



BALANCE DE SEDIMENTOS EN EL TRAMO BAJO DEL EBRO

Fluvial sediment budget in the lower Ebro River

Damià Vericat & Ramon J. Batalla

*Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl,
Universitat de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure 177. E-25198 Lleida, España
E-mail: dvericat@macs.udl.es - E-mail: rbatalla@macs.udl.es
Centre Tecnològic Forestal de Catalunya
Pujada del Seminari s/n. E-25280, Solsona, España*

Resumen: Las presas de Mequinenza, Riba-roja y Flix interrumpen la continuidad del transporte de sedimentos en el tramo bajo del río Ebro. Este estudio presenta el balance de sedimentos de este tramo fluvial a partir de mediciones regulares y durante crecidas de sedimento en suspensión y carga de fondo, aguas arriba y abajo de los embalses durante el período 2002-2004. La carga sólida total aguas arriba de la presa de Mequinenza es de $3,28 \times 10^6$ t, el 99% transportadas en suspensión. Aguas abajo de la presa de Flix la carga sólida total es de $0,91 \times 10^6$ t, casi el 60% en suspensión y el resto como carga de fondo. La diferencia en el patrón de transporte se explica tanto por la falta de suministro de sedimento fino aguas abajo de los embalses como por la magnitud de los caudales liberados desde las presas, que todavía conservan una notable competencia para la movilización y el transporte del material del lecho del río. Las tasas de carga de fondo indican una alta actividad sedimentaria en el cauce del Ebro, casi cuatro décadas después del cierre de las presas.

Palabras clave: presas, crecidas, carga sólida, sedimentos en suspensión, carga de fondo.

Abstract: Sediment transport continuity in the lower Ebro River is disrupted by the Mequinenza, Riba-roja and Flix Dams. This work presents the sediment budget of that river reach estimated from field measurements of suspended sediment and bedload taken regularly and during floods. Samples were collected upstream and downstream from the dams during the period 2002-2004. Total sediment load upstream from the dams is 3.28×10^6 t, of which 99% are transported in suspension. Downstream, the sediment load is 0.91×10^6 t, around 60% transported in suspension and the rest as bedload. Differences in the sediment-type load can be attributed both to the lack of fine sediment supply from upstream and to the magnitude of the flows released from the dams, which are competent enough to entrain and transport considerable amounts of the river's bed-material. Bedload transport demonstrates that the riverbed of the lower Ebro is still highly active four decades after dams' closure.

Keywords: dams, floods, sediment load, suspended sediment, bedload.

1. Introducción

Los ríos transportan agua y sedimentos de una manera continua desde la cabecera de las cuencas

hasta las áreas de deposición y son los responsables del equilibrio entre los procesos fluviales y marinos en las zonas deltaicas y costeras. En condiciones naturales los ríos tienden a mantener la morfo-



Damià Vericat y Ramon J. Batalla. Balance de sedimentos en el tramo bajo del Ebro. *Rev. C & G.*, 20 (1-2), 79-90.

logía en equilibrio dinámico ya que la cantidad de sedimentos exportados desde un sector determinado es similar a la procedente desde aguas arriba (Williams y Wolman, 1984). El movimiento de agua y sedimentos a lo largo del cauce y de la llanura de inundación controla, además de su morfología, el funcionamiento del río como ecosistema.

Las presas alteran el régimen hidrológico aguas abajo, modificando de esta manera numerosos procesos físicos y ecológicos, incluyendo el transporte de sedimentos y el intercambio de nutrientes (Poff *et al.*, 1997). Las alteraciones hidrológicas causadas por los embalses implican cambios en la frecuencia y magnitud de las avenidas, reducción de los caudales de base, modificación de los pulsos estacionales, y fluctuaciones artificiales de los caudales circulantes (Ward y Stanford, 1979; Petts, 1984; Ligon *et al.*, 1995; Ward y Stanford 1995; Kondolf, 1997). Las presas también interrumpen la continuidad del transporte de sedimentos causando cambios morfológicos en sectores aguas abajo así como en los ecosistemas deltaicos y costeros asociados (e.g., Kondolf y Mathews 1993). Las alteraciones del régimen fluvial y la retención de sedimentos comporta, generalmente, dos efectos aguas abajo. Por una parte, si los caudales liberados por las presas disponen de capacidad suficiente para movilizar regularmente los sedimentos del cauce y, además, el suministro de sedimentos desde afluentes es escaso, los procesos dominantes son, en primera instancia la incisión del lecho (e.g., Kondolf y Mathews, 1993; Kondolf, 1997; Shields *et al.*, 2000) y, posteriormente, el acorazamiento, y la revegetación de áreas anteriormente activas (e.g., Inbar, 1990; Church, 1995; Batalla *et al.*, 2005). Por el contrario, si los caudales liberados no son capaces de movilizar sedimentos que llegan periódicamente desde los tributarios de aguas abajo, el proceso dominante es la sedimentación (e.g., Wilcock *et al.*, 1996). Ambos procesos conllevan alteraciones ecológicas del sistema fluvial (e.g., pérdida de hábitat ictícola).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es el análisis del transporte y del balance de sedimentos en el tramo bajo del río Ebro. Se trata de un tramo de río altamente regulado en el que se ha estudiado el transporte de sedimentos aguas arriba y abajo de las presas durante el periodo 2002-2004, representativo del régimen de caudales post-embalses (1970-2004).

