



DEPOSICIÓN DE SEDIMENTOS FINOS DURANTE UNA CRECIDA EN UN TRAMO DEL EBRO MEDIO

Overbank deposition during a flood in a reach of the middle Ebro River

Deposición de sedimentos en el Ebro

J. Carles Balasch¹, Damià Vericat² y R. J. Batalla³

(1) *Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl - Universitat de Lleida*
Av. Alcalde Rovira Roure, 191, 25198 Lleida

Telf. 973 003736 - Fax 973 702613 - E-mail: cbalasch@macs.udl.es

(2) *Centre Tecnològic Forestal de Catalunya - Pujada del Seminari, s/n. E-25280 Solsona*

Telf. 973 481752 - Fax 973 481392 - E-mail: damia.vericat@ctfc.es

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl - Universitat de Lleida

Av. Alcalde Rovira Roure, 191, 25198 Lleida

(3) *Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl - Universitat de Lleida*

Av. Alcalde Rovira Roure, 191, 25198 Lleida

Telf. 973 702676 - Fax 973 702613 - E-mail: rbatalla@macs.udl.es

Centre Tecnològic Forestal de Catalunya - Pujada del Seminari, s/n. E-25280 Solsona

Resumen: Este trabajo presenta el balance sedimentario de un tramo de 106 km del río Ebro comprendido entre Monzalbarba y Sástago durante la crecida $Q_{7.5}$ años, de finales de febrero de 2003. El balance se ha construido a partir de datos hidrológicos, muestras discretas de agua y sedimento en suspensión en cinco secciones de control, y documentación sobre áreas inundadas en la llanura aluvial del río. Los resultados indican que el tramo de estudio se comportó como un sumidero de sedimentos durante la crecida, ofreciendo un balance negativo de casi 90.000 t (i.e., 845 t/km), las cuales quedaron depositadas en el interior del sistema. Este valor representa el 19% de la carga sólida estimada en la entrada del tramo de estudio. Asumiendo que la mayor parte del material quedó retenido en la llanura de inundación, este valor representa una deposición neta media de 12 mm, tasa similar a las referenciadas para otros grandes ríos durante episodios de similar magnitud.

Palabras clave: crecida, sedimentograma, balance de sedimentos, sedimentación, río Ebro.

Abstract: This work reports on the sediment budget of a 106-km reach of the Ebro River, between Monzalbarba and Sástago during the 7.5-year flood occurred in late February 2003. The budget has been constructed from hydrological data, water and suspended sediment discrete samples obtained at five control sections, and official data on flooded areas during the event. Results indicate that the study reach behaved as a sink of sediments, with a negative budget of around 90,000 t (i.e., 845 t/km) that were deposited within the system during the flood. This value represents 19% of the solid load estimated at the entrance of the fluvial system and indicates a mean sedimentation rate of 12 mm on the river's floodplain. Values in the same range have reported for other large rivers during flood events of similar magnitude.

Keywords: flood, sedigraph, sediment balance, deposition, Ebro River.



J. Carles Balasch, Damià Vericat & R. J. Batalla (2007). Deposición de sedimentos finos durante una crecida en un tramo del Ebro medio. *Rev. C & G.*, 21 (1-2), 41-55.

1. Introducción

Las crecidas de los ríos constituyen el mecanismo natural de transferencia de los sedimentos generados en las vertientes de una cuenca y en el propio cauce hasta la desembocadura del sistema hidrográfico o su confluencia con un tributario (Baker *et al.*, 1988; Beven y Carling, 1989). Sin embargo, la dinámica del transporte de los sedimentos fluviales, lejos de presentar una regularidad y cadencia, adolece de una alta variabilidad temporal y espacial (Walling y Webb, 1989). En primer lugar, la mayor parte del transporte acontece durante un periodo muy reducido, en comparación con la extensión temporal de los caudales circulantes, y ello supone una dificultad para su correcto muestreo y análisis (Walling, 1984). En las grandes cuencas fluviales el factor de escala espacial introduce una nueva complejidad: la distribución de los episodios de lluvia, además de irregular, suele limitarse a una porción del conjunto de la cuenca y este hecho condiciona la generación localizada de la escorrentía superficial y la emisión de sedimentos procedentes básicamente de dichos sectores (e.g., Gregory y Walling, 1973). En el análisis de la dinámica por episodios individuales, las curvas de histéresis muestran la relación espacio-temporal entre las zonas de generación de escorrentía y las áreas fuente de sedimentos. Por último, la capacidad de transporte y la transferencia y dispersión de sedimentos a lo largo del curso no es uniforme y, por tanto, conlleva modificaciones de las cantidades transportadas en sentido longitudinal. Aun contando con datos regulares y distribuidos referentes al transporte de los tributarios de la cuenca, el último problema desvela importantes inconvenientes en la estimación de balances sedimentarios en el eje principal de grandes cauces, y no debe ser minimizado en los estudios de planificación del transporte fluvial de sedimentos (Swanson *et al.*, 1982).

Buena parte de los estudios sobre transporte de sedimentos en los ríos de la Península Ibérica han establecido la exportación media de sedimentos en una sección concreta del curso, también conocida como tasa de degradación específica. Sin embargo, no se han analizado los cambios en el flujo sedimentario con el apoyo de otras secciones sucesivas que permitirían observar las variaciones a lo largo del eje de drenaje. De hecho, en los ríos península-

res son escasos los estudios cuantitativos sobre interrupción del transporte de sedimentos por la decantación de parte de los sedimentos en suspensión, correspondan o no a tramos regulados. Probablemente, una de las cuencas mejor estudiada es la del río Ebro, donde se dispone de aproximaciones en la cuantificación del transporte de sedimentos de diferente magnitud a lo largo del siglo XX e inicios del XXI (e.g., Bayerri, 1934-1935; Catalán, 1969; Sanz *et al.*, 1999; Guillén y Palanques, 1999; Roura, 2004; Vericat y Batalla, 2005).

En este trabajo se presenta el balance sedimentario de las partículas en suspensión calculado para un tramo del curso medio del río Ebro durante el episodio de crecida de finales de febrero y principios de marzo de 2003, acotando el transporte asociado a un periodo definido del hidrograma de crecida, entre dos puntos separados por un centenar de kilómetros. Los cambios observados se han relacionado con la dinámica particular de decantación de materiales finos sobre la llanura de inundación, bien desarrollada en el curso medio y bajo del río Ebro.

