 presentaron ciclos de histéresis antihorarios (Tabla 5). Las diferencias se obtienen al reducir la escala temporal; en la escala estacional se puede comprobar que, tanto en verano como en invierno predominaron las crecidas con histéresis antihorarias, mientras que en primavera las predominantes fueron las crecidas con histéresis horarios (Tabla 5). En otoño no se observan tendencias, ya que se registraron prácticamente las mismas crecidas de cada uno de los 2 tipos (Tabla 5).

Tabla 4. Comparación de los valores de acumulación obtenidos en el río Isábena con los valores de transporte calculados para la salida de la cuenca (i.e., EA047).
Table 4. Comparison of the accumulation values obtained in the Isábena river with the sediment transport values calculated at the outlet of the basin (i.e., EA047).

Estación	Precipitación (mm)	TSS ^a (t)	AT ^b (t)	AT/TSS ^c (%)	AT _{ext} ^d (t)	AT _{ext} /TSS ^e (%)
Verano	99	19.617	87	0.44	1.260	6.42
Otoño	86	12.327	96	0.78	1.395	11.32
Invierno	109	10.827	408	3.77	5.895	54.45
Primavera	451	166.788	88	0.05	1.260	0.76
Total	745	209.559	679	0.32	9.810	4.68

^a Exportación total de sedimentos de la cuenca

^b Sedimentos finos acumulados totales

^c Relación entre los sedimentos totales exportados y los valores de acumulación calculados para las secciones de muestreo

^d Valores de acumulación obtenidos tras la extrapolación de los valores medidos en cada sección a la totalidad de la longitud del cauce (45 km)

^e Relación entre los sedimentos totales exportados y los valores de acumulación calculados para la totalidad del cauce (45 km, tronco principal)