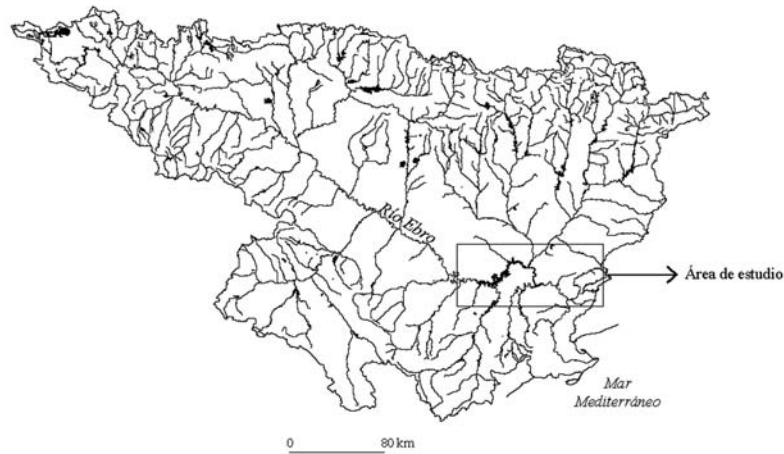
2. Área de estudio

La cuenca del Ebro drena 85.530 km² del noreste de la Península Ibérica. Desemboca en el mar Mediterráneo aguas abajo de Amposta (Figura 1). La precipitación media anual ponderada en la cuenca es de entre 600 y 700 mm. El caudal medio registrado en la estación de aforos de Tortosa (Figura 1) es de 450 m³/s, lo que equivale a una aportación hídrica de 14.300 hm³/a. La aportación máxima registrada en Tortosa fue de 30.821 hm³ en el año 1914-1915, mientras que el caudal máximo estimado fue de 12.000 m³/s en 1907 (Novoa, 1984).

Casi 190 presas regulan alrededor del 60% de la aportación hídrica anual del Ebro y sus tributarios. La práctica totalidad de los embalses fueron construidos durante el siglo XX. Concretamente, durante el periodo 1950-1975 se construyeron presas capaces de almacenar 5.200 hm³ de agua (i.e. 67% de la capacidad total de embalse de la cuenca). Del total de embalses, 25 embalses tienen una capacidad superior a 50 hm³ y entre ellos almacenan el 90% de la escorrentía total anual (Batalla *et al.*, 2004). El caudal máximo en Tortosa en el periodo 1970-2004 ha sido de 3.300 m³/s (1982).

En este estudio se considera tramo bajo del Ebro el sector del río delimitado por los municipios de Sástago, situado aguas arriba de la presa de Mequinenza, y Móra d'Ebre, situado 28 km aguas abajo de la presa de Flix (Figura 1). La pendiente media del tramo es de $8,5 \times 10^{-4}$. En este tramo el río es meandriforme (i.e., índice de sinuosidad = 1,6) de acuerdo con clasificación de Leopold *et al.* (1964). La anchura del cauce oscila entre 50 y 160 m. En este tramo se encuentra el complejo de embalses más grande de la cuenca formado por las presas de Mequinenza (operativa desde 1966 y con una capacidad de 1,534 hm³), Riba-roja (1969, 207 hm³) y Flix (1948, 11 hm³) (Figura 1). Los principales tributarios son el Cinca y el Segre que desembocan conjuntamente en el embalse de Riba-roja. El principal afluente aguas abajo de la presa de Flix es el río Siurana. Se trata de un curso fuertemente regulado desde los años 1980 y en el que se llevan a cabo masivas extracciones de áridos, por lo que su papel desde el punto de vista hidrosedimentario es insignificante.

LA CUENCA DEL RÍO EBRO



EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO

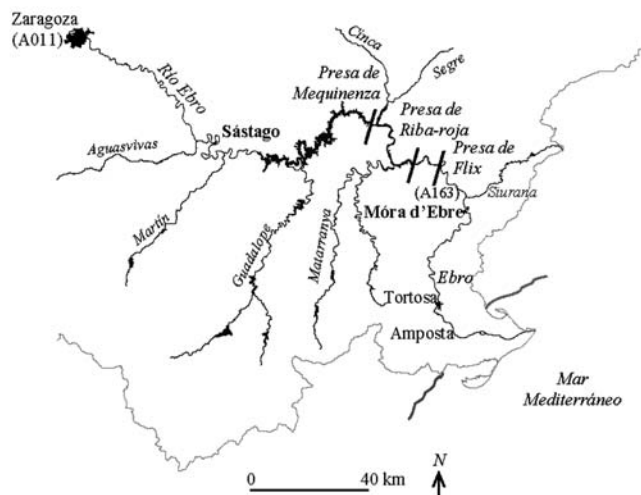


Figura 1. Situación del área de estudio en la cuenca del Ebro (A011 indica la posición de las estaciones de aforos de la Confederación Hidrográfica del Ebro).

Figure 1. Location of the study reach in the Ebro basin (A011 indicates the location of the gauging stations of the Ebro Water Authorities).

La magnitud de las crecidas frecuentes (Q_2 - Q_{25} , donde Q_i es el caudal para un período de retorno de i años) se ha reducido un 25% en el tramo aguas abajo de Flix (Batalla *et al.*, 2004). No obstante es importante destacar que, aunque la reducción de las crecidas es notable, el río todavía conserva competencia para movilizar y capacidad para transportar sedimentos (Vericat y Batalla, 2004). El complejo

de presas retiene alrededor del 90% de los sedimentos transportados desde aguas arriba (Sanz *et al.*, 1999, Vericat y Batalla, 2006a). Las alteraciones hidrológicas y el déficit de sedimentos son la causa de los cambios progresivos observados en la morfología, la dinámica sedimentaria y la ecología del río (e.g., Sanz *et al.*, 1999; Palau *et al.*, 2004; Vericat y Batalla, 2006a).

3. Metodología

El muestreo de sedimentos en suspensión y de la carga de fondo, y la medición de parámetros hidráulicos durante el muestreo se ha llevado a cabo en dos secciones de control, Sástago y Móra d'Ebre situadas aguas arriba y abajo de las presas respectivamente (Figura 1).