2. Área de estudio

2.1. La cuenca del río Ebro

El río Ebro drena un área de 84.982 km² situada en el nordeste de la Península Ibérica (Figura 1). La precipitación media anual varía entre los 2.000 mm en las zonas de cabecera, y los 300 mm en las depresiones internas. La pendiente media del curso fluvial oscila entre $2,9 \times 10^{-3}$ en las zonas de cabecera de la cuenca (i.e., desde Fontibre a Miranda), y $6,7 \times 10^{-4}$ en el curso medio con meandros libres (Ollero, 1992). El caudal medio en Tortosa, última de las estaciones de aforo antes de la desembocadura, es de 452,5 m³/s (A027, serie 1912-2004). Los recursos hídricos generados por el Ebro hasta Tortosa han disminuido un 40 % en 50 años (1945-1995), y ello ha sido atribuido, aproximadamente a partes iguales, a un incremento en el consumo para irrigación, a un cambio del clima (precipitación y evapotranspiración) y a un incremento de la cubierta vegetal en las cabeceras (MIMAM, 2000; Gallart y Llorens, 2002). Además, el régimen hidrológico

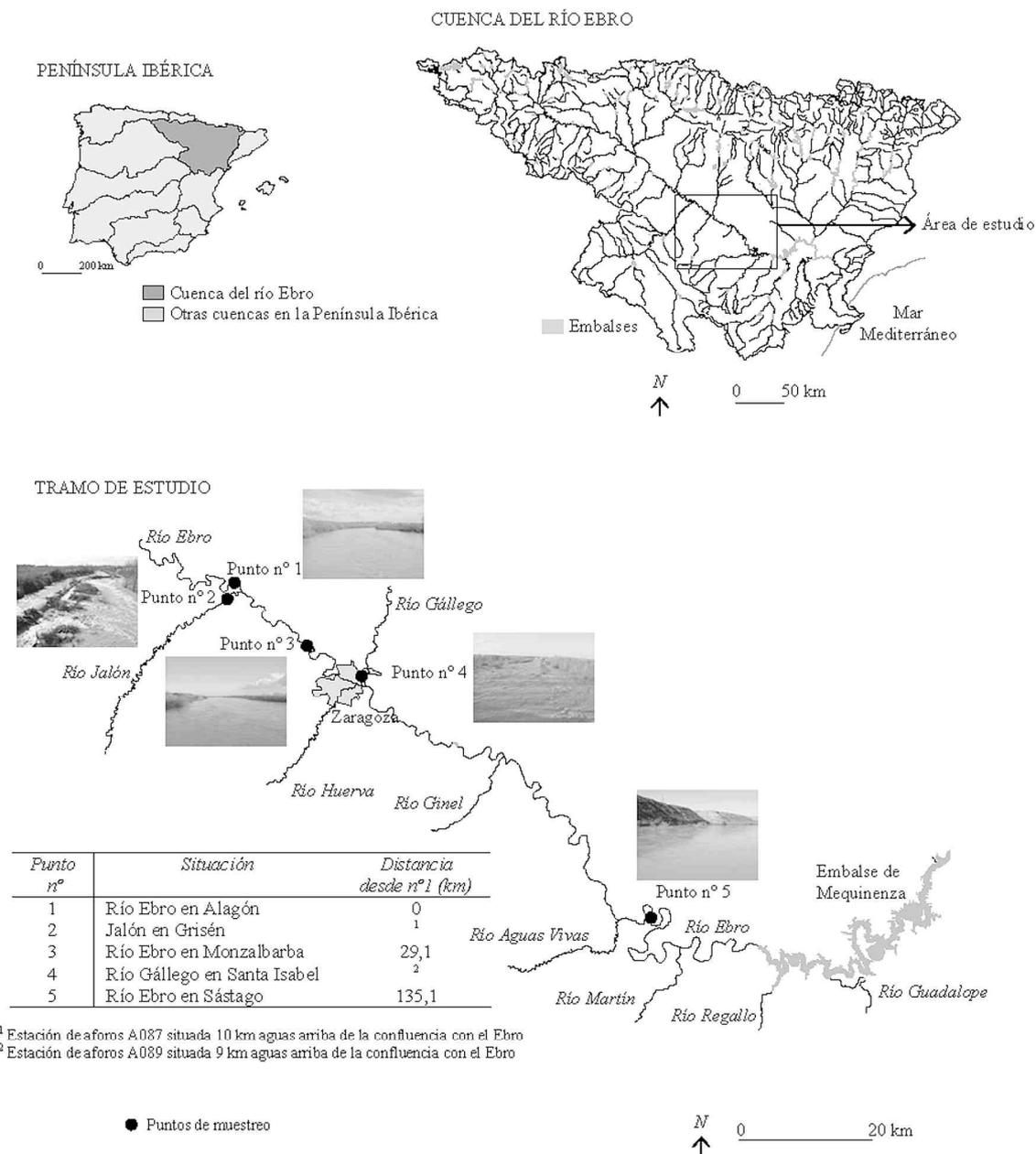


Figura 1. Situación del área de estudio en el tramo medio del río Ebro
 Figure 1. Location of the study area in the middle reach of the Ebro River.

del río Ebro ha sido profundamente alterado por alrededor de 190 embalses que regulan en torno al 60% de la aportación hídrica anual (Batalla *et al.*, 2004; Frutos *et al.*, 2004). El caudal máximo estimado en Tortosa antes de la regulación de la cuenca fue de 12.000 m³/s en el 1907, claramente superior al registrado en 1961 de 4.580 m³/s (López-Bustos, 1981) o en 1982 de 3.300 m³/s (Novoa, 1984), ambos en régimen regulado. La magnitud de las crecidas frecuentes en Tortosa (i.e., Q₂-Q₂₅, donde Q_i es el caudal para un período de retorno de i años) se ha reducido un 25% (Batalla *et al.*, 2004). Aunque la reducción de los caudales de crecida es notable, el río todavía conserva capacidad para transportar sedimentos (Vericat y Batalla, 2004). A su vez, las presas alteran la continuidad del transporte de sedimentos. Por ejemplo, la retención de sedimentos en suspensión en el tramo bajo del río Ebro por parte del complejo de embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix oscila entre el 70 y el 90% (Sanz *et al.*, 1999; Vericat y Batalla, 2006) dependiendo de la magnitud y duración de las crecidas. Los cambios hidrológicos y las alteraciones en la continuidad del transporte de sedimentos generan efectos morfológicos e inducen alteraciones ecológicas en las secciones ubicadas aguas abajo de los embalses. En el caso del tramo bajo del río Ebro éstos incluyen: a) déficit de sedimentos y cambios en la morfología y topografía del cauce (Vericat y Batalla, 2004, 2005) y b) proliferación de vegetación acuática (Palau *et al.*, 2004).

2.2. El tramo del río Ebro entre Alagón y Sástago

Se ha estudiado un sector del Ebro medio comprendido entre los municipios de Alagón y Sástago (Figura 1), constituido por un tramo de 135,1 km, y con una pendiente media de 5x10⁻⁴ (Ollero, 1992). El caudal medio en la estación de aforos A011, en Zaragoza (serie 1913-2004), es de 233,5 m³/s, mientras que el caudal pico después de la regulación de la cuenca fue de 4.130 m³/s, en enero de 1961 (López-Bustos, 1981; Ollero, 1992). Durante el transcurso del tramo de estudio, el río Ebro presenta un cauce meandriforme, con un índice de sinuosidad general de 1,56 y con la presencia de meandros prácticamente estrangulados (Figura 2a). Esta forma sinusoidal del cauce facilita la pér-

didada de energía del flujo y, consecuentemente, la disminución de la capacidad de transporte de sedimentos. La carga anual de sedimentos en suspensión transportada en Sástago para un periodo de crecidas moderadas durante los años 1998-1999 se ha estimado en torno a las 500.000 t (Roura, 2004), mientras que Vericat y Batalla (2006) calcularon una carga media anual de sedimentos en suspensión durante el año hidrológico 2002-2003 y con crecidas de magnitud Q₁₀ alrededor de 2.300.000 t.