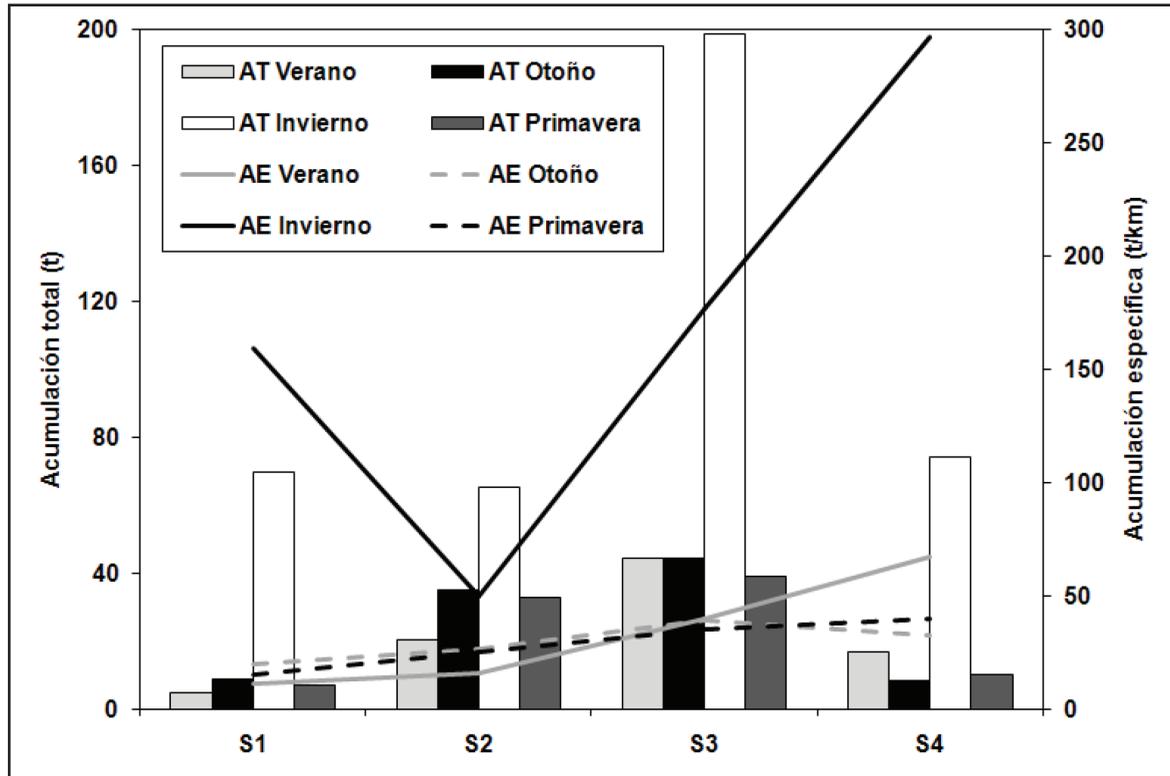


Figura 7. Acumulación total (AT) y acumulación específica (AE; i.e., por unidad de longitud del cauce) para cada sección de muestreo y estación. Los resultados presentados para cada sección están basados en el promedio obtenido por los dos niveles de agitación.

Figure 7. Total accumulation (AT) and specific accumulation (AE; i.e., per channel-length unity) for each sampling section and season. Results presented for each section are based in the average obtained for the 2 agitation levels.

Este comportamiento coincide con la tendencia observada de acumulación de sedimentos en la cuenca y remarca el papel que estas acumulaciones tienen sobre la dinámica sedimentaria: en las estaciones en las que se ha registrado un aumento en la acumulación de sedimentos (verano, otoño e invierno) o bien predominan las crecidas antihorarias o bien no existe un predominio claro de ninguno de los dos tipos. El comportamiento antihorario puede explicarse de dos maneras: i) los sedimentos y la precipitación están localizados en la cabecera de la cuenca. En estas crecidas se genera una escorrentía muy elevada, pero el TSS es relativamente bajo; ii) la precipitación está repartida por toda la cuenca (e.g., el pico de la lluvia de la zona baja nunca es simultáneo ni igual al pico de lluvia de la zona de cabecera; en algunos casos está retrasado res-

pecto del pico de la zona alta, en otros casos es mucho más elevado y, en otros casos, está retrasado y además es mucho más elevado) y, por lo tanto, los sedimentos en suspensión no provienen exclusivamente de cabecera. La escorrentía generada por estas avenidas es relativamente baja, pero el TSS es extremadamente elevado. En ambos casos, debido a la reducción de la capacidad de transporte de la zona baja de la cuenca (i.e., pérdida de pendiente longitudinal, incremento de anchura del valle) se genera una acumulación de sedimentos que no alcanza la salida de la cuenca.

Por otro lado se comprueba un predominio de la dinámica horaria en la primavera, que fue la estación en la que se produjo la máxima removilización de sedimentos (esta esta-

ción se inició con los niveles de acumulación más elevados del período de estudio), reduciéndose drásticamente los niveles de almacenamiento hasta valores similares a los iniciales del período de estudio. El comportamiento horario suele ser debido a la presencia de una gran acumulación de sedimentos cerca de la salida de la cuenca, que se ve removilizada cuando suceden precipitaciones de elevada magnitud y, especialmente, localizadas en las zonas donde está acumulado los sedimentos (parte baja de la cuenca). En este caso coincidieron dos de los condicionantes para que se produzcan crecidas horarias: niveles de almacenamiento de sedimentos elevado cerca de la salida de la cuenca y precipitaciones de elevada magnitud e intensidad que generaron crecidas capaces de resuspender y transportar todos los sedimentos que se habían acumulado a lo largo del año. De este modo, se puede hipotetizar que el comportamiento tan diferente de la cuenca, en relación a la dinámica sedimentaria para cada crecida, expresada por las curvas de histéresis, indica que el cauce del río Isábena desarrolla un papel muy importante en cuanto al control del TSS: el cauce controla el transporte, actuando algunas veces como la fuente de sedimentos (crecidas con histéresis horarias) y otras veces como sumidero de los sedimentos (crecidas con histéresis antihorarias).