3.1. Hidrología e hidráulica

Los datos de caudal utilizados para el análisis hidrológico en Sástago son los registrados en la estación de aforos de Zaragoza (A011, Confederación Hidrográfica del Ebro) ubicada 85 km aguas arriba, y en el caso de Móra d'Ebre los de la estación de Ascó (A163) situada 10 km aguas arriba (Figura 1). Los caudales se transitaban desde las secciones de aforo hasta las secciones de control mediante el método de Muskingum. Los caudales transitados han sido corroborados mediante mediciones directas de caudal (velocidad del flujo, profundidad y anchura del cauce) durante el muestreo (para más detalles ver Vericat y Batalla, 2006a). Para la medición de la velocidad se ha utilizado un molinete hidráulico OTT-C31 acoplado al muestreador de sedimentos en suspensión (Figura 2a). Se han realizado un total de 21 perfiles de velocidad para distintos caudales (Figura 3). La profundidad del cauce se ha medido mediante el cable de la grúa utilizada para el muestreo de sedimentos. La anchura se ha medido con un telémetro Range Finder. Después de cada estación de crecidas se ha levantado la topografía de las secciones monitorizadas mediante una estación total y una ecosonda desde barca para la detección de posibles cambios que pudieran afectar las mediciones hidráulicas.

3.2. Transporte de sedimentos

3.2.1. Sedimentos en suspensión

Los sedimentos en suspensión se muestrearon regularmente y durante crecidas mediante un muestreador de integración en profundidad US DH74 operado desde grúas (Figura 2a). El muestreo se realiza en una única vertical. Vericat y Batalla (2006a) analizaron la variabilidad espacial



Figura 2 (a). Muestreador de integración en profundidad US DH74 para sedimentos en suspensión, con molinete OTT C-31 para la medición de la velocidad del flujo, (b) Muestreador Helley-Smith de 29 kg y boca de 76 mm y (c) muestreador Helley-Smith de 76 kg y boca de 152 mm para la carga de fondo.

Figure 2 (a). US DH74 sampler for the suspended sediment attached to a OTT C-31 current meter for flow velocity measurements, (b) Helley-Smith bedload sampler of 29 kg weight and 76 mm intake, and (c) Helley-Smith sampler of 76 kg weight and 152 mm intake.

de las concentraciones de sedimentos en suspensión (de aquí en adelante C_{ss}) a lo largo de la sección de muestreo para determinar la representatividad de la vertical de muestreo. El cociente entre la C_{ss} media en la sección y la C_{ss} en la vertical osciló entre 1,02 y 1,12, con lo que se concluye que el muestreo en una única vertical es altamente representativo de la C_{ss} en la sección. Durante el muestreo se estimó la variabilidad temporal de las C_{ss} mediante la toma de muestras pares. El coeficiente medio de variación de las muestras fue de 0,06 en Sástago ($N = 20$) y de 0,19 en Móra d'Ebre ($N = 20$). Para la determinación de C_{ss} se filtraron un total de 140 litros (464 muestras) de agua mediante filtros de celulosa de 1,2 μm de poro.

3.2.2. Carga de fondo

La carga de fondo se muestreó durante crecidas en las que el caudal alcanzó la tensión crítica de inicio de movimiento (i.e., 850 m^3/s en Sástago y 600 m^3/s en Móra d'Ebre). Para la toma de muestras se utilizaron dos muestreadores Helley-Smith operados mediante grúas: a) muestreador de 29 kg con boca de 76 mm (Figura 2b) y b) muestreador de 76 kg con boca de 152 mm (Figura 2c). (para más detalles sobre la eficiencia de los muestreadores ver Vericat *et al.*, 2006a). El muestreo se realizó en la misma vertical empleada para el muestreo de C_{ss} . Vericat y Batalla (2006b) analizaron la variabilidad espacial y temporal de las tasas de transporte de carga de fondo (de aquí en adelante i_b). Se observó que la variabilidad espacial de i_b es inferior a la variabilidad temporal durante caudales competentes y constantes. Por tanto, la mayor variabilidad temporal justifica el muestreo en una única vertical. En total se recogieron 194 muestras de carga de fondo que, una vez en el laboratorio, se secaron y pesaron para determinar las tasas de carga de fondo y su distribución granulométrica (Vericat y Batalla, 2006a).

3.2.3. Carga sólida total

El transporte anual de sedimentos en suspensión y de carga de fondo para los años 2002-2003 y 2003-2004 se calculó con las relaciones estadísticas entre caudal (Q) y carga (C_{ss} y i_b), y mediante la aplicación del método de la Curva de Frecuencia de Caudales (Walling, 1984). Esta metodología no se ha podido utilizar de manera completa para el

cálculo de la carga de fondo en Sástago ya que durante el 2002-2003, y debido a problemas técnicos, solo se pudieron muestrear caudales superiores a 1.900 m^3/s (Figura 6a). La estimación de la carga de fondo para caudales inferiores se ha realizado mediante el uso de la fórmula de Meyer Peter *et al.* (1934). Vericat y Batalla (2006a) estimaron la precisión media de esta fórmula en esta sección en un 90% [$(i_{b-obs}/i_{b-est}) \times 100$, donde i_{b-obs} es la tasa de carga de fondo observada y i_{b-est} la estimada]. El cálculo del transporte de carga de fondo durante el 2003-2004 se ha hecho mediante el producto de la i_b media (i.e., 2 g/ms) y el tiempo total en que el caudal alcanzó el caudal crítico de inicio de movimiento (i.e., 835 m^3/s , valor coincidente con el caudal mínimo con muestra de carga de fondo) (para más detalles ver Vericat y Batalla, 2006a).

