

EFECTOS DE LAS PRESAS EN LA DINÁMICA GEOMORFOLÓGICA DEL TRAMO BAJO DEL EBRO. CRECIDAS CONTROLADAS

Ramon J. Batalla

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl
Universitat de Lleida
rbatalla@macs.udl.cat

Damià Vericat

Centre for Catchment and Coast Research
Institute of Geography and Earth Sciences
Aberystwyth University

Antoni Palau

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, ENDESA

Resumen: En este estudio se analizan los efectos de las presas de Mequinenza, Riba-roja y Flix sobre la dinámica geomorfológica del tramo bajo del río Ebro y se presentan las crecidas controladas como medidas correctoras. La carga sedimentaria total aguas arriba de la presa de Mequinenza para el periodo entre octubre de 2002 y septiembre de 2004 es de $3,28 \times 10^6$ toneladas, el 99 % transportado en suspensión. Aguas abajo de la presa de Flix el río transporta $0,91 \times 10^6$ toneladas (el 60 % en suspensión y 40 % como carga de fondo), valor que se estima notablemente inferior a la carga transportada a principios del siglo XX. Los datos del período de estudio indican que los embalses del tramo bajo retienen hasta el 90 % de la carga de materiales en suspensión ($1,4 \times 10^6$ t/año), además de la totalidad de carga de fondo. Este fenómeno tiene como consecuencia una incisión sostenida del cauce aguas abajo. Los datos de campo indican que aguas abajo de la presa de Flix se produce una exportación media neta anual de $0,18 \times 10^6$ toneladas de sedimentos gruesos del lecho, lo que se traduce en una incisión media de 30 mm/año. Esta situación se prolongará hasta que el río alcance un nuevo equilibrio hidráulico y sedimentario (e.g. aumento del grado de acorazamiento del lecho). El río Ebro presenta ya áreas fuertemente acorazadas, especialmente en las proximidades de la presa de Flix, pero en general el lecho se muestra todavía muy activo, hecho corroborado tanto por las altas tasas de carga de fondo medidas durante crecidas como por la incisión y la movilidad de trazadores observada en secciones de control. La revegetación espontánea de numerosas zonas del cauce hasta hace poco activas sugiere que el proceso de incisión sigue su curso. Aún así, el cauce dista, todavía, de haber llegado a una situación de reequilibrio hidráulico, 40 años después del cierre de las últimas presas. En el tramo bajo del Ebro se trabaja desde 2002 en el diseño y ejecución regular de crecidas de mantenimiento (i.e. crecidas controladas) que permiten mantener la necesaria capacidad de autoregeneración del cauce y las comunidades acuáticas desde un punto de vista ecológico, restaurar parcialmente su morfodinámica y, sobre todo, reducir el exceso de macrófitos. Dichas crecidas movilizan sedimentos del fondo, pero hasta qué extremo contribuyen al proceso de incisión del lecho y a su progresivo acorazamiento es una cuestión abierta que debe seguir analizándose con detalle a partir de mediciones directas de campo, experimentos y modelización.

INTRODUCCIÓN

Los ríos y los lagos han constituido desde siempre el principal recurso hídrico de la humanidad. El desarrollo socioeconómico como consecuencia de la revolución industrial se produjo ligado a un aumento significativo del consumo de agua y de energía. Este hecho llevó al inicio de la re-

gulación masiva de cursos fluviales ya desde el siglo XIX mediante la construcción de grandes presas, especialmente en Europa. La regulación ha crecido paulatinamente a lo largo del siglo XX y ha permitido aumentar de manera progresiva la disponibilidad del recurso disminuyendo la incertidumbre asociada a la variabilidad climática típica de una parte importante del planeta y ase-

gurando, con ello, el suministro de agua a una parte considerable de la población mundial (Vericat y Batalla, 2007). Las presas modifican el régimen fluvial y tienen especial incidencia en la reducción de la magnitud y la frecuencia de las crecidas. Dicha alteración es función de la capacidad de almacenaje del embalse en relación con la escurrimiento anual de la cuenca y el funcionamiento de la presa (Batalla *et al.*, 2004). En la actualidad existen más de 50.000 grandes presas en el mundo, alrededor de 2,5 % de las cuales (unas 1200) ubicadas en España, destinadas a usos agrícolas, producción hidroeléctrica, industriales y de abastecimiento de boca.

Los ríos son sistemas complejos que, además de transferir agua desde las cabeceras hasta las partes bajas de las cuencas y su desembocadura, transportan también enormes cantidades de sedimentos primero hasta las llanuras aluviales y más tarde hasta los océanos, siendo un elemento esencial en el ciclo de denudación continental. La aportación media anual de sedimentos de los ríos a los océanos de todo el planeta se estima en 20.000×10^6 toneladas (Milliman y Meade, 1983), de las cuales alrededor de 500×10^6 corresponden a cuencas europeas (Owens y Batalla, 2006). La dinámica conjunta de agua y sedimentos en los lechos fluviales es además la responsable del equilibrio entre elementos abióticos (e.g. morfología del cauce) y bióticos (e.g. hábitats). La transferencia de sedimentos en una cuenca fluvial ocurre episódicamente durante momentos de alta energía (i.e. crecidas), en los que los caudales circulantes por el cauce son suficientemente competentes para movilizar y transportar los sedimentos. Los cambios en la hidrología de las avenidas (magnitud y frecuencia) modifican la transferencia de sedimentos aguas abajo (Batalla, 2003). La retención de sedimentos está determinada por el tamaño del embalse y las características (e.g. duración) de la crecida. Además, los sedimentos acumulados en el embalse causan una progresiva disminución de su capacidad de almacenaje de agua (e.g. reducción de la vida útil del embalse), aunque lo cierto es que para la mayoría de los casos, con menos intensidad de la que hace unas décadas se decía, y un déficit sedimentario aguas abajo con efectos conocidos sobre la dinámica fluvial (e.g. incisión del lecho). Este hecho se ve magnificado en cuencas donde los cambios en los usos del suelo y los aprovechamientos de áridos reducen, si cabe, la cantidad de sedimentos que las zonas altas de la cuenca suministran a los cauces fluviales. Situaciones de permanencia de caudales bajos con