Habitualmente, en cuencas altamente erosionadas como la del Isábena y con similares

características litológicas y geológicas (e.g., presencia de materiales no consolidados, etc.) el TSS sigue un patrón temporal relacionado con la disponibilidad de los sedimentos a lo largo del año (e.g., procesos erosivos sujetos a un fuerte control estacional; procesos de meteorización o erosión debida a fuertes tormentas estivales) (Clotet y Gallart, 1986; Balasch *et al.*, 1992; Gallart *et al.*, 2005). En la cuenca del Isábena no se ha encontrado ningún tipo de patrón temporal de transporte relacionado con la generación de los sedimentos en suspensión (e.g., procesos erosivos), sino que se ha observado un TSS dependiente de la precipitación. Esto es que, independientemente de los procesos de generación de los sedimentos, estos no pueden ser transportados hasta que una precipitación importante genere una crecida de suficiente magnitud como para transportarlos. Mientras que esta precipitación no suceda, los sedimentos se van acumulando, estando totalmente dispuestos para ser movidos cuando esta lluvia acaezca. Esta razón, añadida a la elevada erosión, genera que la estación más lluviosa sea la que mayor TSS produce (primavera, 451 mm). El resto de estaciones, con unos valores de precipitación similares entre ellos, generaron también un TSS muy similar (Tabla 4), reforzando la idea anterior de la dependencia de la precipitación y remarcando la importancia de la gran cantidad de sedimentos que se acumulan en la cuenca.

Tabla 5. Distribución de los distintos tipos de histéresis encontrados para cada estación, así como la relación con el número total de eventos ocurridos.

Table 5. Distribution of the different hysteresis types found for each season, as well as the relation with the total number of occurred events.

Estación	Horaria	Ratio ^a (%)	Antihoraria	Ratio ^b (%)	No histéresis	Ratio ^c (%)	Total
Verano	1	20	3	60	1	20	5
Otoño	4	57	3	43	0	0	7
Invierno	0	0	3	75	1	25	4
Primavera	6	55	2	18	3	27	11
Total	11	41	11	41	5	18	27

^a Relación entre crecidas con histéresis horarias y la totalidad de crecidas registradas

^b Relación entre crecidas con histéresis antihorarias y la totalidad de crecidas registradas

^c Relación entre crecidas sin histéresis y la totalidad de crecidas registradas

5. Conclusiones

El presente trabajo analiza el transporte de sedimentos en suspensión y la dinámica sedimentaria de la cuenca del río Isábena (i.e., entorno altamente erosivo, con una geología y litología muy característica, destacando la presencia de morfologías de tipo *badland*) así como la acumulación de sedimentos finos en el cauce del río en un tramo de unos 3 km en el tramo bajo del Isábena. A pesar de la incertidumbre de la metodología, debida principalmente a: i) la elevada variabilidad lateral, tanto en la propia sección como entre secciones, de las concentraciones medidas que puede incluso superar el orden de magnitud, y ii) el bajo número de datos obtenidos por cada una de las estaciones climáticas, así como de las extrapolaciones realizadas, se ha examinado la magnitud del almacenamiento de sedimentos así como su variabilidad temporal, subrayando la importancia que la acumulación de sedimentos en el cauce tiene sobre el balance sedimentario de la cuenca. Las principales conclusiones del estudio son:

1) Los sedimentos en suspensión transportados durante el período de estudio, que puede ser considerado hidrológicamente medio en comparación con los valores obtenidos durante los últimos años de monitoreo, fueron de 209.559 t, representando una tasa de exportación específica de sedimentos de 471 t/km²·año. Estos valores pueden considerarse como elevados, si se comparan con los publicados por otros autores en cuencas similares, más aún si se tienen en cuenta las dimensiones de la cuenca.

2) El almacenamiento total en el tramo bajo del río y para el período de estudio fue de 679 t, valor que representa un 0,32% de la exportación de sedimentos anual de la cuenca. Este almacenamiento varió desde 88 t en primavera hasta 408 t en invierno representando, respectivamente, un 0,05 % y un 3,77% de la exportación sedimentaria calculada para esas estaciones.

3) Al extrapolar los valores estacionales obtenidos directamente del muestreo a la totalidad del tronco principal (i.e., 45 km) se observa que el almacenamiento total puede incrementarse hasta 9.810 t (4,68 % de la carga total), mientras que el almacenamiento estacional aumenta desde 1.260 t en primavera hasta 5.895 t en invierno (i.e., 0,76% y 54,45% de la carga sedimentaria de la estación, respectivamente).