3. Hipótesis de partida

Para realizar el análisis de los cambios en la dinámica del transporte en suspensión registrada por el río Ebro durante el episodio de febrero-marzo de 2003 se ha construido un balance de las masas de los sedimentos transportados en suspensión por el cauce del río entre dos secciones transversales suficientemente alejadas, fijando un intervalo temporal del transporte delimitado por el fragmento equivalente del hidrograma de crecida para las dos secciones. La elaboración del balance de masas se ha realizado a partir de las siguientes hipótesis de partida:

- a) el tramo estudiado se comporta como un sistema hidrosedimentario cerrado. Los principales afluentes al tramo estudiado, los ríos Huerva en Zaragoza, Ginel en Fuentes de Ebro y Aguas Vivas en la Zaida, experimentaron crecidas insignificantes por la escasa lluvia y, por tanto, sus aportaciones al Ebro no se tuvieron en consideración. Las aportaciones medias de estas tres cuencas son inferiores al 2,5 % de las del Ebro en Zaragoza.
- b) los cambios registrados en dicho sistema son debidos a procesos relacionados con cambios en la capacidad de transporte del río debidos, por ejemplo, a una disminución de la velocidad del agua. Este fenómeno se relaciona con factores morfológicos e hidráulicos, como un aumento de la sinuosidad del curso, una disminución de la pendiente del cauce, pero en especial por el acceso de las aguas de crecida a la llanura de inundación, donde la disminución de la velocidad respecto a la del canal preferente de desagüe es considerable (Figura 2b).



Figura 2. (a) Los meandros del Ebro en las proximidades de la sección de control n° 5 (Sástago), (b) Inundación de la llanura aluvial del Ebro aguas arriba de Sástago durante una crecida de febrero de 2003.

Figure 2. (a) The meandering Ebro in the vicinity of the downstream control section n° 5 (Sástago), (b) The Ebro River flooding its floodplain near Sástago during a February 2003 event.

- c) el tributario sedimentario más activo durante esta crecida fue el río Jalón, lo cual ha sido confirmado con el muestreo de las sucesivas concentraciones en la confluencia de este río con el Ebro (Alagón).
- d) se pueden interpolar los valores de concentración de sedimentos en suspensión no observados a partir de las curvas de recesión (sedimentogramas) obtenidas ajustando los valores observados. Ello es plausible ya que se considera que la crecida del río Jalón fue anterior a la del Ebro, lo cual ha sido contrastado con los hietogramas de lluvia de las cuencas y los hidrogramas de caudal de cada curso.

4. Metodología

La metodología empleada en este estudio se basa en la recogida de datos pluviométricos y foronómicos, en el muestreo de agua y sedimentos en suspensión en diversas secciones de control, y en el análisis posterior de los datos de campo para la elaboración del balance de masas del tramo fluvial estudiado.

4.1. Secciones de control

Dentro del tramo de observaciones hidrológicas y sobre el transporte sedimentario (Alagón-Sástago), el tramo fluvial que se ha utilizado para establecer el balance hidrosedimentario es algo más corto y corresponde con el sector delimitado por las poblaciones de Monzalbarba, aguas arriba de Zaragoza, y Sástago a la entrada del embalse de Mequinenza (Figura 1). Se han considerado como entradas al sistema las aportaciones hídricas y sedimentarias observadas en el Ebro en Monzalbarba y en el Gállego en Zaragoza. La sección de control de Monzalbarba se encuentra situada en el puente que cruza el río Ebro para unir Monzalbarba con Alfocea (punto 3, Figura 1). Esta sección ha sido preferida a la de Zaragoza por presentar mejores condiciones para el muestreo manual de la concentración de sedimentos en suspensión durante la crecida. El río Gállego fue aforado en Santa Isabel y muestreado en el puente de Zaragoza (punto 4, Figura 1) a escasa distancia del aforo.

La salida del sistema se ha delimitado en el paso del Ebro por Sástago y en ella se han establecido los caudales y muestreado el sedimento en suspensión. La sección transversal de Sástago coincide con el puente que comunica por carretera esta población con Alborge (punto 5, Figura 1). Poco más abajo, las aguas del Ebro entran en el embalse de Mequinenza y el tramo fluvial pasa a estar inundado.

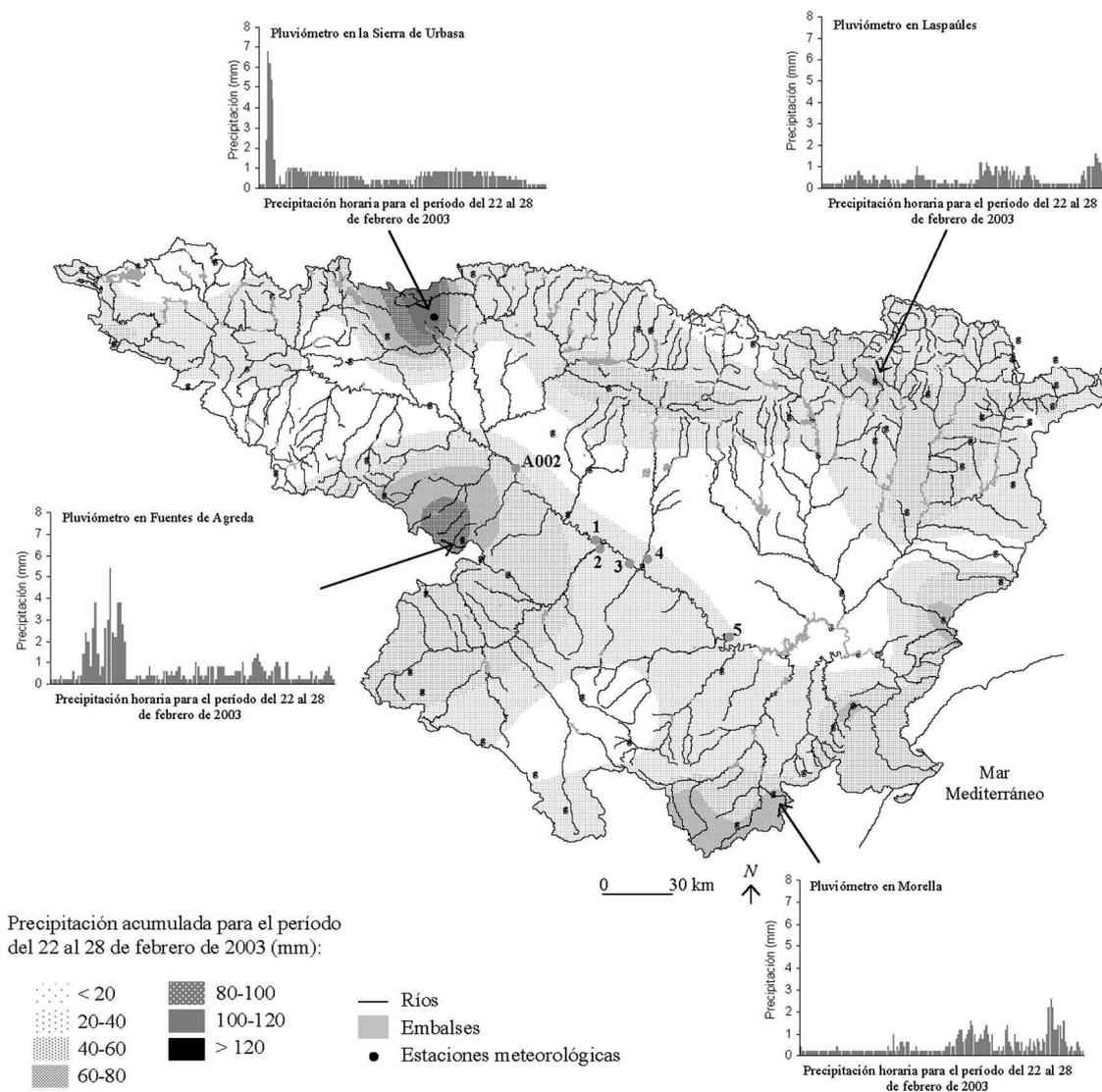
Ambas secciones de balance se encuentran separadas por una distancia de unos 106 km siguiendo el trazado del lecho del río y el desnivel entre ellas es de unos 65 m. La distancia del tránsito hidrológico para el caudal punta es de alrededor de 14 horas.

