



EFFECTOS DE LAS PRESAS EN LA DINÁMICA FLUVIAL DEL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO

Downstream effects of dams in the fluvial dynamics of the Lower Ebro River

Vericat, D. y Batalla, R.J.

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure, 177. E-25198 Lleida.

E-mail: dvericat@macs.udl.es rbatalla@macs.udl.es

Resumen: La morfología fluvial del cauce del río Ebro aguas abajo de las presas de Mequinenza y Ribarroja ha experimentado una serie de cambios a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, entre los que cabe destacar: a) erosión lateral, b) colonización de zonas activas por vegetación de ribera, y c) disminución de la anchura. Dichos cambios se han producido después de la construcción y cierre de las presas en la década de los setenta. Las presas alteran la magnitud y frecuencia de las crecidas, lo que produce una disminución de la capacidad de transporte de sedimento del río. Simultáneamente, retienen la mayor parte del sedimento transportado desde aguas arriba, particularmente material grueso como carga de fondo, convirtiendo al cauce en la principal fuente de sedimento aguas abajo. El trabajo describe la alteración de las crecidas por las presas y el consiguiente ajuste del balance sedimentario y la morfología del río, a partir del análisis de datos hidrológicos, geomorfológicos de campo y de fotografías aéreas. La reducción de la magnitud de las avenidas (hasta un 25%) afecta especialmente a las más pequeñas en el tramo inmediatamente aguas abajo de las presas. La disminución de la capacidad del río para transportar carga de fondo a causa de la reducción de los picos de las avenidas y de los caudales medios es importante, pasando de una media de 400.000 t/a entre 1950 y 1975 a menos de 100.000 t/a durante la década de los noventa. Los cambios morfológicos son la respuesta del río a dichas alteraciones.

Palabras clave: presas, carga de fondo, avenidas, morfología fluvial

Abstract: The channel of the Lower Ebro River downstream Mequinenza and Ribarroja dams has experienced a series of morphological changes during the second half of the 20th century, mainly: a) lateral erosion, b) colonization of formerly active areas by riverine vegetation and, c) reduction of channel width. Changes have occurred after dam commissioning during the seventies. Dams alter flood frequency and magnitude, which causes a reduction of river capacity to transport sediment. Simultaneously, dams trap most sediment carried by the river from upstream, particularly coarse fractions as bedload, thus the river channel becoming the main downstream sediment source. This study describes the alteration of floods by dams and the subsequent adjustment of the river sediment transport and its morphology, through the analysis of hydrological and geomorphological field data, and historical and recent air photos. Reduction of flood magnitude (up to 25%) is especially important for the small floods in the downstream reaches near to dams. Reduction of flow competence has also diminished river capacity to transport bedload, shifting from a mean annual yield of 400,000 tonnes between 1950 and 1975 to less than 100,000 tonnes afterwards. Morphological changes indicate the river response to such alterations.

Key words: dams, bedload, floods, river morphology



D. Vericat y R. J. Batalla (2004) Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Rev. C. & G.*, 18 (1-2), 37-50.

1. Introducción

La construcción de presas modifica las condiciones de equilibrio de los ríos generando una serie de cambios en los procesos fluviales. Diversos autores han estudiado los efectos hidrológicos y geomorfológicos de las grandes presas. Cabe destacar los trabajos de Leopold *et al.* (1964), Petts (1984), Williams y Wolman (1984), y Kondolf (1997), entre otros.

1.1. Cambios hidrológicos aguas abajo de los embalses

Los cambios hidrológicos están relacionados generalmente con las características del embalse, especialmente su tamaño con relación a la aportación hídrica de la cuenca, el funcionamiento de la presa y los usos del agua almacenada.

En algunos casos la aportación hídrica se reduce aguas abajo del embalse (Collier *et al.*, 1996). Sin embargo, en muchos otros la reducción no es drástica pero se produce una alteración importante de la frecuencia de caudales. Por ejemplo, en el río Amarillo aguas abajo de la presa de Sanmexia, el caudal entre 1.000 y 3.000 m³/s era igualado o superado 130 días al año durante el periodo anterior a la construcción de la presa (Chien, 1985). Un año después de la entrada en funcionamiento del embalse, dicho caudal se igualaba o superaba 204 días al año, lo que significa un aumento del 57% en su duración, hecho que indica una mayor regulación de la circulación de agua en el río.