4) Los efectos del almacenamiento de sedimentos sobre la dinámica sedimentaria han sido examinados mediante el estudio de las curvas de histéresis de las crecidas ocurridas. Se puede observar una predominancia de crecidas con histéresis antihorarias en aquellas estaciones del año en las que se produce un incremento de los sedimentos acumulados (i.e., verano, otoño e invierno) mientras que las crecidas con histéresis horarias fueron las predominantes en la estación en la que se produjo una reducción drástica en el almacenamiento (i.e., primavera). De este modo, el cauce del río Isábena actúa unas veces como fuente de sedimentos (i.e., primavera, crecidas con histéresis horaria) y otras como sumidero (i.e., resto de estaciones del año, crecidas con histéresis antihorarias).

Este estudio hace hincapié en la importancia que tiene el estudio del movimiento de los sedimentos a través del sistema fluvial para la determinación e interpretación de los flujos y la exportación sedimentaria aguas abajo. Así mismo, se remarca la necesidad de mejorar e incrementar la investigación sobre las mediciones directas en campo de cuantificación de la acumulación de sedimentos y el trazado de los sedimentos en cuencas como la del río Isábena, donde el tamaño de la cuenca, así como el tipo y la distribución espacial de las fuentes de sedimentos son proclives a incrementar la proporción de sedimentos acumulados en el cauce impactando, de este modo, sobre la frecuencia y la magnitud de los balances de sedimentos.

Agradecimientos

El primer autor, durante la realización de este trabajo, disfrutó de una beca del Gobierno de Cataluña y el Fondo Social Europeo, mientras que el segundo autor disfruta de una beca predoctoral financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia (Programa FPI 2007-2011), y el tercer un contrato Ramón y Cajal (RYC-2010-06264) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha suministrado los datos hidrológicos. El estudio se ha realizado en el marco del proyecto internacional titulado "Sediment Export from Large Semi-Arid Catchments: Measurements and Modelling" (SESAM), subvencionado por el *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (DFG) y del proyecto SCARCE Consolider Ingenio 2010 CSD2009-00065 financiando por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecen la ayuda prestada tanto en el trabajo de campo como en el laboratorio por Alberto Sánchez, Nuria Bonastre y Sabina Márquez. Finalmente, se agradece a los revisores J.C. Balasch y J.M. Verdú, cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar el artículo.