aguas tranquilas, altas temperaturas, alto contenido de nutrientes derivados de la agricultura y de tratamientos incompletos de depuración de aguas residuales urbanas, y bajas concentraciones de sedimentos pueden además favorecer el crecimiento desmesurado de macrófitos; este fenómeno aumenta la carga de materia orgánica acumulada en el ecosistema, modifica la dinámica del oxígeno disuelto y altera el hábitat físico de especies acuáticas. En el caso del río Ebro el exceso de macrófitos ocasiona, además, problemas a las tomas de agua de riego, a las de la central hidroeléctrica de Flix y a las de la central nuclear de Ascó. También se ha relacionado la proliferación de macrófitos con la plaga de mosca negra que afecta a poblaciones del bajo Ebro y el bajo Segre. Si se dispone de agua suficiente en los embalses se pueden llevar a cabo crecidas de mantenimiento de manera regular para mitigar algunos de los citados impactos, contribuyendo de esta manera a mejorar la capacidad autodepuradora propia del río, disminuir la densidad de macrófitos y a regenerar parcialmente su régimen de caudales, aspecto de gran importancia para el sistema fluvial (Palau, 2006). Hasta hace poco se ha dedicado mucha atención al establecimiento de caudales mínimos para los ríos regulados; actualmente, en consonancia con las prácticas de los países más adelantados en restauración fluvial, se pide cada vez más el diseño y realización de programas de crecidas de mantenimiento específicas para ríos regulados, como una actuación imprescindible en su gestión (Palau, 1994; Palau, 2006). Los beneficios socio-económicos de dichas prácticas de restauración fluvial se derivan del ahorro de costes de prevención de plagas, de mejoras significativas en el uso eficiente del agua y mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas, de la reducción de riesgos y de la mejora de los hábitats naturales fluviales, tanto acuáticos como de ribera. Por su parte, los costes de oportunidad de las crecidas de mantenimiento consisten en pérdidas de producción en los usos económicos del agua, derivados hacia la restauración fluvial, sobre todo usos hidroeléctricos. El balance entre costes de oportunidad y beneficios ambientales determina la viabilidad económica de las crecidas.

Este es el contexto en el que se están llevando a cabo crecidas controladas (i.e. también llamadas de mantenimiento) en el tramo bajo del Ebro desde el año 2002 con el objetivo básico de movilizar y controlar el desarrollo de los macrófitos, y devolver al río parte de su morfodinámica natural. Se trata de una experiencia pionera



Figura 1. La cuenca del río Ebro: localización del tramo bajo con indicación de los embalses y los puntos de medición y muestreo de caudal y transporte de sedimentos

en el país que ha permitido estudiar aspectos de la dinámica del río, sobre todo en relación al transporte de sedimentos y a la morfología del cauce, hasta ahora desconocidos. Desde una perspectiva de gestión, el programa de crecidas del Ebro ha abierto una línea de colaboración entre el mundo científico (universidad), empresarial (compañía hidroeléctrica) e institucional (administración hidráulica) que, en base a reconocer los efectos y las posibilidades de manejo de los embalses sobre el río, y al mismo tiempo su papel fundamental en la producción energética vital para el desarrollo socioeconómico del país, trabajan conjuntamente para la restauración del funcionamiento de este sistema fluvial. El objetivo va en doble dirección, entender los procesos para mejorar la gestión y aprovechar las prácticas de gestión para profundizar en el conocimiento de la dinámica fluvial. En este artículo se presenta una síntesis del balance de sedimentos y los procesos morfosedimentarios observados en el tramo bajo del río Ebro durante el periodo 2002-2004, y se describe el diseño y la puesta en práctica de las crecidas de mantenimiento realizadas desde 2002.

ÁREA DE ESTUDIO

A los efectos de este estudio, se considera tramo bajo del río Ebro el sector 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 $8,5 \times 10^{-4}$ y la anchura del cauce oscila entre 50 y 160 m. Aguas abajo de Sástago se encuentra el complejo de embalses más importante 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). Se estima que la magnitud de las crecidas frecuentes (i.e. crecidas de entre 2 y 25 años de periodo de retorno) se ha reducido un 25% en el tramo aguas abajo de Flix (Batalla *et al.*, 2004). Dichos embalses son importantes para entender el déficit de sedimentos del tramo bajo del Ebro ya que regulan el tronco central, los principales tributarios (Segre y Cinca) y los ríos mediterráneos de la Cordillera Ibérica con una notable capacidad de aportación de sólidos. La sedimentación media anual en los embalses de Mequinenza y Riba-roja se ha estimado tradicionalmente en valores de 6 hm³ y 1 hm³ respectivamente (Sanz *et al.*, 1999). El principal afluente aguas abajo de la presa de Flix es el río Siurana. Se trata de un curso fuertemente regulado y en el que se llevan a cabo extracciones de áridos, por lo que su papel desde el punto de vista hidrosedimentario es poco relevante.

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE PROCESOS HIDROSEDIMENTARIOS

Métodos

El trabajo de investigación se ha basado en análisis de series de caudales, en mediciones directas de transporte de sedimentos de manera regular y durante crecidas, y en campañas regulares de campo llevadas a cabo para obtener información de la distribución y evolución espacial y temporal de la estructura y tamaño de los sedimentos que forman el cauce del río (Vericat y Batalla, 2006). La investigación ha permitido

poner en funcionamiento el equipamiento necesario para el muestreo del transporte de sedimentos (carga de fondo) en grandes ríos (Vericat *et al.*, 2006a), elemento de tipo técnico de gran interés y casi único en Europa, aspecto que añade valor a los resultados del mismo. Es la primera ocasión en que se obtienen datos sistemáticos de transporte de sedimentos en suspensión y de carga de fondo conjuntos durante crecidas en el Ebro. Estos datos han permitido analizar la dinámica sedimentaria y la capacidad de transporte actual del río durante las crecidas, y mejorar la comprensión del papel de los embalses como retenedores.