4. Observaciones y análisis

4.1. Hidrología e hidráulica

Los años de estudio 2002-2003 y 2003-2004 se consideran representativos del régimen de caudales en situación post-embalses (1970-2004). El análisis de Vericat y Batalla (2006a) muestra mínimas diferencias entre el régimen de caudales de los años de estudio y el correspondiente al conjunto del período post-embalses. El caudal medio en 2002-2003 fue 251 m^3/s en Sástago y 415 m^3/s en Móra d'Ebre, mientras que los caudales medios en 2003-2004 fueron 235 y 465 m^3/s , respectivamente. El caudal máximo en Sástago durante todo el periodo de estudio fue 2.604 m^3/s (i.e., Q_{10} , estimado para la serie de caudal post-embalses en la estación de aforos de Zaragoza, donde Q_i es el caudal para un período de retorno de i años). En Móra d'Ebre el caudal máximo alcanzó los 2.498 m^3/s (i.e., Q_8 , estimado para la serie de caudal post-embalses en la estación de aforos de Tortosa) (Figura 4).

Los caudales circulantes durante la realización de los perfiles de velocidad oscilaron entre los 2.200 y los 750 m^3/s en ambas secciones (Figura 3). La velocidad media varió entre 1,7 y 2,4 m/s en Sástago y entre 1,5 y 2,5 m/s en Móra d'Ebre. La velocidad máxima se obtuvo durante caudales superiores a 2.100 m^3/s y fue de 3 m/s en ambas

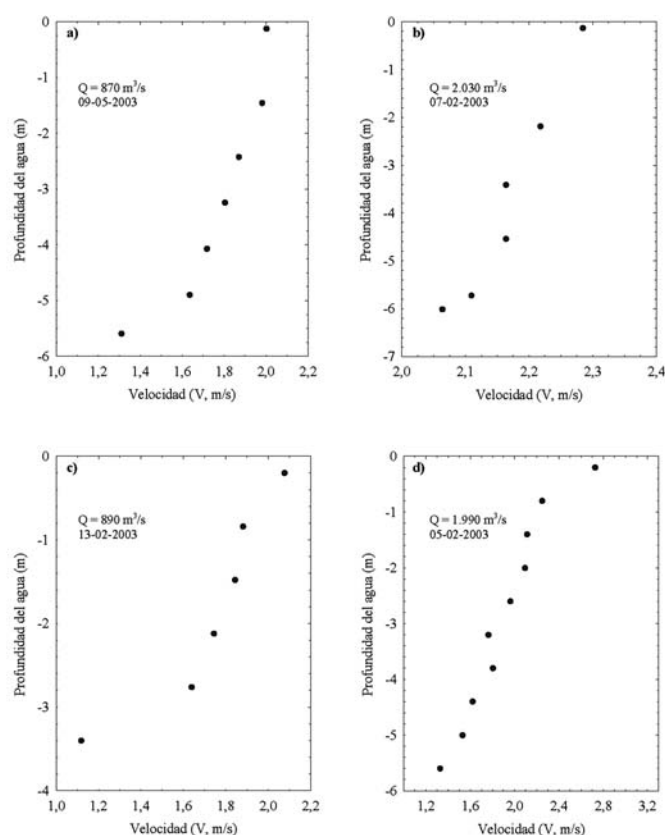


Figura 3. Ejemplos seleccionados de perfiles representativos de velocidad obtenidos en Sástago (a y b) y Móra d'Ebre (c y d).
 Figure 3. Selected representative flow velocity profiles obtained in the Sástago (a and b) and in the Móra d'Ebre (c and d) monitoring sections.

secciones. La profundidad del cauce durante el muestreo osciló entre 3,9 y 6,7 metros en Sástago y 2,3 y 7,7 en Móra d'Ebre. La anchura de la sección inundada osciló entre 110 y 250 m en Sástago (el agua inundó parte de la llanura aluvial durante las crecidas de febrero y marzo de 2003), mientras que en Móra d'Ebre el valor se mantuvo constante sobre 160 metros. Durante el período de estudio se muestrearon el 99,5% de los caudales para C_{ss} y 96,5% de éstos para i_b .

4.2. Transporte de sedimentos

4.2.1. Sedimentos en suspensión

La C_{ss} media en Sástago fue 530 mg/l para un caudal medio de muestreo (Q_{mm}) de 1.280 m³/s

durante 2002-2003 y 215 mg/l para un Q_{mm} de 725 m³/s en 2003-2004. En Móra d'Ebre los valores de C_{ss} fueron claramente inferiores aunque el caudal medio de muestreo fue similar al de Sástago: la C_{ss} media fue 38 mg/l ($Q_{mm} = 1.280$ m³/s) en 2002-2003 y 27 mg/l ($Q_{mm} = 910$ m³/s) en 2003-2004. Los valores muestran una clara diferencia entre ambas secciones para Q_{mm} similares, hecho que se atribuye a la retención de sedimentos en los embalses. Esta diferencia también se observa si se comparan los valores máximos de C_{ss} . Durante la crecida de mayor magnitud (febrero de 2003, Figura 4) se registró la máxima C_{ss} en ambas secciones durante todo el periodo de estudio: 1.500 mg/l ($Q = 2.000$ m³/s) en Sástago y 550 mg/l ($Q = 2.440$ m³/s) en Móra d'Ebre.