La reducción de las avenidas debido a la construcción de embalses es, no obstante, la modificación hidrológica más importante y significativa por sus implicaciones en la morfología del cauce, el transporte de sedimento, y la ecología del sistema fluvial. Incluso la simple laminación de las avenidas en embalses con poca o nula capacidad de regulación puede reducir los picos de las crecidas hasta el 50% (Moore, 1969). En Estados Unidos, por ejemplo, la reducción del caudal máximo después de la construcción de las presas oscila entre el 3% y el 91%, aunque en algunos casos puede llegar a ser superior (Williams y Wolman, 1984). En California, las crecidas en la cuenca de los ríos Sacramento y San Joaquín se han reducido considerablemente debido a la construcción de numero-

sos embalses. El caudal asociado a un periodo de retorno de 2 años (Q_2) ha disminuido entre un 35% y un 95%. Para periodos de retorno superiores (e.g. Q_{10}), la reducción oscila entre el 2% y el 78% (Kondolf y Matthews, 1993). En el río Aragón (cuenca del Ebro), aguas abajo de la presa de Yesa, la reducción de las avenidas ha sido considerable. Según López *et al.* (2002) la capacidad de la presa para regular avenidas está directamente relacionada con el volumen de agua embalsada en el inicio del evento. Al mismo tiempo, la regulación altera el régimen anual de crecidas. En el caso del río Aragón, el número de avenidas en otoño y en primavera ha disminuido desde la construcción de la presa.

1.2. Captura del sedimento por las presas

El sedimento transportado por un río se puede dividir en sedimento en suspensión (arcillas, limos y arenas) y carga de fondo (arenas, gravas y cantos). La carga de fondo, aunque representa un porcentaje generalmente bajo en el total del sedimento transportado, es la responsable del mantenimiento de la estructura morfológica del cauce y de las zonas de ribera en ríos de gravas y/o arenas (Kondolf, 1997). Los embalses retienen la totalidad del material que es transportado como carga de fondo, y porcentajes también importantes de sedimento en suspensión, que en el caso del complejo Mequinenza y Ribarroja en el tramo bajo del río Ebro puede llegar al 90 % del material fino estimado a partir de las curvas de Brune (1953) y de acuerdo con los datos de Sanz *et al.* (1999).

1.3. Efectos aguas abajo

Las principales modificaciones que sufren los cauces situados aguas abajo de los embalses pueden ser tanto de incisión como de sedimentación (Collier *et al.*, 1996). La mayoría de los cambios ocurren habitualmente en los primeros veinte años después de la construcción de la presa (Williams y Wolman 1984, Petts 1984).

La erosión del cauce se produce porque la presa retiene la mayor parte del sedimento que circulaba por el río en condiciones naturales. El agua que la presa libera durante crecidas erosiona el lecho aguas abajo pero no aporta nuevos sedimentos, por