Para la caracterización hidrológica del periodo de estudio se han utilizado datos de las estaciones de aforo de Zaragoza (A011) y de Ascó (A163). Los caudales se han transitado desde las estaciones hasta las secciones de muestreo mediante el método de Muskingum y se han corroborado mediante mediciones de campo. El muestreo del transporte de sedimentos se ha realizado en las secciones de control de Sástago y Móra d'Ebre (Figura 1). Para ello se han utilizado muestreadores Helley-Smith para la carga de fondo (Vericat *et al.*, 2006a), y de integración en profundidad tipo US-DH para el sedimento en suspensión (Figura 2). El transporte anual de carga de fondo y de sedimentos en suspensión para los años de estudio se ha calculado con las relaciones estadísticas entre caudal y carga, y mediante la aplicación del método de la Curva de Frecuencia de Caudales (Walling, 1984). Además, se han seleccionado un total de 8 secciones de control (i.e. barras activas) entre la

presa de Flix y Móra d'Ebre para el análisis de la dinámica sedimentaria del lecho fluvial. En cada una de las secciones se han instalado cadenas de erosión y se han realizado perfiles transversales. Las secciones han sido caracterizadas granulométricamente (i.e. material superficial y subsuperficial), se ha determinado el grado de acorazamiento (Vericat *et al.* 2006b) y se ha estudiado la movilidad del lecho mediante trazadores. Finalmente, los cambios morfológicos aguas abajo de la presa de Flix se han estudiado mediante el análisis de fotografías aéreas para el periodo 1927-2002. Las fotografías han sido digitalizadas y georectificadas, y posteriormente analizadas mediante paquetes informáticos de SIG y de proceso de imágenes. En ellas se ha identificado y cartografiado el cauce del río, las barras y la cobertura arbustiva y arbórea (Batalla *et al.*, 2006a).

Síntesis de resultados y discusión

Hidrología y balance sedimentario

Las características hidrológicas durante los dos años de estudio han sido diferentes entre ellas pero ambas representativas del régimen de caudales post-embalses (1970-2005). El año hidrológico 2002-2003 se caracterizó por crecidas de alta magnitud (i.e. entorno los 2500 m³/s) y reducida frecuencia (i.e. crecidas con periodos de retorno alrededor de los 10 años), mientras que durante el año 2003-2004 las crecidas registradas fueron de baja magnitud (i.e. entorno



Figura 2. Muestreadores de transporte de sedimentos: Izq.: US DH74 para muestras integradas de sedimento en suspensión; Drch.: Helley-Smith de 76 mm para carga de fondo (Fotos: RJ Batalla)

los $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y elevada frecuencia (i.e. crecidas anuales) (Vericat y Batalla, 2006) (Figura 3). La carga total de sedimentos transportada aguas abajo de las presas es inferior a la transportada aguas arriba (Tabla 1). Durante el periodo 2002-2004 circularon por la sección de Sástago un total de $3,28 \times 10^6 \text{ t}$ de sedimentos, mientras que en Móra d'Ebre el transporte fue de $0,91 \times 10^6 \text{ t}$. La mayoría de los sedimentos transportados aguas arriba de los embalses lo son en suspensión, mientras que hasta la mitad de la carga total es transportada como carga de fondo aguas abajo de las presas (Tabla 1). Los resultados sugieren que el río Ebro aguas abajo de Flix transporta una carga sedimentaria nota-

blemente inferior a la estimada para principios del siglo XX. Los embalses del tramo bajo retienen hasta el 90 % de la carga de limos y arcillas ($1,4 \times 10^6 \text{ t/año}$), lo que provoca que la concentración de sedimentos en suspensión en el caudal aguas abajo de las presas disminuya hasta un orden de magnitud (Figura 4). Los cambios en los usos del suelo (abandono de la agricultura, reforestación) en las partes medias y altas de la cuenca han reducido notablemente la escorrentía anual (Gallart y Llorens, 2004) y con ello la aportación de sedimentos, hecho que sin duda contribuye al desequilibrio sedimentario del sistema fluvial.

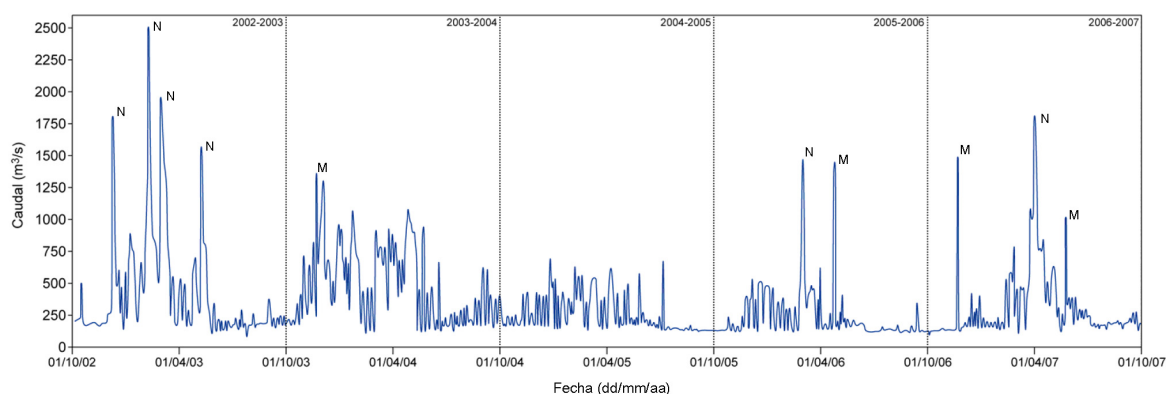


Figura 3. Hidrograma del río Ebro en Ascó (Figura 1) durante el período de estudio 2002-2004. Se indican las crecidas naturales y de mantenimiento para las que se dispone de datos de transporte de sedimentos (N: Crecida natural; M: Crecida de mantenimiento)

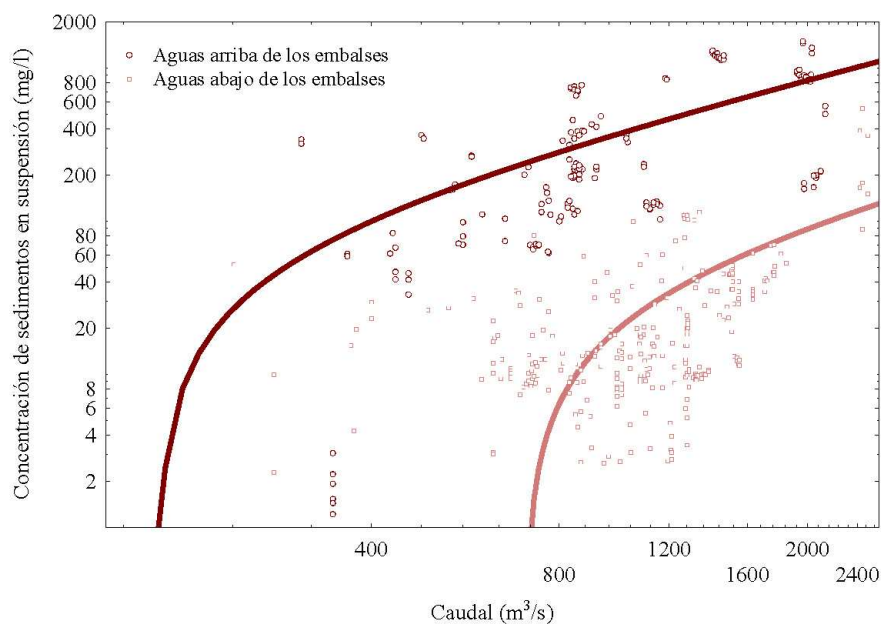


Figura 4. Modelos estadísticos generales de transporte de sólidos en suspensión en el tramo bajo del Ebro aguas abajo de embalses (modificado de Vericat y Batalla, 2006)