4.2. Precipitación, hidrometría y concentración de sedimentos en suspensión

La pluviometría correspondiente al episodio de finales de febrero de 2003 se ha obtenido a partir de los datos de precipitación horaria registrados en la mayoría de los pluviógrafos (65 estaciones) que explota el Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (en adelante, SAIH de la CHE). Con los registros acumulados a lo largo del episodio, entre el 22 y 28 de febrero, se han establecido los hietogramas de intensidad de cada estación y se han distribuido sobre la superficie de la cuenca (Figura 3). El trazado de isohietas entre los totales acumulados por observatorio ha permitido establecer la distribución espacial de la lluvia y la situación de los máximos. Finalmente, la precipitación media ponderada sobre la cuenca se ha estimado por el método de integración de isohietas.

Para la caracterización hidrológica del río Ebro se han utilizado los datos hidrométricos de las estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro en Zaragoza (A011, serie 1913-2004) y Tortosa (A027, serie de 1912-2004), así como puntualmente datos de Castejón y Sástago.

El río Ebro no dispone de estación de aforo en Monzalbarba y los caudales para dicha sección se calcularon a partir de los registros del Ebro en Zaragoza (A011). El tránsito del hidrograma entre la estación de aforo de Zaragoza y la de



Puntos de control (muestreo y aforos):

- 1● Río Ebro en Alagón
- 2● Jalón en Grisén
- 3● Río Ebro en Monzalbarba
- 4● Río Gállego en Santa Isabel
- 5● Río Ebro en Sástago
- A002● Estación de aforos en Castejón

Figura 3. Distribución de la precipitación en la cuenca del Ebro durante el episodio de lluvias de final de febrero de 2003. Se presentan los hietogramas de los principales núcleos tormentosos.

Figure 3. Rainfall distribution in the Ebro Basin during the last week of February 2003. Rainfall intensities of the main thunderstorms are presented.

Monzalbarba supone un retroceso aguas arriba y, debido a la corta distancia (i.e., 15,4 km), se ha realizado manteniendo los caudales de Zaragoza y aplicándoles un desfase negativo de aproximadamente 2,3 horas, de acuerdo con la velocidad media (i.e., 1,9 m/s) observada en la sección de aforo de Zaragoza para dicho rango de caudales.

La estación de aforos del Ebro en Sástago dejó de ser funcional hace unos años y, por tanto, los caudales para esta sección se derivaron también del hidrograma obtenido para el Ebro en Zaragoza (A011) y la suma de los aportes del río Gállego (A089), con un proceso de propagación de la avenida siguiendo el método de Muskingum y mediante un ajuste del pico en relación a datos de propagación de avenidas anteriores (ver Vericat y Batalla, 2005 para más detalles). En este caso el desfase temporal entre las dos estaciones fue de 12 horas. El río Gállego tiene una estación de aforos en Santa Isabel (A089) a 9 km aguas arriba de la confluencia con el Ebro, con un tiempo estimado de tránsito de 0,67 h. para dicho desplazamiento.

Las muestras para determinar la concentración de sedimentos en suspensión de las aguas se tomaron en las tres secciones principales de control (Ebro en Monzalbarba y Sástago, y Gállego en Zaragoza, Figura 1), más otras dos situadas aguas arriba del sistema para el control del papel del río Jalón durante esta crecida (Ebro y Jalón en Alagón, Figura 1). El periodo de muestreo, los valores de concentración y el caudal instantáneo asociado a cada caso se presentan en la tabla 1. Para complementar dichos registros y extender el periodo con información de transporte sedimentario, se han añadido los datos sobre concentración que obtiene sistemáticamente la Red de Calidad de Aguas establecida por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Estos datos han permitido conocer mejor la curva de recesión del sedimentograma, que no pudo ser muestreada completamente por los autores.

4.3. Determinación de las concentraciones de sedimentos en suspensión

Para la determinación de las concentraciones de sedimentos en suspensión se han obtenido muestras de agua de subsuperficie en el centro de cada una de las secciones con un bidón de polietileno.

Las muestras se han filtrado con membranas de celulosa de $1,2 \mu\text{m}$ de poro para el cálculo del peso neto de los sedimentos de cada una de ellas. En la sección de Sástago se estimó la desviación entre las concentraciones obtenidas siguiendo la metodología descrita anteriormente (i.e., CSS), y las concentraciones de muestras de agua obtenidas en el mismo instante utilizando un muestreador de integración vertical DH-74 (i.e., $\text{CSS}_{\text{DH-74}}$). El cociente medio entre CSS y $\text{CSS}_{\text{DH-74}}$ fue de 0,9. Las concentraciones de subsuperficie se consideran suficientemente representativas de la concentración media en la columna de agua. Vericat y Batalla (2006) han analizado la variabilidad espacial de las concentraciones de sedimentos en suspensión a lo largo de la misma sección en Sástago. El cociente entre la concentración media en la sección y la concentración en el centro de la sección osciló entre 1,02 y 1,12. Se concluye, por tanto, que el muestreo es representativo de la concentración de sedimentos en suspensión en toda la sección.