Las C_{ss} en las dos secciones monitorizadas muestran una relación lineal positiva y estadística-

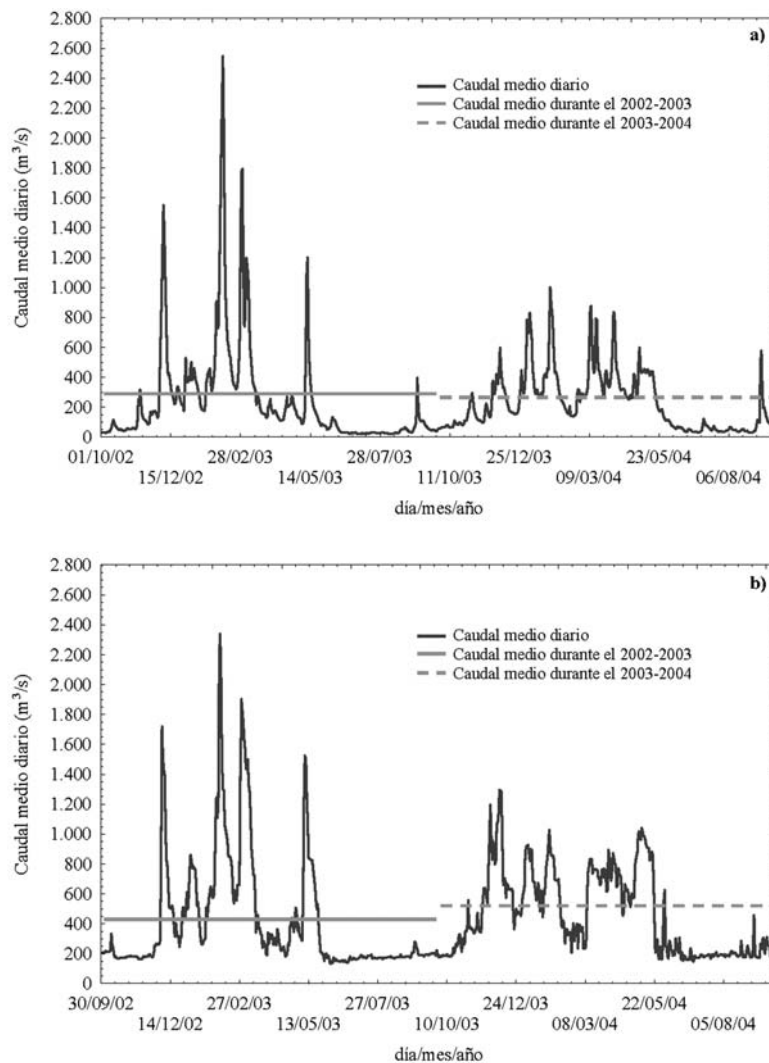


Figura 4. Caudal medio diario y medio anual durante el periodo 2002-2004 en las secciones de control: (a) Sástago y (b) Móra d'Ebre.

Figure 4. Mean daily and annual discharge for the 2002-2004 period at the monitoring sections: (a) Sástago and (b) Móra d'Ebre.

mente significativa ($p < 0,01$) con el caudal para los dos años de muestreo (Figura 5a y 5b). Las figuras ilustran la alta variabilidad del transporte de sedimentos en suspensión asociada principalmente a un fenómeno de agotamiento en el suministro de sedimento desde el cauce y los márgenes, tanto durante el transcurso de las crecidas como a medida que avanza la estación de crecidas (Vericat y Batalla, 2006a).

4.2.2. Carga de fondo

La i_b media durante el muestreo de 2002-2003 en Sástago fue 41 g/ms con un Q_{mm} de 2.012 m³/s, mientras que en 2003-2004 fue 2 g/ms para un Q_{mm} de 894 m³/s. En Móra d'Ebre los valores fueron muy superiores. La i_b media en 2002-2003 fue 146 g/ms para un Q_{mm} de 1.050 m³/s, y de 68 g/ms para un Q_{mm} de 1.020 m³/s en 2003-2004. La i_b media disminuyó más de un 50% en 2003-2004 respecto

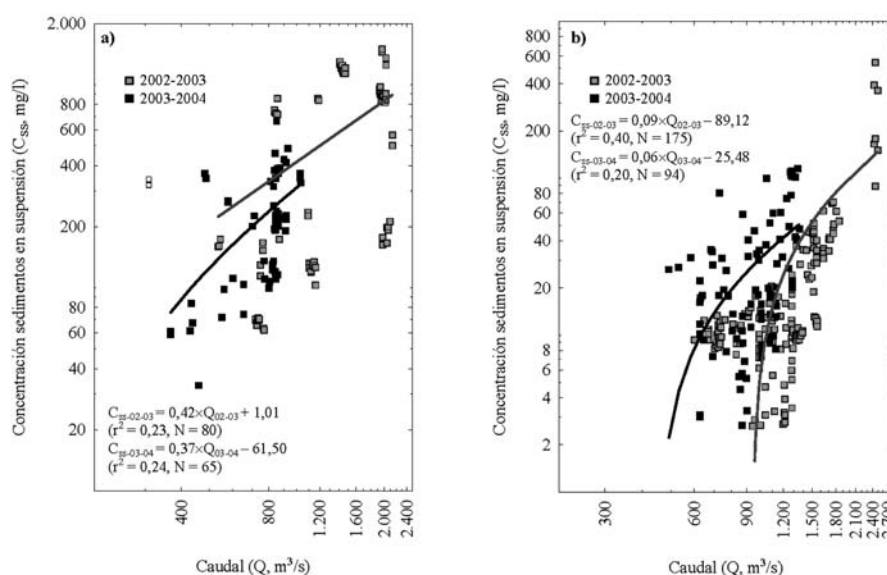


Figura 5. Relaciones estadísticas entre concentración de sedimentos en suspensión (C_{ss}) y caudal (Q) en Sástago (a) y Móra d'Ebre (b) para 2002-2003 y 2003-2004.