Carga total de sedimentos (t/a)	Sástago (aguas arriba de Mequinenza)	Móra d'Ebre (aguas abajo de Flix)
2002-2003	2.312.300 (99/1) (99/1)	536.580 (48/52) (48/52)
2003-2004	972.355 (99,8/0,002) (99,8/0,002)	371.500 (79/21) (79/21)

Entre paréntesis se indica el porcentaje de sedimentos en suspensión y el porcentaje de carga de fondo en relación a la carga total

Tabla 1. Carga total anual en el tramo bajo del río Ebro para el periodo 2002-2004 (datos de Vericat y Batalla, 2006)

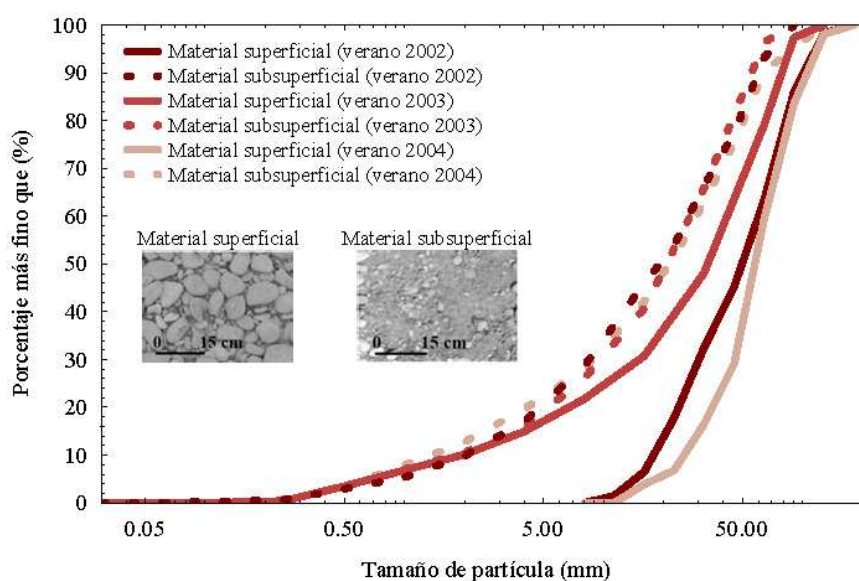


Figura 5. Ejemplo de acorazamiento en el lecho del tramo bajo del Ebro. Evolución de las distribuciones granulométricas superficial y subsuperficial de una sección de muestreo ubicada 28 km aguas abajo de la presa de Flix. Las fotografías muestran las diferencias entre la coraza (i.e. material superficial) y el material subyacente (i.e. material subsuperficial)

Cambios en la estructura sedimentaria del lecho

Además de sedimentos finos las presas retienen la totalidad de las fracciones gruesas que circulan por el cauce. Se trata de gravas y arenas que forman la estructura del lecho del río y que sustentan el hábitat fluvial. Durante crecidas el caudal erosiona el lecho del río. En ríos no regulados, el material erosionado es reemplazado por el que llega desde aguas arriba, manteniéndose una situación de equilibrio dinámico. En ríos regulados este equilibrio se rompe debido a la nula aportación de arena y grava desde aguas arriba, lo que causa una incisión más o menos sostenida del cauce (i.e. erosión por agua limpia), situación que se prolonga hasta que el río alcanza una nueva situación de equilibrio. Las observaciones de campo indican que la erosión por agua limpia en el tramo bajo del río Ebro comporta una exportación media neta de $0,18 \times 10^6$ toneladas

de sedimentos gruesos del lecho cada año. Este déficit sedimentario se traduce en una incisión media anual de 30 mm, especialmente en zonas cercanas a la presa. El nuevo equilibrio hidráulico se produce cuando el lecho del río se acoraza (i.e. las partículas superficiales son notablemente más gruesas que las subsuperficiales (Figura 5) y sólo se mueven durante grandes crecidas), la incisión se detiene, la pendiente se estabiliza y el flujo deja de erosionar el cauce. El acorazamiento conlleva habitualmente cambios del hábitat ictícola, favoreciendo unas especies y perjudicando otras. Ciertamente el río Ebro presenta áreas fuertemente acorazadas, especialmente aguas abajo de la presa de Flix, pero en general el sedimento del lecho se muestra todavía activo, hecho corroborado tanto por las altas tasas de carga de fondo medidas durante crecidas como por la incisión observada.

Los análisis granulométricos, de movilidad, y topográficos en las 8 secciones de control aguas abajo de Flix indican que, en ausencia de sedimento, la dinámica morfosedimentaria actual en el tramo bajo del río Ebro está únicamente controlada por la magnitud de las crecidas. Durante las crecidas de alta magnitud de 2002-2003 el flujo tuvo suficiente competencia para movilizar la coraza superficial. De esta forma, el resultado fue una incisión media del tramo Flix-Móra d'Ebre de 60 mm (Vericat *et al.*, 2006b). La rotura de la coraza incrementó de manera notable la disponibilidad de material y, de la misma forma, el papel de la carga de fondo en la carga anual (Tabla 1). En el 2003-2004 la baja magnitud de las crecidas facilitó el incremento del acorazamiento del lecho del río debido a la movilidad parcial del material y a la reducida reposición de sedimentos desde aguas arriba y, consecuentemente, la carga de fondo anual disminuyó (Tabla 1).