4.4. Periodo hidrológico sobre el cual se establece el balance sedimentario

La definición del periodo hidrológico utilizado como base para la cuantificación del transporte (o intervalo de control) viene subordinada al intervalo máximo abarcado por las muestras de concentración de sedimentos en suspensión en las tres secciones de control (Ebro en Monzalbarba y Sástago, y Gállego en Zaragoza) y este intervalo no se adapta exactamente con el hidrograma completo de la crecida hidrológica. Por esta razón, el ajuste del periodo estudiado se ha definido a partir del hidrograma de crecida en Monzalbarba, donde se acota el inicio del balance con la primera muestra obtenida allí durante la curva de ascenso del hidrograma (3-M1, Figura 4) y se finaliza con el caudal mínimo correspondiente al collado que separa esta crecida de la siguiente (mediados de marzo de 2003). El periodo así establecido comprende un total de 117 horas (tramo punteado de los hidrogramas de la figura 4). El mismo periodo ha sido empleado, con el correspondiente tránsito horario, en el cómputo de las aportaciones líquidas y sólidas que han pasado las secciones del río Gállego en Zaragoza y Ebro en Sástago. Para determinar el

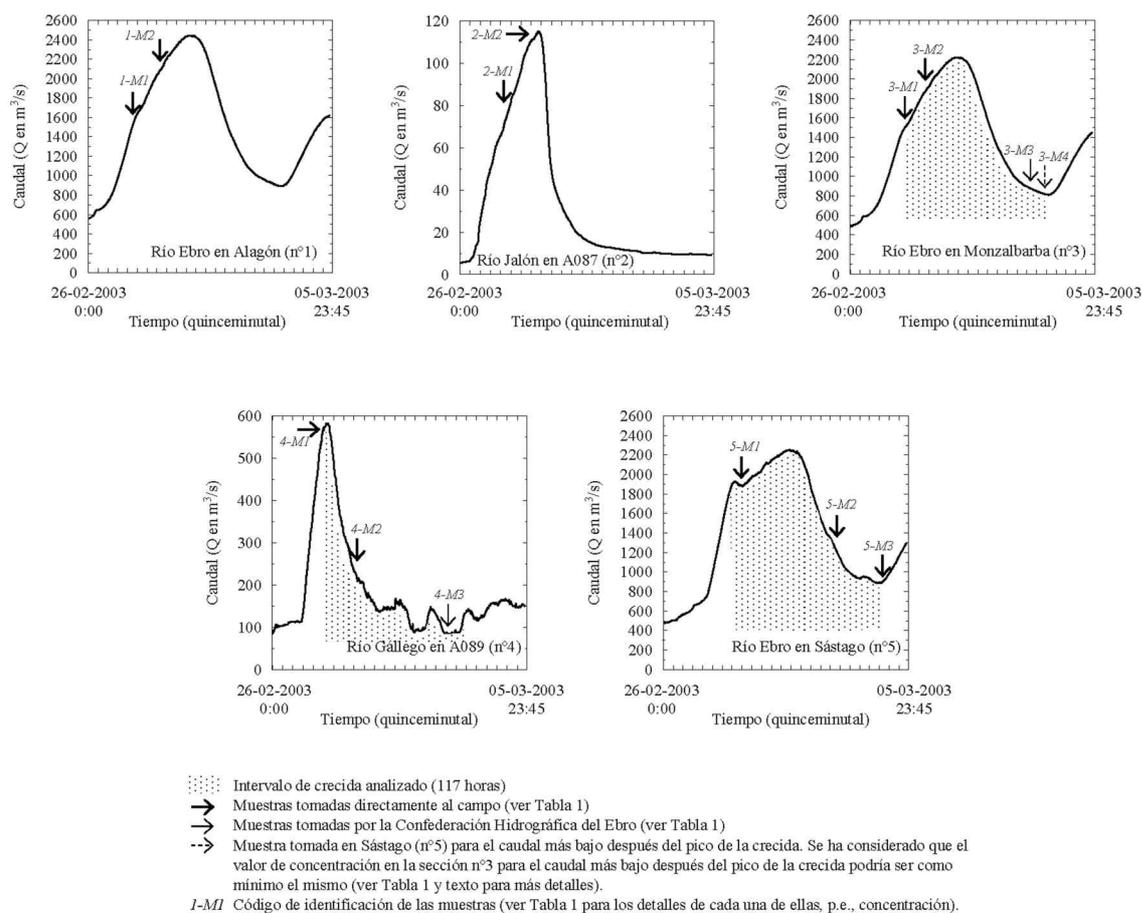


Figura 4. Hidrogramas registrados en la secciones de control y distribución de las muestras de sedimento en el tramo del Ebro Medio durante la crecida analizada.

Figura 4. Hydrographs at the control sections with indication of sampling distribution during the event in the Middle Ebro River.

fragmento de hidrograma de base para los cálculos en Sástago, comparable al acotado en Monzalbarba, se han seguido los mismos criterios, es decir, definir el momento en que se produjo el collado o mínimo final entre el paso de dos crecidas y retroceder horariamente el periodo consignado en Monzalbarba (i.e., 117 horas).

4.5. Cálculo del transporte de sedimentos en suspensión

Los puntos de aforo hidrológico no coinciden con los puntos de obtención de valores de concentración de sólidos en suspensión. Sin embargo, se ha preferido fijar los puntos de cálculo del transporte en las secciones con información de sedimento y desplazar la información hidrológica, a causa de la variabilidad que acompaña al transporte de sedimentos.

El comportamiento del sedimentograma de la crecida durante el período de análisis, y por tanto después de producirse el máximo de concentración, se ha ajustado en el caso de las secciones de Monzalbarba y Sástago a una función exponencial decreciente delimitada por los valores observados, suponiendo que en dicha recesión el sedimento se decanta siguiendo una ley de este tipo. Dicha función se ha aplicado al intervalo de análisis y se han obtenido las concentraciones medias horarias. Para obtener el transporte neto horario se ha multiplicado cada concentración media por el caudal medio horario, y finalmente se han sumado los valores horarios para la estimación del transporte total. En la sección del Gállego en Zaragoza se han empleado dos funciones (dos rectas concatenadas) obtenidas con los 3 puntos disponibles. La primera recta entre las concentraciones 1ª y 2ª, y la segunda recta, entre los puntos 2º y 3º, de menor pendiente que la anterior. Se probó de ajustar una curva exponencial negativa a dichos puntos, pero su distribución en el tiempo producía un coeficiente de regresión muy bajo y se desestimó.

4.6. Balance de sedimentos

Los transportes totales obtenidos en la sección de entrada y salida del sistema permiten la estimación de un balance en el transporte, considerando

que no hay otras entradas significativas en el sistema. Por tanto, el resultado del balance será indicativo del dominio de dinámicas erosivas o sedimentarias en el tramo.