Bibliografía

- Acornley, R.M.; Sear, D.A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes*, 13, 447-458.
- Avendaño, C.; Cobo, R.; Sanz, M.E.; Gómez, J.L. (1997a). Capacity situation in Spanish reservoirs. *Proceedings of the Nineteenth Congress on Large Dams*, 74, 849-862.
- Avendaño, C.; Sanz, M.E.; Cobo, R.; Gómez, J.L. (1997b). Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationships with the drainage basin area. *Proceedings of the Nineteenth Congress on Large Dams*, 74, 863-874.
- Balasch, J.C.; Castelltort, F.X.; Llorens, P.; Gallart, F. (1992). Hydrological and sediment dynamics network design in a Mediterranean mountainous area subject to gully erosion. In: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins* (J. Bogen, J. ; D.E. Walling ; T. Day, eds.), IAHS Publication, 210, 433-442.
- Balasch, J.C.; Batalla, R.J.; Poch, R.M.; Vericat, D. (2005). Patterns of suspended sediment transport in two forested Mediterranean mountainous catchments (Ribera Salada, Catalan Pyrenees, Spain). In: *Geomorphological Processes and Human Impacts in Rivers Basins* (R.J. Batalla; C. García, eds.). Wallingford, IAHS Publication, 299, 132-142.
- Batalla, R.J.; Sala, M.; Werritty, A. (1995). Sediment budget focused in solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39 (2), 249-269.
- Batalla, R.J.; García, C.; Balasch, J.C. (2005). Total sediment load in a Mediterranean mountainous catchment (the Ribera Salada River, Catalan Pre-Pyrenees, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49 (4), 495-514.
- Clarke, S.J.; Wharton, G. (2001). Sediment nutrient characteristics and aquatic macrophytes in lowland English rivers. *The Science of the Total Environment*, 266, 103-112.
- Clotet, N.; Gallart, F. (1986). Sediment yield in a mountainous basin under high Mediterranean climate. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 60, 205-216.
- Collins, A.L.; Walling, D.E. (2007). Fine-grained bed sediment storage within the main channel systems of the Frome and Piddle catchments, Dorset, UK. *Hydrological Processes*, 21, 1448-1459.
- Diplas, P.; Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. In: *Dynamics of Gravel-bed rivers* (P. Billi; C.R. Thorne; P. Tacconi, eds.), Wiley, Chichester, 313-329.
- Droppo, L.G.; Stone, M. (1994). In-channel surficial fine-grained sediment laminae, Part I. Physical characteristics and formation processes. *Hydrological Processes*, 8, 101-111.
- Francke, T.; López-Tarazón, J.A.; Schröder, B. (2008a). Estimation of suspended sediment concentration and yield using linear models, random forests and quantile regression forests. *Hydrological Processes*, 22, 4892-4904.
- Francke, T.; López-Tarazón, J.A.; Vericat, D.; Bronstert, A.; Batalla, R.J. (2008b). Flood-based analysis of high-magnitude sediment transport using a non-parametric method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 2064-2077.
- Gallart, F.; Balasch, J.C.; Regüés, D.; Soler, M.; Castelltort, F. (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. In: *Catchment dynamics and river processes: Mediterranean and other climate regions* (C.García; R.J. Batalla, eds.). Developments in Earth Surface Processes. Elsevier publication 7: 17-29.
- Hodgkins, R.; Cooper, R.; Wadham, J.; Tranter, M. (2003). Suspended sediment fluxes in a high-Artic glacierised catchment: implications for fluvial sediment storage. *Sedimentary Geology*, 162, 105-177.
- Jordan, P.; Slaymaker, O. (1991). Holocene sediment production in Lillooet River basin, British Columbia: a sediment budget approach. *Géographie physique et Quaternaire*, 45, 45-57.
- Lambert, C.P.; Walling, D.E. (1988). Measurements of channel storage of suspended sediment in a gravel-bed river. *Catena*, 15, 65-80.
- Lawler, D.M. (2005). Spectrophotometry: turbidimetry and nephelometry. *Encyclopedia of analytical science*, 2nd edition. Elsevier, Academic Press, 343-351.