Evolución de la morfología del cauce

El análisis histórico de las fotografías aéreas permite observar cambios en la morfología del río. De entre ellos destacan: a) la reducción de áreas activas de sedimentos, b) disminución de la anchura del cauce, y c) colonización y estabilización de barras por la intrusión de vegetación arbustiva y arbórea. La colonización espontánea por vegetación arbustiva y arbórea de numerosas zonas del cauce anteriormente activas (Batalla *et al.*, 2006a) (Figura 6) sugiere que el proceso de incisión y posterior acorazamiento se ha ido produciendo a lo largo del siglo XX, y sobre todo durante la segunda mitad. Aún así, el cauce dista, todavía, de haber llegado a una situación de reequilibrio hidráulico, 40 años después del cierre de las últimas grandes presas, lo que sugiere que la escala de ajuste de un río como el Ebro a la construcción de grandes presas es del orden de 100 años.

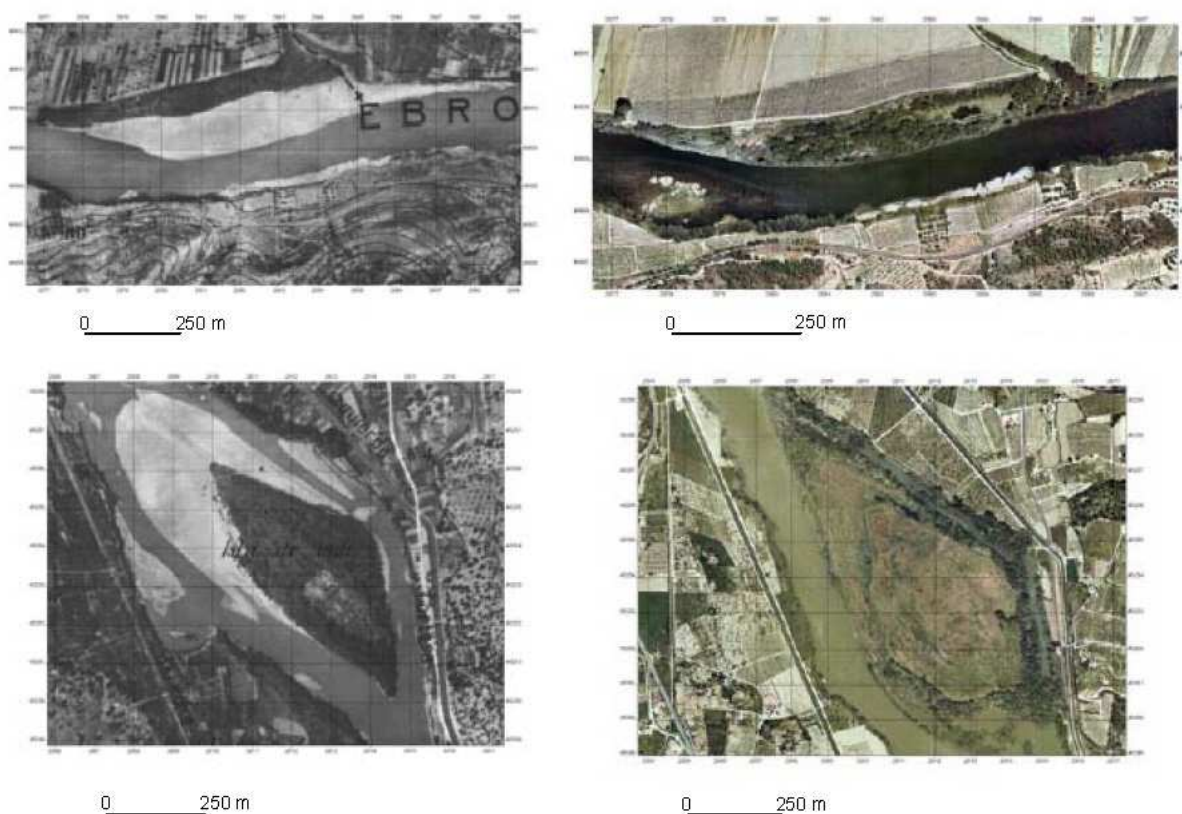


Figura 6. Ejemplos de cambios morfológicos y reducción de áreas sedimentariamente activas en el tramo bajo del Ebro entre 1927 y 2002. Arriba: Revegetación de barra lateral y reducción de cauce fluvial entre Flix y Ascó. Abajo: Revegetación de barra central y reducción de cauce fluvial en la Illa d'Audi en las proximidades de Tortosa (Figura 1). Flujo de izquierda a derecha y de arriba abajo (fuente de las fotografías aéreas: Confederación Hidrográfica del Ebro e Institut Cartogràfic de Catalunya)

MEDIDAS CORRECTORAS: LAS CRECIDAS DE MANTENIMIENTO

Proliferación de macrófitos y puesta en marcha del programa de crecidas

En el Ebro se han identificado siete especies de macrófitos, siendo las más abundantes *Ceratophyllum demersum* y *Potamogeton pectinatus* (Figura 7). La primera especie arraiga superficialmente sobre los cantos y gravas del cauce, mientras que la segunda lo hace hasta profundidades de 8-10 cm. Las crecidas se diseñan para poner en movimiento fracciones características del material del cauce (tamaño de partícula, gravas) hecho que, consecuentemente, comporta la movilización de los macrófitos arraigados. En base a información granulométrica, topográfica e hidráulica y mediante ecuaciones de inicio de movimiento, se calcula la tensión media necesaria que el caudal debe ejercer sobre el cauce para poner en movimiento los materiales. El diseño de las crecidas de mantenimiento está limitado por una serie de factores como son el funcionamiento de la presa y la disponibilidad de agua en el embalse de Riba-roja, y el ries-

go de inundación de los pueblos ribereños. La Figura 8 y la Tabla 2 presentan un ejemplo de crecida de mantenimiento (noviembre de 2003) y un resumen de los datos medios de transporte de sedimentos (Batalla *et al.*, 2006b). Se han realizado un total de cuatro crecidas de mantenimiento desde noviembre de 2003 a mayo de 2007 (no se incluye aquí la crecida de diciembre de 2002 que, aunque planificada como crecida de mantenimiento acabó siendo una crecida natural) (Figura 3). Se han realizado trabajos previos a algunas riadas para determinar el grado de recubrimiento de macrófitos y, especialmente, las características granulométricas del material del cauce. El trabajo se lleva a cabo en siete secciones de control que van desde el meandro de Flix hasta Mora d'Ebre (ver Sección 3.1). Durante las crecidas se muestrea el transporte de sedimentos en Mora d'Ebre. Como se ha indicado anteriormente, se obtienen muestras de sedimento en suspensión y carga de fondo que permiten conocer la respuesta del lecho a crecidas de mantenimiento y establecer las diferencias con las crecidas naturales (Vericat y Batalla, 2006; Batalla y Vericat, 2008).