Para conocer la tasa espacial de los cambios en el transporte se debe cuantificar la extensión del área inundada sobre las llanuras laterales del Ebro en el tramo estudiado. Así, se ha utilizado una cartografía digital de la llanura inundada obtenida por Losada *et al.* (2004) en el mismo tramo durante la crecida anterior (entre el 6 y el 13 de febrero de 2003). Se ha escogido la imagen correspondiente al día 6 de febrero de 2003, en que el caudal máximo instantáneo ($Q_{c_i} = 2.236 \text{ m}^3/\text{s}$, en Zaragoza) fue muy similar al caudal máximo instantáneo de este estudio ($Q_{c_i} = 2.220 \text{ m}^3/\text{s}$, en Zaragoza), para reconstruir la superficie afectada por el anegamiento, considerando que no se han producido cambios en la geometría hidráulica del canal y llanuras de inundación. Conocida el área inundada se puede realizar una asignación de valores promedio de erosión o sedimentación sobre la misma, estimados a partir del balance.

5. Observaciones y análisis

5.1. Hidrología de la avenida

La lluvia acaecida entre los días 22 y 28 de febrero de 2003 sobre la cuenca del río Ebro (SAIH de la CHE) tuvo una distribución irregular con dos máximos situados en las cabeceras de los ríos Jalón (margen derecho del río Ebro), Arga y Ega (ambos en el margen izquierdo) (Figura 3). La precipitación máxima acumulada durante el suceso en la Sierra de Urbasa fue de 121,6 mm. La precipitación media ponderada hasta el punto de control de Sástago (punto nº 5 en la Figura 1) fue de 32,4 mm. Previamente a este suceso, tuvo lugar a principios del mismo mes (4-13 de febrero) un episodio de lluvias copiosas que generaron unas fuertes crecidas en el río Ebro, incrementando la humedad de los suelos y recargando los acuíferos de la cuenca (Ollero *et al.*, 2004). Estas circunstancias debieron desencadenar una respuesta hidrológica más rápida en la crecida de finales de febrero.

A consecuencia de las lluvias señaladas, el río Ebro registró una crecida ocurrida entre el 25 de

febrero y el 5 de marzo de 2003 cuyos valores máximos de caudal (SAIH de la CHE) fueron de $Q_{c_i} = 2.080 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación de aforos A002 en Castejón (punto situado justo aguas abajo de las áreas de mayor precipitación), de $Q_{c_i} = 2.220 \text{ m}^3/\text{s}$ en la A011 en Zaragoza ($Q_c = 2.174 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal con un período de retorno de 7,5 años, de acuerdo con la serie 1913-2004 de la CHE), y de $Q_{c_i} = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$ en Sástago (propagado). El caudal máximo específico (q_{ci}) para este episodio fue en Castejón, Zaragoza y Sástago, respectivamente de 0,082, 0,055 y $0,046 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$. El río Jalón tuvo un máximo de unos $115 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,012 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$) en la A087 en Grisén, y el río Gállego de $580 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,144 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$) en la A089 en Santa Isabel (Figura 4). El volumen de escorrentía total generada en Sástago durante este episodio ascendió a 790 hm^3 . El coeficiente de escorrentía global fue de 0,48, valor relativamente elevado a causa de las condiciones antecedentes de humedad de los suelos de la cuenca y el estado de recarga de los acuíferos. Los hidrogramas correspondientes a las secciones de estudio se muestran en la figura 4.

5.2. Transporte de sedimentos

El conjunto de los datos referidos a las concentraciones de sedimentos en suspensión medidos durante el estudio se relaciona en la tabla 1, y en la figura 4 se indica su distribución respecto a los hidrogramas de la crecida. Las concentraciones de sedimentos en suspensión en todas las secciones muestran una clara tendencia a la disminución progresiva. Las muestras correspondientes a las secciones del río Ebro en Alagón y Monzalbarba, y del río Jalón se han tomado durante la curva de ascenso de la crecida, mientras que el muestreo en las secciones del río Gállego y del río Ebro en Sástago han sido obtenidas durante la región cercana al pico y la curva de descenso del hidrograma (Figura 4).

Durante la rama de ascenso del hidrograma, la concentración máxima de sedimentos en suspensión registrada en el río Ebro en Alagón fue de $1,95 \text{ g/l}$ (1-M1 en Figura 4 y Tabla 1). En Monzalbarba la concentración máxima medida ascendió hasta los $2,30 \text{ g/l}$ (3-M1). Para el río Jalón se obtuvo un valor máximo de $3,84 \text{ g/l}$ (2-M1), mientras que la concentración máxima medida en el río Gállego fue de $1,98 \text{ g/l}$ (4-M1). El caudal sólido (en kg/s)

en el río Ebro en Alagón del día 27 de febrero era superior en un 5% respecto al de Monzalbarba, mientras que al día siguiente, se produjo un descenso proporcional al 11%, diferencias atribuidas en gran proporción a los cambios de las aportaciones del Jalón. El río Ebro a la salida del tramo estudiado presentó una concentración máxima de $1,20 \text{ g/l}$ (5-M1). A partir de las observaciones se concluye que las concentraciones máximas de sedimentos se han producido en todos los casos, excepto en Sástago, con anterioridad a los picos de caudal, sugiriendo una tendencia clara a un agotamiento exponencial de sedimentos disponibles y a la falta de linealidad entre los caudales líquidos y sólidos.

La cuantificación de los sedimentos en suspensión que el sistema Ebro-Gállego transportó en Zaragoza (i.e., entrada de sedimentos en el curso analizado) se obtuvo con una función de disminución exponencial de la concentración de los sedimentos en suspensión para el río Ebro en Monzalbarba ($C_{SS} = 0,065 e^{-0,029 t}$, $r^2 = 0,99$, donde C_{SS} es la concentración de sedimentos en suspensión en g/l , y t es el tiempo en horas), y dos rectas concatenadas para el río Gállego ($C_{SS} = -0,078 t + 1,975$, $0 < t < 20$ horas; y $C_{SS} = -0,005 t + 0,499$, $t > 20$ horas). La carga total entrante al sistema (tramo fluvial estudiado) para el periodo considerado ($t = 117$ horas) alcanzó las 480.000 t , procediendo el 90% del Ebro. La cuantificación de las aportaciones del río Ebro y Jalón hasta su confluencia (aguas arriba de Monzalbarba, Figura 1) informan sobre la capacidad de transporte de cada río. Sin embargo, el sumatorio de ambas cargas no se ha utilizado como entrada sino con fines comparativos.

En la sección de Sástago (i.e., salida de sedimentos del curso analizado) se utilizó una función exponencial negativa ($C_{SS} = 1,550 e^{-0,026 t}$, $r^2 = 0,93$) para estimar el total de sedimentos en suspensión que traspasaron la sección. La carga total de sedimentos exportados durante el intervalo de control ($t = 117$ horas) fue de 390.360 t .

5.3. Balance de sedimentos en el tramo

La diferencia entre los valores de entrada y salida de sedimentos al tramo analizado muestra un balance negativo de aproximadamente 90.000 t (i.e., 845 t/km), las cuales quedarían depositadas en

Tabla 1. Datos del muestreo de sedimentos en suspensión y caudales asociados en las diferentes secciones de control durante la crecida de febrero-marzo de 2003 en el río Ebro.

Table 1. Suspended sediment sampling data and associated discharges obtained at the control sections in the Ebro River during the February-March 2003 flood.
Pies de Figuras.