Figura 5. Suspended sediment load rating curves at the Sástago (a) and the Móra d'Ebre (b) monitoring sections for the years 2002-2003 and 2003-2004.

a 2002-2003 aunque el caudal medio en ambos años fue prácticamente el mismo. Esta reducción se atribuye al diferente comportamiento sedimentario del lecho del río en cada uno de los años, hecho que se relaciona con la dinámica de la coraza superficial y su influencia en la disponibilidad de sedimentos durante crecidas (Vericat *et al.*, 2006b). La i_b máxima muestreada en Sástago fue de 135 g/ms, mientras que en Móra d'Ebre fue de 1.200 g/ms, ambos valores registrados de nuevo durante la crecida de febrero de 2003. La diferencia entre las i_b se ha relacionado con las características hidráulicas y granulométricas de las dos secciones de muestreo (Vericat y Batalla, 2006a), siendo el percentil 50 (i.e., D_{50}) de las distribuciones granulométricas del lecho del río en el 2002 de 17 y 50 mm respectivamente.

Las i_b en Sástago muestran una relación lineal positiva y estadísticamente significativa ($p < 0,01$) con el caudal durante 2002-2003 (Figura 6a). En 2003-2004 los caudales apenas sobrepasaron el caudal crítico de inicio de movimiento. Las i_b fueron inferiores a 5 g/ms y la variabilidad de los caudales inferior a 200 m^3/s , lo que impide cualquier

análisis estadístico entre i_b y Q . Las i_b en Móra d'Ebre muestran también una relación lineal positiva y estadísticamente significativa ($p < 0,01$) con el caudal para los dos años de estudio (Figura 6b). La figura 6b ilustra la alta variabilidad de la carga de fondo aguas abajo de las presas, fenómeno que se puede atribuir tanto al patrón errático de este tipo de transporte como a la influencia de los sucesivos procesos de rotura y reestablecimiento de la coraza del lecho observados en el río (Vericat *et al.*, 2006b).

4.2.3. Carga sólida total

Durante 2002-2003 circularon por la sección de Sástago un total de $2,29 \times 10^6$ t de sedimentos en suspensión, mientras que en 2003-2004 el transporte fue de $0,97 \times 10^6$ t. Aguas abajo del embalse de Flix el transporte de sedimentos en suspensión fue de $0,26 \times 10^6$ t y $0,29 \times 10^6$ t en el 2002-2003 y en el 2003-2004, respectivamente (Tabla 1). La retención de sedimentos en suspensión en los embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix se estima, por tanto, en un 80% durante este período. Por su parte, el transporte anual de carga de fondo aguas arriba del

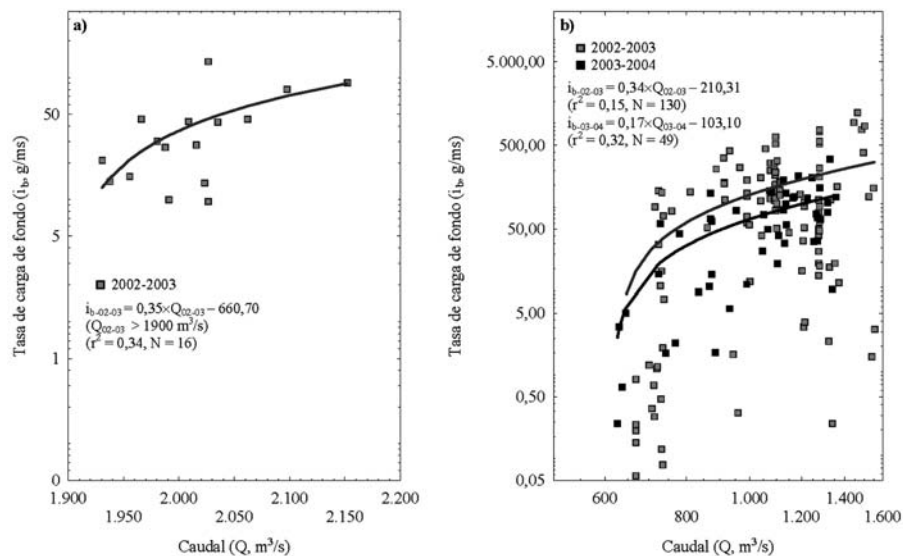


Figura 6. Relación estadística entre tasa de carga de fondo (i_b) y caudal (Q) en Sástago (a) para 2002-2003 durante caudales superiores a 1.900 m³/s (ver texto para detalles). Relaciones estadísticas entre tasa de carga de fondo (i_b) y caudal (Q) en Móra d'Ebre (b) para 2002-2003 y 2003-2004.

Figure 6. Bedload load rating curve at the Sástago (a) monitoring section for the year 2002-2003 and for discharges higher than 1.900 m³/s (see text for details). Bedload load rating curves at the (b) Móra d'Ebre monitoring section for the years 2002-2003 and 2003-2004.

embalse de Mequinenza fue de 15.300 t en 2002-2003 y de 155 t en el 2003-2004. Se trata de valores claramente inferiores a los obtenidos en Móra d'Ebre: 0,28x10⁶ t en 2002-2003 y 0,08x10⁶ t en 2003-2004 (Tabla 1), sector en el cual las partículas de carga de fondo provienen en su totalidad del lecho del río aguas abajo de las presas.

La carga total de sedimentos en Sástago durante 2002-2003 fue 2,31x10⁶ t, de las cuales un 99% fueron transportadas en suspensión, mientras que en 2003-2004 fue 0,98x10⁶ t, prácticamente todas transportadas en suspensión. En Móra d'Ebre la carga total en 2002-2003 fue 0,54x10⁶ t, de las cua-

les el 48% fueron transportadas en suspensión y el 52% como carga de fondo. Por su parte, en 2003-2004 la carga total fue de 0,37x10⁶ t, el 79% en suspensión y el 21% como carga de fondo, debido a la menor presencia y duración de caudales competentes (Tabla 1) (para más detalles ver Vericat *et al.*, 2006b).