Figura 7. *Potamogeton pectinatus* en el cauce del río Ebro en las proximidades del municipio de Garcia 20 km aguas abajo de la presa de Flix (Figura 1) (Foto: R.J. Batalla)

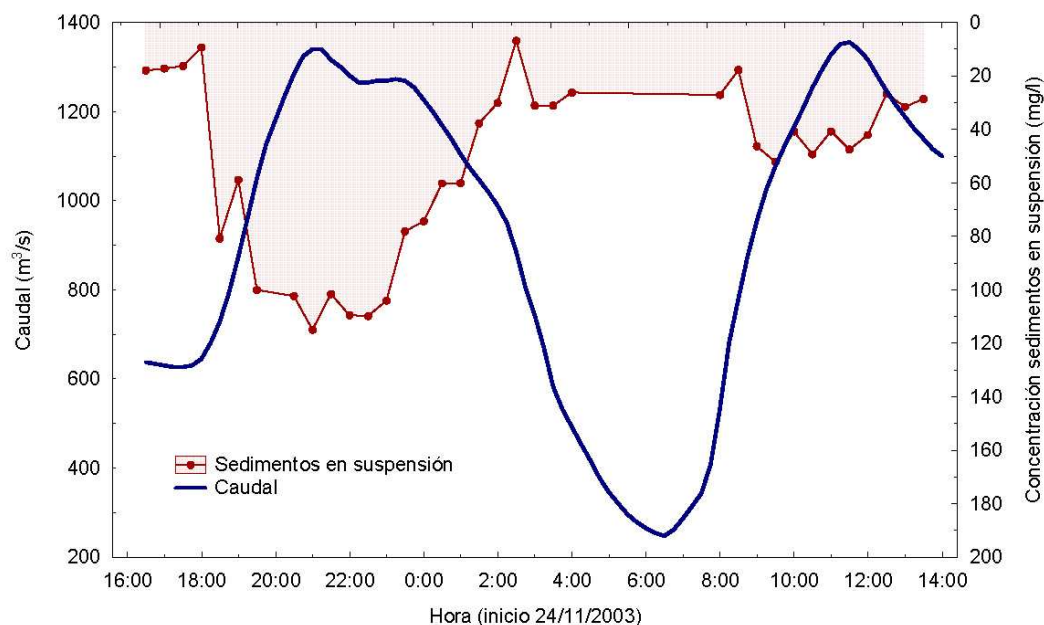


Figura 8. Hidrograma y sedimentograma de la crecida de mantenimiento de noviembre de 2003 obtenidos en la sección de muestreo de Móra d'Ebre (Figura 1) (modificado de Batalla *et al.*, 2006)

	Caudal ^a ($m^3 s^{-1}$)	Sedimento en suspensión ^b (mg l^{-1})	Carga de fondo ^c (g $m^{-1} s^{-1}$)	D_{50-ib} ^d (mm)	D_{max-ib} ^e (mm)
1a parte hidrograma	987	59,9	45,5	16,6	43,0
2a parte hidrograma	1.111	37,6	123,0	18,3	52,9
Total crecida	1.022	52,3	73,0	17,2	45,1

^a Caudal estimado en la sección de control

^b Concentración media

^c Tasa media instantánea

^d Tamaño medio (i.e. mediana) del calibre de la carga de fondo

^e Tamaño máximo de la carga de fondo

Tabla 2. Caudal y transporte de sedimentos durante la crecida de noviembre de 2003 en Móra d'Ebre (datos de Batalla *et al.*, 2006b; para más detalles ver Figura 8). Los datos se expresan como valores medios para la primera y para la segunda parte del hidrograma de crecida

Síntesis de resultados y discusión

En general las crecidas de mantenimiento tienen caudales punta (e.g. $\cong 1350 m^3/s$) con periodos de retorno más bajos ($Q_{1,5-2años}$) que algunas de las crecidas naturales ocurridas durante el periodo de estudio (e.g. $< 2000 m^3/s$, $Q_{8años}$). Pese a esto muestran una alta capacidad de transporte de sedimentos (Figura 9), llegando a tasas de 70 kg/s de material en suspensión, diez veces más que los valores obtenidos durante crecidas naturales (Batalla y Vericat, 2008). La mayor capacidad de transporte de sedimentos de las crecidas de mantenimiento se

puede relacionar con la rapidez de subida del hidrograma (i.e. *flashiness*), hecho que comporta un mayor gasto de energía del caudal sobre el cauce, favoreciendo de esta manera el arranque y movilización de los materiales y los macrófitos arraigados. A pesar de todo, las crecidas causan incisión del lecho del río y, en ocasiones, acorazamiento, hecho que se está teniendo en cuenta en el re-diseño de nuevos hidrogramas. Los efectos de las crecidas sobre la remoción de macrófitos varían con la distancia a las presas, con tasas que llegan al 100 %, sobre todo en el meandro del Flix, hasta tasas muy inferiores ($< 20 \%$)

aguas abajo (Figura 10).

Las crecidas de mantenimiento constituyen una valiosa herramienta de gestión y restauración fluvial. En el tramo bajo del Ebro se está llevando a cabo un programa con resultados positivos en cuanto a la remoción de macrófitos, aunque desiguales en el tiempo y en el espacio. Hasta el momento, debido a su baja magnitud y duración estas crecidas artificiales actúan sobre todo como complemento de las riadas naturales en cuanto a la cantidad total de sedimentos transportados. Las crecidas se han demostrado compatibles con el aprovechamiento hidroeléctrico de embalses y contribuyen además, a reducir costes de mantenimiento y mejorar el

rendimiento de determinadas obras hidráulicas asociadas a centrales hidroeléctricas fluyentes y nucleares, limpiando de macrófitos las captaciones de agua, con claros beneficios también para las estaciones de bombeo para riego. Si estas crecidas se evalúan y se rediseñan periódicamente para incrementar su efectividad (e.g. caudal, volumen, pico) y se gestionan de manera conjunta con otras alternativas como la extracción mecánica de macrófitos y la reapertura de canales secundarios en el cauce, actualmente abandonados, para reducir la erosión y recrear áreas húmedas, se pueden convertir en herramientas centrales en programas de restauración de grandes ríos regulados como el Ebro.