Sección de muestreo 1	Día (dd/mm/año)	Hora (24 horas)	Código muestra ² (Figura 4)	CSS (g/l)	Q ⁴ (m ³ /s)
Río Ebro en Alagón (nº 1)	27-02-2003	14:00	1-M1	1,95 ³	1600
	28-02-2003	12:00	1-M2	1,02 ³	2150
Río Jalón en Grisén (nº 2)	27-02-2003	14:30	2-M1	3,84 ⁵	80
	28-02-2003	13:00	2-M2	1,74 ⁵	114
Río Ebro en Monzalbarba (nº 3)	27-02-2003	16:30	3-M1	2,30 ³	1430
	28-02-2003	13:30	3-M2	1,02 ³	1910
	03-03-2003	16:30	3-M3	0,10 ⁶	924
	04-03-2003	13:30	3-M4	0,08 ⁷	810
Río Gállego en Santa Isabel (nº 4)	27-02-2003	18:30	4-M1	1,98	583
	28-02-2003	14:30	4-M2	0,40	230
	03-03-2003	12:30	4-M3	0,07 ⁶	86
Río Ebro en Sástago (nº 5)	28-02-2003	17:00	5-M1	1,20 ⁸	1906
	03-03-2003	10:00	5-M2	0,14 ⁸	1375
	05-03-2003	10:00	5-M3	0,08 ⁸	983

¹ Ver Figura 1 para su localización.

² Ver Figura 4 para la localización de las muestras de sedimento en suspensión en el hidrograma completo de cada una de las secciones.

³ Promedio de tres muestras de sedimento en suspensión tomadas sucesivamente.

⁴ Caudal según: a) sección nº1, traslado hidrograma de la estación de aforos A011 a la sección de muestreo, b) sección nº2, estación de aforos A087, c) sección nº3, traslado hidrograma de la estación de aforos A011 a la sección de muestreo, d) sección nº4, estación de aforos A089, y e) sección nº5, traslado hidrograma de la estación de aforos A011 a la sección de muestreo (ver texto para más detalles).

⁵ Promedio de dos muestras de sedimento en suspensión tomadas sucesivamente.

⁶ Muestra tomada por la Confederación Hidrográfica del Ebro, sección de calidad de aguas (datos online en www.chebro.es).

⁷ Concentración calculada en Sástago (nº5) para el caudal más bajo después del pico de la crecida. Se ha considerado que el valor de concentración en la sección nº3 para el caudal más bajo después del pico de la crecida podría ser como mínimo el mismo (ver texto para más detalles).

⁸ Promedio de doce muestras de sedimento en suspensión tomadas sucesivamente.

el interior del sistema durante el lapso analizado. Este valor representa un porcentaje del 19% sobre el total de entrada al sistema para este episodio. Considerando que la densidad media del sedimento decantado en el tramo es de 1,1 t/m³ (e.g., Sanz *et al.*, 1999, mediante la aplicación del método de Miller, 1953), el volumen total de sedimentos en suspensión decantados resulta ser de 81.800 m³. Por otro lado, la superficie de la llanura de inundación anegada por una caudal máximo similar al analizado y para el mismo tramo, obtenida a partir del trabajo de Losada *et al.* (2004) es de 681 ha. Con dichos valores se ha calculado una tasa promedio de decantación neta o de acreción de sedimentos sobre la llanura de inundación cifrada en 12

mm. Dicho valor podría ser inferior a los 6 mm si en todo el lecho mayor se hubiese producido una sedimentación regular.

6. Resumen y discusión

Este trabajo presenta el balance sedimentario de los sedimentos finos en suspensión estimado para un tramo del Ebro medio durante la crecida de finales de febrero y principios de marzo de 2003. El balance de sedimentos y las tasas de deposición observadas se han estimado a partir de datos hidrológicos de la cuenca y muestras de sedimento en suspensión tomadas en cinco puntos a lo largo del

tramo de estudio. Los cambios observados en la carga sedimentaria del río aguas abajo se han relacionado con fenómenos de decantación de materiales finos sobre la llanura de inundación. El balance de sedimentos presentado en este estudio para la crecida analizada no puede considerarse completamente representativo de la dinámica general del transporte de sedimentos en el Ebro, por cuanto sólo corresponde a un episodio y éste tiene una recurrencia inferior a 10 años. Sin embargo, las pérdidas mostradas por el balance señalan una dinámica general de deposición sobre la llanura de inundación durante crecidas como la considerada. Esta dinámica debería ser evaluada con detalle durante otros episodios de distinta magnitud y en los que el río Jalón no tenga una influencia tan manifiesta.

El transporte de sedimentos en suspensión en el río Ebro ha sido muestreado de manera puntual y discontinua a lo largo del siglo XX. Las concentraciones de sedimentos en suspensión máximas incluidas en el trabajo de Bayerri (1934-1935) alcanzaron los 10 g/l en régimen de avenida en la desembocadura. Durante el periodo hidrológico 1961-1963, Catalán (1969) registró un valor máximo de 3,2 g/l en Zaragoza. Roura (2004) registra durante el periodo 1998-2000 cerca de Sástago (Escatrón) valores inferiores a 1 g/l para episodios con caudal punta no superior a los 800 m³/s. En este estudio las concentraciones máximas registradas en Monzalbarba superan los 2 g/l, mientras que en Sástago son similares a los medidos por Roura (2004), aunque los caudales son claramente superiores a los de aquel estudio. Aún siendo escasos, todos estos datos muestran concentraciones muy elevadas en el tramo inferior a principios de siglo que no han vuelto a ser observados. Dicha circunstancia puede obedecer a la construcción de embalses a lo largo de la cuenca, especialmente durante la segunda mitad del siglo XX, aunque también podría tener influencia la reforestación natural experimentada en las cabeceras (Gallart y Llorens, 2002).

Las concentraciones observadas en todos los puntos de muestreo siguen un progresivo descenso que se producía a la vez que los caudales se iban incrementando (curva de ascenso). La razón de este hecho se encuentra en que la principal llegada de sedimento a la red del Ebro se produjo desde el río Jalón y éste, por las dimensiones de su cuenca

(tiempo de concentración más reducido), había finalizado su crecida con anterioridad a la llegada de los caudales punta del Ebro, procedentes de una cuenca mucho mayor. Con lo cual, en el eje del Ebro el traslado del sedimentograma precedió a la evolución del hidrograma, generando un efecto de histéresis de sentido horario. A falta de muestras correspondientes al inicio de la crecida se observa una progresión de concentraciones decrecientes.