5. Discusión

Los embalses retienen porcentajes muy elevados de la carga de sedimentos, reduciendo el sumi-

Tabla 1. Balance de sedimentos en el tramo bajo del río Ebro (2002-2004).

Table 1. Sediment budget in the lower Ebro River (2002-2004).

Sección monitorizada	Transporte de sedimentos	2002-2003	2003-2004
Sástago	Sedimentos en suspensión (t)	⁽⁹⁹⁾ 2.297.000	^(99,8) 972.200
(aguas arriba	Carga de fondo (t)	⁽¹⁾ 15.300 ²	^(0,02) 155
Mequinenza)	Carga total (t)	2.312.300	972.355
Móra d'Ebre	Sedimentos en suspensión (t)	⁽⁴⁸⁾ 257.580	⁽⁷⁹⁾ 294.500
(aguas abajo Flix)	Carga de fondo (t)	⁽⁵²⁾ 279.000	⁽²¹⁾ 77.000
	Carga total (t)	536.580	371.500

⁽⁹⁹⁾ Porcentaje en relación a la carga total.

nistro aguas abajo. La retención de sedimentos en el embalse de Mequinenza y Riba-roja fue estimada de entorno al 85% por Varela *et al.* (1986) para el periodo 1974-1979. Posteriormente, Palanques (1987) calculó una retención en dichos embalse de alrededor al 72% durante el período 1983-1986. Avendaño *et al.* (1997) estimaron una retención de la carga sedimentaria en el tramo bajo del Ebro de entorno al 75% mediante la comparación de diferentes batimetrías de los embalses. Sanz *et al.* (1999) estimaron valores similares de retención a partir de muestras aleatorias de sedimentos en suspensión aunque para una reducida amplitud de caudales. Recientemente, Roura (2004) estimó una retención de sedimentos en suspensión en el embalse de Mequinenza del 95% a partir de datos diarios de concentración de sedimentos en suspensión. Mediante la superficie de los embalses y la capacidad de regulación de éstos, la curva de Brune permite una estimación de la retención potencial de sedimentos en embalses. A partir de este método, la retención de sedimentos por parte de los embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix sería del 85%, valor similar a los descritos anteriormente. Los valores calculados en este trabajo también se sitúan en el orden de magnitud de los trabajos anteriores. La retención de sedimentos en suspensión oscila entre el 88 y el 70%. Las diferencias con trabajos anteriores se pueden atribuir directamente a los distintos rangos de caudal muestreado y a las características hidrológicas (i.e., aportación anual, magnitud y frecuencia de las avenidas muestreadas) de los diferentes períodos de estudio. Asimismo, es importante señalar que este estudio no se ha considerado las aportaciones del sistema Segre-Cinca que confluye con el Ebro en el embalse de Riba-roja. Considerando el importante suministro de sedimentos de ambos tributarios, la retención total podría alcanzar valores superiores. A modo de comparación, alrededor del 98% de la carga de sedimentos en suspensión queda retenida en la presa de Aswan en el río Nilo, Egipto (Shalash, 1982).

Aguas abajo de la presa de Flix el río transportó una carga media anual de $0,45 \cdot 10^6$ t. Este valor representa un 2% de la carga anual transportada por el Ebro a finales del siglo XIX y (Gorría, 1877) y el 3% de la estimada a principios del siglo XX

(Bayerri, 1934-1935; Nelson, 1990), cuando la cuenca no estaba regulada. Los valores obtenidos en este trabajo confirman la drástica reducción de la carga de sedimentos en el tramo bajo del Ebro, aguas abajo de las presas. Los valores son similares a los obtenidos por Sanz *et al.* (1999) sin considerar la carga de 'fondo' y cuatro veces superiores a los estimados por Guillén y Palanques (1992) a partir de mediciones en la llanura deltaica. Estos dos elementos permiten afirmar que: a) existe un patrón estable de transporte de sedimento en suspensión aguas abajo de Flix que es relativamente independiente del régimen hidrológico y que está controlado principalmente por procesos locales como la erosión lateral, y b) las fracciones gruesas de sedimentos que el río transporta como carga de fondo no alcanzan la llanura deltaica.

Además de la retención de sedimentos en los embalses, éstos también modifican el patrón de transporte de sedimentos. El transporte de carga de fondo constituye cerca del 10% de la carga total transportada en sistemas fluviales naturales maduros (Dedkov y Mozzherin, 1996). Dicha proporción puede cambiar en ríos regulados debido a la retención de la carga de sedimentos en suspensión y a la competencia de los caudales liberados. En el caso del tramo bajo del río Ebro aguas abajo de Flix, el 60% de la carga sólida es transportada en suspensión, mientras que el 40% lo es como carga de fondo. Durante las crecidas de alta magnitud de 2002-2003 el flujo tuvo suficiente competencia para la rotura de la coraza superficial y el posterior transporte de material subsuperficial, lo que provocó el incremento de las tasas de carga de fondo y la incisión del lecho del río. Vericat *et al.* (2006b) estimaron una incisión media del tramo Flix-Móra d'Ebre de 60 mm. En 2003-2004 la magnitud de las crecidas fue inferior. El caudal no tuvo competencia suficiente para la movilización de todas las partículas del lecho. De esta forma, teniendo en cuenta la limitación del suministro de sedimentos desde aguas arriba, se incrementó el acorazamiento del lecho del río y, consecuentemente, las tasas de carga de fondo disminuyeron. Vericat *et al.* (2006b) no observaron incisión durante el segundo año de muestreo.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el marco del proyecto REN2001-0840-C02-01/HID, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. El primer autor disfrutó de una beca del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. La Confederación Hidrográfica del Ebro suministró los datos hidrológicos. El Ayuntamiento de Móra d'Ebre proporcionó ayuda logística y Albert Rovira colaboró en el trabajo de campo y de laboratorio.