- Lawler, D.M.; Petts, G.E.; Foster, I.D.L.; Harper, S. (2006). Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Science of the Total Environment*, 360, 109-126.
- López-Tarazón, J.A.; Batalla, R.J.; Vericat, D.; Francke, T. (2009). Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, 109, 210-221.
- López-Tarazón, J.A.; Batalla, R.J.; Vericat, D.; Balasch, J.C. (2010). Rainfall, runoff and sediment transport relations in a mesoscale mountainous catchment: The River Isábena (Ebro basin). *Catena*, 82, 23-34.
- López-Tarazón, J.A.; Batalla, R.J.; Vericat, D. (2011a). In-channel sediment storage in a highly erodible catchment: The River Isábena (Ebro basin, Southern Pyrenees). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55(3), 365-382.
- López-Tarazón, J.A.; Batalla, R.J.; Vericat, D.; Francke, T. (2011b). The sediment budget of a highly dynamic mesoscale catchment: The River Isábena. *Geomorphology*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08>.
- Loughran, R.J.; Campbell, B.L.; Shelley, D.J.; Elliot, G.L. (1992). Developing a sediment budget for a small drainage basin in Australia. *Hydrological Processes*, 6, 145-158.
- Meade, R.H. (1994). Suspended sediment of the modern Amazon and Orinoco Rivers. *Quaternary International*, 21, 29-39.
- Nadal-Romero, E.; Latron, J.; Martí-Bono, C.; Regúes, D. (2008). Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: the Araguás catchment, central Pyrenees. *Geomorphology*, 97, 601-616.
- Navas, A.; Valero, B.; Machín, J.; Walling, D. (1998). Los sedimentos del embalse Joaquín Costa y la historia de su depósito. *Limnética*, 14, 93-112.
- Owens, P.N.; Walling, D.E.; He, Q.; Shanahan, J.; Foster, I.D.L. (1997). The use of caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start catchment, Devon, UK. *Hydrological Sciences Journal*, 42, 405-423.
- Packman, A.I.; Mackay, J.S. (2003). Interplay of stream-subsurface exchange, clay deposition and stream bed evolution. *Water Resources Research*, 39, 41-49.
- Phillips, J.D. (1991). Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont. *Geomorphology*, 4, 231-241.
- Quinn, J.M.; Davies-Colley, R.J.; Hickey, C.W.; Vickers, M.L.; Ryan, P.A. (1992). Effects of clay discharge on streams, 2: benthic invertebrates. *Hydrobiologia*, 248, 235-247.
- Regúes, D.; Soler, M.; Gallart, F. (2002). Influencia del tamaño de las partículas sobre la estimación de concentraciones de sedimento en suspensión mediante turbidímetros de retro-dispersión. En: Estudios recientes (2000-2002) en *Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial* (E. Serrano; A. García de Celis; J.C. Guerra; C.G. Morales; M.T. Ortega, eds.). Universidad de Valladolid, Sociedad Española de Geomorfología, 239-252.
- Rovira, A.; Batalla, R.J. (2006). Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE Spain). *Geomorphology*, 79, 58-71.
- Sanz-Montero, M.; Cobo-Rayán, R.; Avendaño-Salas, C.; Gómez-Montaña, J. (1996). Influence of the drainage basin area on the sediment yield to Spanish reservoirs. In: *Proceedings of the First European Conference and Trace Exposition on Control Erosion*. International Erosion Control Association IECA, Sitges.
- Smith, H.G.; Dragovich, D. (2008). Sediment budget analysis of slope-channel coupling and in-channel sediment storage in an upland catchment, southeastern Australia. *Geomorphology*, 101, 643-654.
- Trimble, S.W. (1983). A sediment budget for Croon Creek basin in the Driftless area, Wisconsin, 1853-1977. *American Journal of Sciences*, 283, 454-474.
- Valero-Garcés, B.L.; Navas, A.; Machín, J.; Walling, D.E. (1999). Sediment sources and siltation in mountain reservoirs: a case study from the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 28, 23-41.
- Vente, J. de; Poesen, J.; Bazzoffi, P.; Van Rompaey, A.; Verstraeten, G. (2006). Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1017-1034.
- Verdú, J.M.; Batalla, R.J.; Martínez-Casasnovas, J.A. (2007). Estudio hidrológico de la cuenca del río Isábena (Cuenca del Ebro). I: Variabilidad de la precipitación. *Ingeniería del Agua*, 13(4), 321-330.
- Vericat, D.; Batalla, R.J. (2010). Sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream. *Catena*, 82, 77-86.
- Walling, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65, 209-237.
- Walling, D.E.; Amos, C.M. (1999). Source, storage and mobilisation of fine sediment in a chalk stream system. *Hydrological Processes*, 13, 323-340.
- Walling, D.E.; Quine, T.A. (1993). Using Chernobyl-derived radionuclides to investigate the role of downstream conveyance losses in the suspended sediment budget of the River Severn, United Kingdom. *Physical Geography*, 14, 239-253.
- Walling, D.E.; Owens, P.N.; Leeks, G.J.L. (1998). The role of channel and floodplain storage in the suspended sediment budget of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Geomorphology*, 22, 225-242.
- Williams, G.P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events

- in rivers. *Journal of Hydrology*, 111(1-4), 89-106.
- Wilson, A.J.; Walling, D.E.; Leeks, G.J.L. (2004). In-channel storage of fine sediment in rivers of south-west England. In: *Sediment transfer through the fluvial system* (V. Golosov; V., Belyaev; D.E. Walling, eds.), IAHS Publication, 288, 291-299.
- Wood, P.J.; Armitage, P.D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*, 21, 203-217.