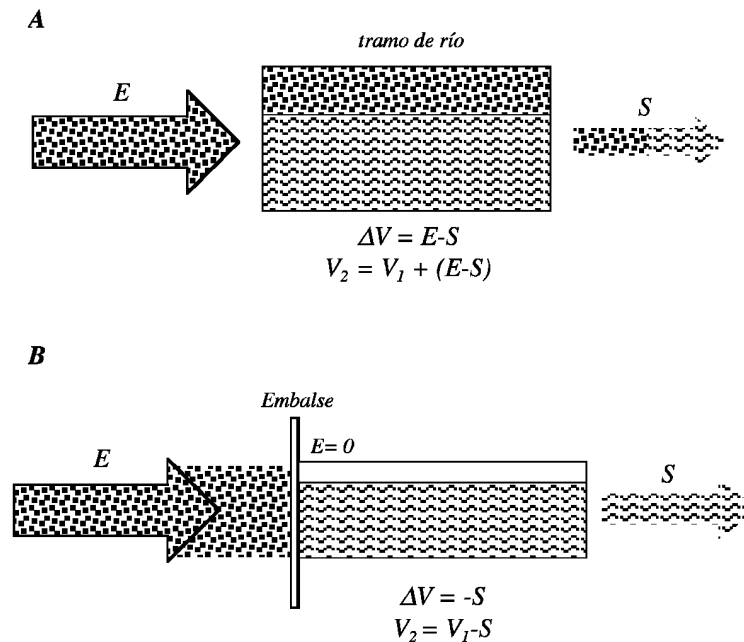


Figura 1. Efectos de una presa sobre el balance de sedimentos de un tramo fluvial. (A) Situación de equilibrio en ausencia de embalses y (B) cambios en la transferencia de sedimentos aguas abajo de la presa: retención en el embalse y erosión aguas abajo. En ambos escenarios se expresan las relaciones entre las entradas (E), las salidas (S), y el volumen de sedimentos acumulados en el cauce de manera atemporal, partiendo de un estadio inicial (V_1) con tendencia a la acumulación, y transcurrido un periodo de tiempo (V_2) en el que se ha producido incisión.

Figure 1. Downstream effects of dams on a river sediment budget. (A) Equilibrium in absence of dams and (B) changes in the sediment transfer: retention in dams and downstream erosion. Both stages show the relation between sediment input (E), sediment output (S) and volume of sediment stored in the channel. Non-temporal sequence illustrates the initial situation with a tendency to aggradation (V_1) and the subsequent situation showing incision (V_2).

lo que el balance sedimentario del río entra en una fase de desequilibrio (Figura 1). La erosión por agua limpia empieza inmediatamente después de la construcción de la presa y va disminuyendo a medida que el lecho del río se va acorazando. Los principales efectos sobre la dinámica del río son a modo de resumen: a) la degradación de los ecosistemas fluviales y deltaicos (Kondolf y Wolman 1993, Day *et al.* 1989), b) la incisión por erosión del cauce con impactos sobre la estabilidad de infraestructuras (Figura 1) (Kondolf 1997, Kondolf y Mathews 1993), c) la disminución de la anchura del cauce (Wilcock *et al.* 1996, Williams y Wolman 1984), y d) la colonización por la vegetación de ribera de áreas anteriormente activas (Inbar, 1990).

La sedimentación en el cauce se produce cuando los caudales que libera a presa son inferiores a los naturales y no tienen competencia ni capacidad

para transportar los sedimentos que llegan al lecho aguas abajo desde: a) materiales provenientes de la misma construcción de la presa, b) aportación de tributarios, c) sedimentos derivados de tramos donde se produce un proceso de erosión, d) aportaciones eólicas, y e) redistribución del sedimento del lecho o de las barras (Petts, 1984). El principal efecto de este proceso es la reducción del volumen de desagüe de la sección del cauce. El material sedimentado en el lecho del río provoca que un caudal de avenida que antes ocupaba la totalidad del cauce se desborde e inunde áreas próximas a éste (Collier *et al.*, 1996). En resumen, dicha reducción genera una disminución de la capacidad del cauce para transitar avenidas, perjuicios para la agricultura y otras actividades económicas, y la modificación de las características de los ecosistemas acuáticos y de ribera (Brookes, 1994).

El objetivo de este trabajo es la caracterización de los efectos del complejo de presas de Mequinenza, Ribarroja y Flix sobre la dinámica fluvial (hidrológica y geomorfológica) del curso bajo del río Ebro.

2. Área de estudio

La cuenca del Ebro es la más extensa de la Península Ibérica. Drena una área de 85.534 km² desde las montañas del Cantábrico y el Pirineo al norte hasta el Sistema Ibérico al sur (Figura 2). La altitud dentro de la cuenca varía entre los 3.400 metros del Pirineo Central hasta el nivel del mar en el delta. La precipitación media anual presenta una irregularidad notable, con valores superiores a 2.000 mm/año en las zonas pirenaicas hasta valores inferiores a los 400 mm/año en el fondo de la depresión (www.chebro.es). Las zonas forestales ocupan más del 25% del área, mientras que la agricultura se extiende por el 50% de la cuenca (www.chebro.es).