6. Bibliografía

- Avendaño, C., Cobo, R., Sanz, M.E. y Gómez, J.L. (1997). Capacity situation in Spanish reservoirs. *I.C.O.L.D. Proceedings of the Nineteenth Congress on Large Dams*, 74(52), 849-862.
- Batalla, R.J., Kondolf, G.M. y Gomez, C.M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 290, 117-136.
- Batalla, R.J., Vericat, D. y Martínez, T.I. (2005). River-channel changes downstream large dams: the lower Ebro River. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 143, 1-14.
- Bayrerri, E. (1934-35). *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta Moderna de Alguerri, Tortosa.
- Church, M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales. *Regulated Rivers: Research and Management*, 11(1), 3-22.
- Dedkov, A.P. y Mozzherin, V.I. (1996). Erosion and sediment yield on the Earth. En: Walling, D.E. y Webb, B.W. (eds.): *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publ., 236, Wallingford, 29-33.
- Gorría, H. (1877). *Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques*. Imprenta la Giralda, Madrid.
- Guillén, J. y Palanques, A. (1992). Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, 567-579.
- Inbar, M. (1990). Effect of dams on mountainous bedrock rivers. *Physical Geography*, 11(4), 305-319.
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Kondolf, G.M. y Matthews, W.V.G. (1993). *Management of coarse sediment in regulated rivers of California*. University of California Water Resources Center: Davis, California.
- Leopold, L.P., Wolman, M.G. y Miller, J.P. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*. WH Freeman, San Francisco, 522 p.
- Ligon, F., Dietrich, W.E. y Trush, W.J. (1995). Downstream ecological effects of dams: a geomorphic perspective. *BioScience*, 45(3), 183-192.
- Meyer-Peter, E., Favre, H. y Einstein, H.A. (1934). Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb. *Schweizerische Bauzeitung*, 103.
- Nelson, C.H. (1990). Post Messinian deposition rates and estimated river loads in the Ebro sedimentary system. En: Nelson C.H., Maldonado A. (eds.): *Marine Geology of the Ebro Continental Margin*, Marine Geology, 95, 395-418.
- Novoa, M. (1984). Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Catalunya. *Proceedings of the Jornadas de Trabajo sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo*: Barcelona; 1-15.
- Palanques, A. (1987). *Dinámica Sedimentaria, Minerología y Microcontaminantes Inorgánicos de las Suspensiones de los Sedimentos Superficiales en el Margen Continental del Ebro*. Tesis doctoral, Instituto de Ciencias del Mar (CSIC), Barcelona, 438 p.
- Palau, A., Batalla, R.J., Rosico, E., Meseguer, A. y Vericat, D. (2004). Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-Roja Reservoir (Lower Ebro River, NE Spain). *Proceedings of the International Conference HYDRO 2004: A New Era for Hydropower*. Porto, Portugal, 18-21 October 2004.
- Petts, G.E. (1984). *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management*. Wiley, New York; 326 p.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. y Stromberg, J.C. (1997). The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 47(11), 769-784.
- Roura, M. (2004). *Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre*. Tesis doctoral, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 145 p.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. y Cobo, R. (1999). Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hasta el río Ebro (España). *Proceedings of the Congress on Hydrological and geochemical processes in large-scale river basins*. HIBAM, Shahin, 1985.
- Shalash, S. (1982). Effects of sedimentation on the storage capacity of the High Aswan Dam Reservoir. *Hydrobiology*, 92, 623-639.
- Shields, F.D., Simon, A. y Steffen L.J. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation*, 27(1), 54-66.
- Varela, J., Gallardo, A. y López de Velasco, A. (1986). Retención de sólidos por los embalses de Mequinensa y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al Delta del Ebro. En: M. Mariño (ed.): *El sistema integrado del Ebro*. Gráficas Hermes, Madrid, 200-219.
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2004). Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternalario y Geomorfología* 18(1-2), 37-50.
- Vericat, D., Batalla, R.J. (2006a). Sediment transport in a large

- impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology* (DOI:10.1016/j.geomorph.2005.09.017).
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2006b). Bedload variability under low sediment transport conditions in the lower Ebro River (NE Spain). En: Batalla, R.J. y Garcia, C. (eds.): *River/Catchment Dynamics: Natural Processes and Human Impacts*. IAHS Red Book Publication 299, Wallingford, 171-178.
- Vericat, D., Church, M. y Batalla, R.J. (2006a). Bedload bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel-bed river. *Water Resources Research*, 41, W01402, (DOI: 10.1029/2005WR004025).
- Vericat, D., Batalla, R.J. y Garcia, C. (2006b). Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro. *Geomorphology*, 76, 122-136.
- Walling, D.E. (1984). Dissolved loads and their measurements. En: Hadley R.F., Walling D.E (eds.): *Erosion and sediment yield: Some methods of measurements and modeling*. Geo Books, London, 111-177.
- Ward, J.V. y Stanford, J.A. (1979). *The Ecology of Regulated Streams*. Plenum Press, New York.
- Ward, J.V. y Stanford, J.A. (1995). Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers: Research and Management* 11, 105-119.
- Wilcock, P.R., Kondolf, G.M., Matthews, W.V. y Barta, A.F. (1996). Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Water Resources Research* 32, 2911-2921.
- Williams, G.P. y Wolman, M.G. (1984). *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. US Geological Survey Professional Paper 1986.