La deposición de sedimentos en el tramo de 106 km analizado es del orden del 19%. Walling *et al.* (1986) estimaron, con una metodología muy similar, en un tramo de 13 km en la cuenca (i.e., 276 km²) del río Culm (Devon, Reino Unido), una sedimentación sobre la llanura de inundación del orden del 28%. La determinación de la tasa de sedimentación sobre la llanura de inundación en este estudio ha sido indirecta a través del balance de sedimentos. Simm (1995) describe que este tipo de metodología es simplemente orientativa frente a métodos de estimación directa como las trampas de sedimentos o la diferenciación de los depósitos acumulados por diferentes técnicas. Aunque Walling y Webb (1989) discuten la precisión de las aproximaciones por balances, en algunos casos los resultados son comparables con los obtenidos con mediciones directas de la acumulación (e.g., Walling *et al.*, 1986). A favor del método de balance de sedimentos se encuentra la sencillez y rapidez de aplicación, que podrían hacer de éste un método totalmente válido para estimaciones de tendencia y/o orden de magnitud de la dinámica.

En la literatura los valores de acumulación de sedimentos sobre las llanuras de inundación debidas a un solo episodio medidos directamente varían desde menos de 1 mm (e.g., Alexander y Prior, 1971) a superiores a un metro (e.g., Wolman y Leopold, 1957). Dicha variabilidad estaría en función de la magnitud del episodio y del ambiente de deposición. Para sucesos del mismo orden de magnitud del analizado en este estudio, los valores observados (e.g., Nelson, 1966) son similares a los deducidos para el episodio analizado (i.e., orden de 10 mm). Los recientes estudios basados en radio-núcleos permiten obtener tasas de deposición a medio plazo. A modo de ejemplo, He y Walling (1996) encuentran tasas anuales para los ríos británicos entre 0,11 y 0,95 g/cm² año (1-8,6 mm/año, para una densidad de 1,1 g/cm³), que son de un orden de magnitud inferiores a las de cuencas per-

turbadas por actividades del hombre (Marron, 1992). Por otro lado, Aalto et al. (2003) han estimado para llanuras de inundación del río Amazonas acumulaciones de entre 20 y 80 cm con un ciclo de unos 8 años, controlado básicamente por episodios relacionados con el fenómeno del Niño (ENSO). Las tasas de acreción de sedimentos sobre la llanura de inundación determinadas para este estudio (12 mm) son consistentes con los datos expuestos en la bibliografía.

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 segundo autor disfrutó de una beca del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. La Confederación Hidrográfica del Ebro suministró los datos meteorológicos e hidrológicos. El profesor Des Walling de la Universidad de Exeter facilitó información relevante para la discusión del artículo. Los autores también quieren agradecer a los revisores y al editor sus comentarios y aportaciones para reforzar y enriquecer el trabajo.

7. Bibliografía

- Aalto, R., Maurice-Bourgoin, L., Dunne, T., Montgomery, D.R., Nittrouer, C.A. y Guyot, J.L. (2003). Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Niño/Southern Oscillation. *Nature* 425, 493-497.
- Alexander, C.S. y Prior, J.C. (1971). Holocene sedimentation rates in overbank deposits in the Black Bottom of the Lower Ohio River, southern Illinois. *Am. J. Sci.* 270, 361-372.
- 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.
- Baker, V.R., Kochel, R.C. y Patton, P.C. (1988). *Flood Geomorphology*. Wiley & Sons, New York, 503 p.
- 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.
- Bayerri, E. (1934-35). *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta Moderna de Alguerri, Tortosa.
- Beven, K. y Carling, P. (1989). *Floods. Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. J. Wiley & Sons, Chichester, 290 p.
- Catalán, J.G. (1969). *Química del Agua*. Blume, Barcelona, 355 p.
- Frutos, L.M.; Ollero, A. y Sánchez, M. (2004). *Caracterización del río Ebro y su cuenca y variaciones en su comportamiento hidrológico*. En Gil Olcina, A. (coord.): *Alteración de los regimens fluviales peninsulares*, Fundación Cajamurcia, Murcia, 233-280.
- Gallart, F. y Llorens, P. (2002). Water resources and environmental change in Spain. A key issue for sustainable catchment management. En García-Ruiz, J.M., Jones, J.A.A. y Arnáez J. (eds.): *Environmental Change and Water Sustainability*. IPE (CSIC), Zaragoza, 11-20.
- 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.
- Gregory, K.J. y Walling, D.E. (1973). *Drainage Basin. Form and Process*. Edward Arnold, Londres, 456 p.
- He, Q. y Walling, D.E. (1996). Rates of overbank sedimentation on the floodplain of British lowland rivers documented using fallout ¹³⁷Cs. *Geogr. Ann.*, 78 A, 223-224
- López-Bustos, A. (1981). Tomando el pulso a las grandes crecidas de los ríos peninsulares. *Revista de Obras Públicas* 3190, 179-192.
- Losada, J.A., Montesinos, S., Omedas, M., García, M.A. y Galván R. (2004). Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro. *Proceedings 11º Congreso del GMCSIG de la Asociación de Geógrafos Españoles*, Murcia.
- Marron, D.C. (1992). Floodpail storage of mine tailings in the Belle Fourche River system: a sediment budget approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 675-685.
- Miller, C.R. (1953). Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations. *US Bureau of Reclamation*.
- MIMAM (2000). Plan Hidrológico Nacional. Análisis de los sistemas hidráulicos. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 390 p.
- Nelson, J.G. (1966). Man and geomorphic processes in the Chemung River Valley, New York and Pennsylvania. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 56, 24-32.
- 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.
- Ollero, A. (1992). *Los meandros libres del río Ebro (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, 1.138 p.
- Ollero, A., Pellicer, F. y Sánchez, M. (2004). La crecida de febrero de 2003 en el curso medio del Ebro: análisis de su evolución espacio-temporal. En Faus, M.C. (coord.): *Aportaciones geográficas en homenaje al profesor Antonio Higuera Arnal*. Universidad de Zaragoza, 143-155.
- 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.
- Roura, M. (2004). *Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'ai*

- gua 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.
- Simm, D.J. (1995). The rates and patterns of Overbank deposition on a lowland floodplain. En: Foster, I.D.L., Gurnell, A.M. y Webb, B.W. (eds.): *Sediment and water quality in river catchments*, John Willey & Sons, Chichester, 247-264.
- Swanson, F.J., Janda, R.J., Dunne, T., Swanston, D.N. (1982). Sediment budgets and routing in forested drainage basins. General Technical Report PNW-141. Forest Service, USDA, Oregon, 165 p.
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2004). Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfología* 18 (1-2), 37-50.
- Vericat, D. y Batalla, R.J. (2005). Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (Lower Ebro River, NE Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 385-402.
- Vericat, D., Batalla, R.J. (2006). Sediment transport in a large impounded river: the lower Ebro River, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology* 79, 72-92.
- Walling, D., Bradley, S.B. y Lambert, C.P. (1986). Conveyance losses of suspended sediment within a floodplain system. En: Hadley, R.F. (ed.): *Drainage basin sediment delivery*. IAHS Publication 159, Wallingford, 119-131.
- 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.
- Walling, D.E. y Webb B.W. (1989). The reliability of rating curve estimates of sediment yield: some further comments. Proceedings of the Porto Alegre Symposium. En: *Sediment Budgets*, IAHS Publication 174, 337-350.
- Wolman, M.G. y Leopold, L.B. (1957). River floodplains: some observations on their formation. US Geological Survey Professional Paper no. 282-C, 87-107.