Más de 180 embalses regulan casi el 60% (7.700 hm³) de la escorrentía de la cuenca. El agua embalsada se destina tanto a la producción hidroeléctrica (60.000 hm³/año), como al riego (6.310 hm³/año), a la refrigeración de centrales nucleares (3.354 hm³/año), y al abastecimiento de la población (313 hm³/año) (www.chebro.es). El embalse de Mequinenza, construido en 1966, es el mayor de la cuenca con una capacidad de 1.534 hm³. El de Ribarroja fue construido en 1969 y tiene una capacidad de 207 hm³, mientras que el de Flix, que se construyó en 1948, tiene una capacidad de 11,4 hm³.

El tramo de estudio transcurre a través de 78 km de río desde el municipio de Flix (aguas abajo de la presa de Flix) hasta la ciudad de Tortosa (Figura 2). La precipitación media anual en este sector se sitúa entre los 450 mm/a y los 600 mm/a (www.gencat.es). El principal afluente es el río Siurana, que desemboca en el Ebro cerca del municipio de Garcia (22,5 km aguas abajo de la presa de Flix). Como usos de agua más destacados cabe señalar la central hidroeléctrica de Flix con una capacidad máxima de turbinación de 400 m³ s⁻¹, la central nuclear de Ascó, así como la

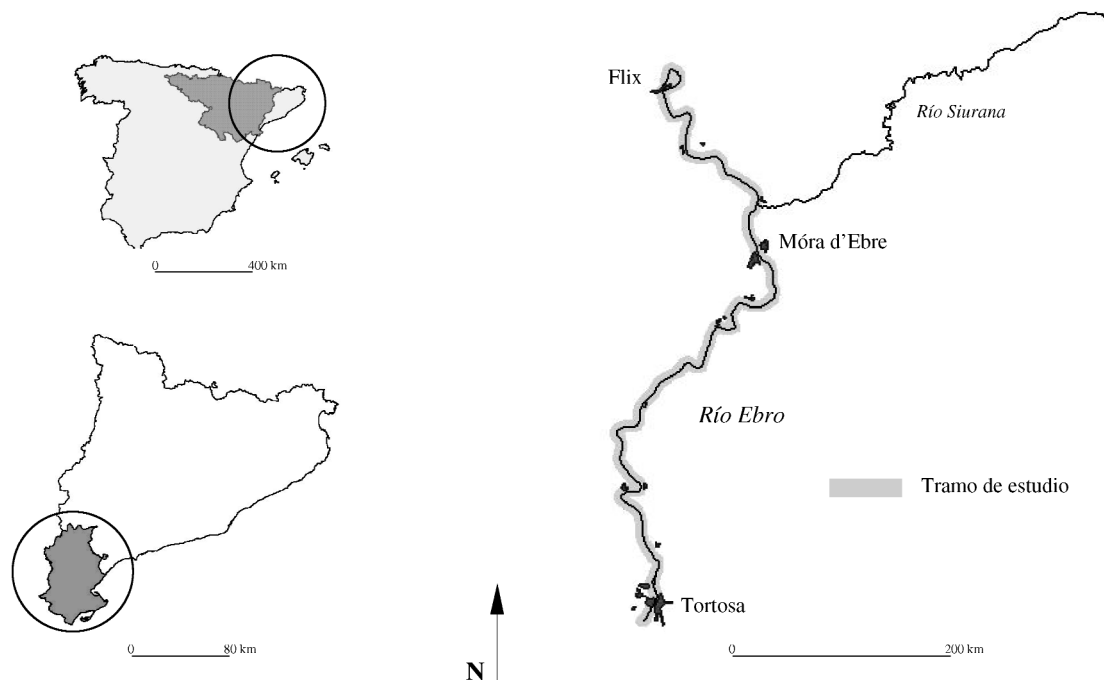


Figura 2. Situación de la cuenca del Ebro en la Península Ibérica y área de estudio.
Figure 2. Location of the study area in the Ebro basin (Iberian Peninsula).

presencia de dos canales de riego (*Canal de la Dreta de l'Ebre* y el *Canal de l'Esquerra de l'Ebre*) que, con un caudal medio de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, abastecen las necesidades de los cultivos del delta y de las poblaciones del área.