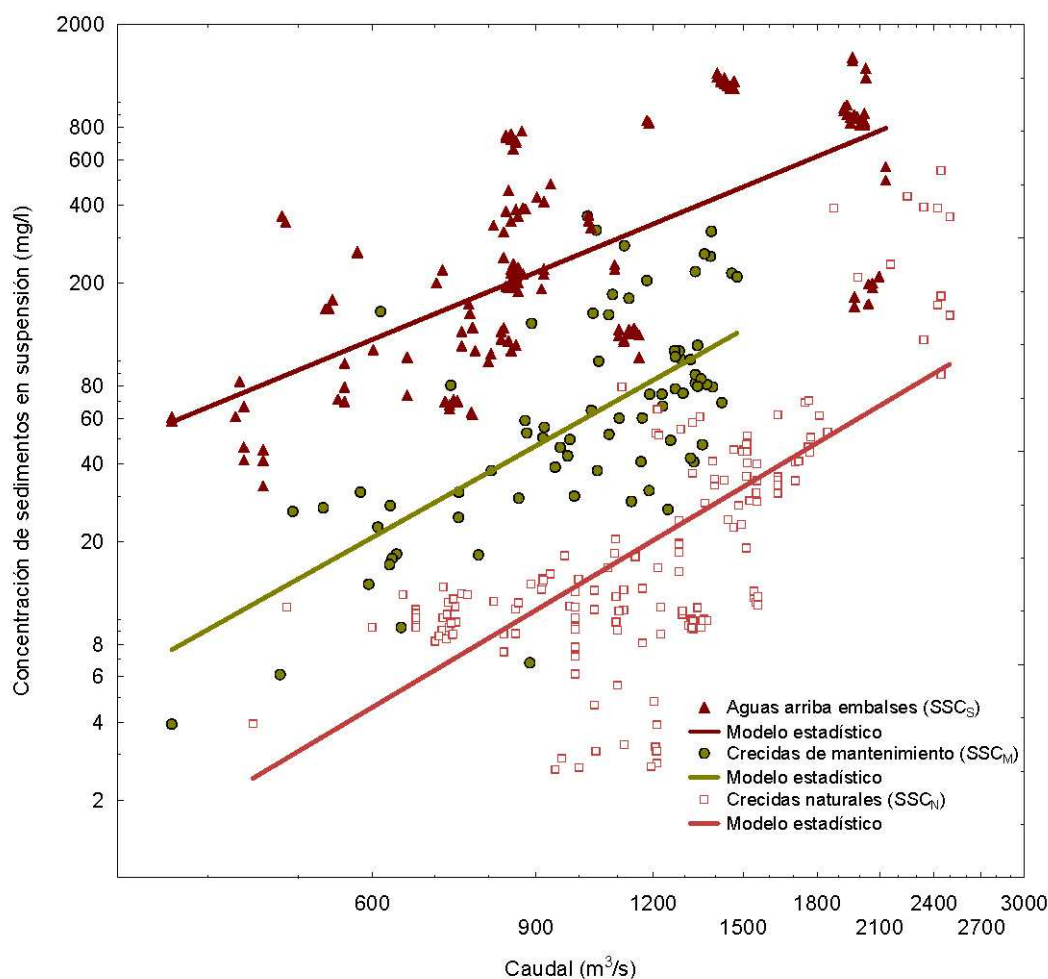


Figura 9. Relaciones estadísticamente significativas entre caudal (Q) y concentración de sedimentos en suspensión (SSC_i) durante crecidas naturales ($i = N$) y crecidas de mantenimiento ($i = M$) durante el período 2002-2007 en la sección de control de Móra d'Ebre. $SSC_N = 5 \times 10^{-6} \times Q^{2,15}$ ($n = 176$, $r^2 = 0,50$, $p < 0,01$) y $SSC_M = 5 \times 10^{-5} \times Q^{2,02}$ ($n = 88$, $r^2 = 0,45$, $p < 0,01$). Como comparativa se presenta la misma relación para la sección de Sástago aguas arriba de los embalses: $SSC_S = 9 \times 10^{-3} \times Q^{1,49}$ ($n = 153$, $r^2 = 0,47$, $p < 0,01$) (modificado de Batalla y Vericat, 2008)

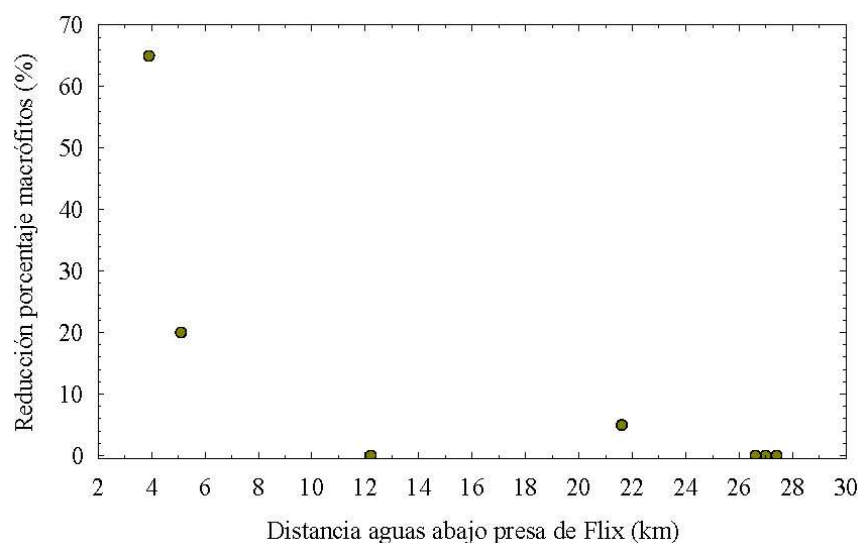


Figura 10. Reducción del porcentaje de macrófitos en siete secciones de control aguas abajo de la presa de Flix después de la crecida de mayo de 2006 (modificado de Batalla y Vericat, 2008). La reducción se ha estimado mediante la comparación de los perfiles transversales realizados con ecosonda antes y después de la crecida

RESUMEN Y CONSIDERACIONES FINALES

Los valores obtenidos en este trabajo realizado durante caudales representativos del régimen actual confirman el déficit de sedimentos acumulado en el tramo bajo del Ebro. Este hecho se atribuye habitualmente a la presencia de numerosas presas en el conjunto de la cuenca, pero debe complementarse con los efectos de una menor aportación de escorrentía y sedimentos por erosión debido a los cambios de uso del suelo (hecho que afectaría sobre todo a la carga de sedimentos en suspensión) y también, aunque en menor medida, a la canalización de numerosos tramos de río y a las extracciones de áridos del cauce fluvial (actividades que alteran directamente la carga sedimentaria de fracciones gruesas). La regulación de caudales, el déficit de sedimentos en el río y con ello la reducción de aportación sedimentaria al delta debe analizarse, por tanto, desde la perspectiva general de cambio global en el conjunto de la cuenca, en la que las presas constituyen un impacto importante pero no único. En este sentido las medidas correctoras que se plantean son, hoy por hoy, de resultado incierto.

La relación entre los ríos y sus presas es compleja y dinámica, y sus efectos últimos son aun desconocidos. La regulación y desregulación fluvial plantean importantes retos científicos y de gestión de los que se habla mucho pero se conoce muy poco, y entre las pocas experiencias existentes no es infrecuente que los resultados incluso

contradigan a los objetivos perseguidos. En este contexto, son también escasos los estudios disponibles sobre transporte de sedimentos en grandes ríos regulados. A pesar de ello, dichos ríos requieren programas de restauración fluvial que permitan minimizar los efectos de las presas sobre el funcionamiento del ecosistema fluvial de aguas abajo. En el río Ebro se trabaja en este sentido desde el año 2002 mediante el diseño y ejecución regular de crecidas de mantenimiento. Las crecidas se han elaborado en colaboración directa con Endesa Generación SA, han sido autorizadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro y, sin duda, han mejorado el estado ecológico del cauce y de las aguas superficiales (Palau *et al.*, 2004). Los datos de campo obtenidos durante y después de la primera crecida experimental y de las sucesivas naturales sobre la movilización del sedimento ($D_{max} = 64$ mm para Q_8 ; Vericat y Batalla, 2006), cambios morfológicos y sedimentológicos del cauce (incisión de 30 mm/año y acorazamiento $> 2,3$ Vericat *et al.*, 2006b) y arranque de macrófitos ($> 75\%$, Palau *et al.*, 2004) permitieron diseñar con mayor detalle el hidrograma de la segunda crecida y posteriores hasta un total de cinco. Estos resultados avalan la validez de las hipótesis físicas de partida. Sin embargo, hasta que punto las crecidas aceleran la incisión es una cuestión abierta, sobre la que se está empezando a trabajar, que deberá esperar un período más largo para obtener una respuesta.

Un trabajo de investigación de la complejidad del realizado sobre geomorfología fluvial en el tramo bajo del río Ebro aporta sin duda datos nuevos sobre la dinámica del río pero abre al mismo tiempo numerosas preguntas y plantea incertidumbres que merecen discusión y, sobre todo, más investigación. Por ejemplo, el sedimento grueso erosionado en el lecho entre Flix y Móra d'Ebre probablemente no llega a la llanura deltaica por razones de competencia hidráulica de los caudales. De ser este el caso se estaría produciendo acumulación entre Móra d'Ebre y Tortosa, seguramente aguas arriba del azud de Xerta. Se desconoce hasta que punto esta acumulación es una acreción generalizada del lecho o se trata de relleno puntual de zonas profundas (i.e. pozas). En cualquier caso, sería interesante estudiar el balance sedimentario en este tramo del río y, llegado el caso, estudiar el retorno de este sedimento grueso, importante para la estabilidad del lecho, a las zonas erosionadas aguas abajo de Flix. En este mismo sentido, podría ser factible combinar la realización de crecidas de mantenimiento experimentales con inyecciones puntuales de gravas para minimizar la posible incisión del lecho, especialmente en tramos no acorazados. Finalmente, y en relación a la proliferación de macrófitos sería interesante conocer hasta que punto serían más efectivas las crecidas de otoño después de un fuerte estiaje forzado en verano y cuál sería la influencia de un cierto aumento incluso artificial, de la concentración de sedimentos en suspensión de una manera sostenida en el cauce, sobre la proliferación de macrófitos. El calendario de crecidas debe también adaptarse al ciclo biológico anual de los macrófitos que presenta ligeros cambios de un año a otro.

REFERENCIAS

- Batalla, R.J., (2003). Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 17, 3–4, 79–91.
- 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., (2006a). River-channel changes downstream from dams in the lower Ebro River. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. B.*, 143, 1–14.
- Batalla, R.J., Vericat, D. y Palau, A., (2006b). Sediment transport during a flushing flow in the lower Ebro River. En Rowan, J.S., Duck, R.W. y Werritty, A. (eds.), *Sediment dynamics and the hydromorphology of fluvial systems*, Wallingford, IAHS Publication 306, 37–44.
- Batalla, R.J. y Vericat, D., (2008). Hydrological and Sediment Transport Dynamics of Flushing Flows: Implications for Management in Large Mediterranean Rivers. *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/rra.1160.
- Gallart, F. y Llorens, P., (2004). Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry on the Earth*, 29, 769–773.
- Milliman, J.D. y Meade, R.H., (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1–21.
- Owens, P.N. y Batalla, R.J., (2006). Fluxes and storage of sediment in rivers: basin, European and global scale perspectives. *SEDYMO Conference on Sediment Dynamics and Pollutant Mobility in River Basins*, 26–29 March 2006, Hamburg, Germany.
- Palau, A., (1994). Los mal llamados caudales ecológicos. Bases para una propuesta de cálculo. *Obras Públicas (OP)*, 28, 84–95.
- Palau, A., (2006). Integrated environmental management of current reservoirs and regulated rivers. *Limnetica*, 25(1-2), 287–302, (The Ecology of the Iberian inland waters: Homage to Ramon Margalef).
- Palau, A., Batalla, R., 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). *HYDRO 2004- A new era for Hydropower*, Porto, Portugal, 18–20 Octubre 2004.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. y Cobo, R., (1999). Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hasta el río Ebro (España). *Proc. Congress on Hydrological and geochemical processes in large-scale river basins*, HIBAM, Shahin, 1985.
- Vericat, D. y Batalla, R.J., (2006). Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 79, 72–92.

- 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.
- Vericat, D., Batalla, R.J. y Garcia, C., (2006b). Breakup and reestablishment of the armour layer in a highly regulated large gravel-bed river: the lower Ebro. *Geomorphology*, 76, 122–136.
- Vericat, D. y Batalla, R.J., (2007). Ríos y presas: una relación compleja. El caso del Ebro. *Revista de Investigación y Ciencia*, 10-11, Noviembre 2007.
- 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.