Las últimas avenidas importante del Ebro registradas en Tortosa fueron las de octubre de 2.000 con un caudal pico de $2.609 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y, recientemente, la de febrero de 2003 con un caudal pico de $2.200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

3. Metodología

El estudio se basa en el análisis de series de crecidas para comprobar el efecto de las presas sobre la magnitud y frecuencia de las mismas, la aplicación de fórmulas de carga de fondo para estimar la capacidad de los caudales circulantes de transportar sedimentos, y la caracterización de los cambios en la morfología fluvial del tramo final del Ebro como indicadora de cambios en el balance de sedimento.

3.1. Magnitud y frecuencia de las crecidas

El cálculo de los periodos de retorno tiene como objetivo caracterizar la reducción media de las avenidas en el tramo bajo del río Ebro, por lo que se han calculado para dos periodos distintos: anterior a 1975 y posterior a 1975, fecha en la cual todos los grandes embalses en la cuenca, incluidos los de Mequinenza y Ribarroja eran ya operativos. La metodología de análisis empleada no tiene en cuenta los efectos de cambios de tendencia temporal de las avenidas aguas arriba. En la interpretación de los resultados se asume que la regulación de los caudales por parte de las presas constituye el factor más importante de los cambios en la frecuencia y magnitud de las avenidas a partir de 1975.

El tramo de estudio cuenta con los siguientes registros hidrométricos: a) estación de aforos de Flix (EA121) desde 1948 a 1989, b) estación de aforos de Ascó (EA163) con datos desde 1984 a 2000, y c) estación de aforos de Tortosa (EA27) con datos discontinuos desde 1913 a 2000. Para el análisis de las crecidas se han utilizado las series de caudales máximos diarios (Q_c) de dichas estaciones que se encuentran disponibles en la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro (www.chebro.es).

El cálculo de los periodos de retorno en el tramo inicial de la zona de estudio se ha realizado completando la serie de caudales de Flix con los datos de Ascó ponderados por un coeficiente de reducción de caudales de 0,94 obtenido para el periodo de solapamiento de las series entre 1984 a 1989. Las estaciones están separadas 6 km entre sí.

Para el cálculo de los periodos de retorno en el tramo final se ha utilizado la serie de Tortosa (EA27) completada con los caudales máximos diarios de las crecidas históricas de 1907 y de 1937. Para construir las series con caudales oficiales e históricos se han utilizado los siguientes datos y criterios:

- Serie oficial de caudales que cubre los periodos: 1913 a 1931 y 1951 a 2000, sin incluir las avenidas históricas.
- Crecidas históricas: 1907 y 1937 a partir de las estimaciones de Novoa (1984). No se ha utilizado en los cálculos el caudal pico ($23.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) de la crecida de 1907 publicado en la Geografía de Catalunya (1958).
- Relleno de huecos: de 1908 a 1912, de 1932 a 1936 y de 1938 a 1942 con caudales de periodos de retorno de 5, 4, 3, 2 y 1 años; de 1943 a 1950 extrapolando los caudales de la estación de aforos EA11 (Zaragoza) a la estación EA27 (Tortosa), mediante la aplicación de un coeficiente de aumento de cuenca de 1,2 calculado a partir de caudales solapados entre las dos series EA27 y EA11.

El cálculo de periodos de retorno en ríos regulados, especialmente en aquellos en que las presas se han construido para el control de avenidas, se realiza mediante métodos de probabilidad total. La utilización de funciones paramétricas de probabilidad, como la de Gumbel, es menos común (Durrans, 1998). Los métodos de probabilidad total requieren realizar el tránsito de hidrogramas de crecida a través del embalse para comparar las características de la avenida sin regulación con los caudales regulados datos que, históricamente, no están disponibles para la zona de estudio. No obstante, en el caso de que las presas tengan como objetivo el suministro de agua y la producción hidroeléctrica, como ocurre con las de Mequinenza y Ribarroja, la influencia de la regulación del

embalse sobre la crecida es habitualmente menor (USACE, 1993), por lo que el uso de funciones como la de Gumbel tiene más fundamento. Se trata, además, de la metodología utilizada generalmente por las Confederaciones Hidrográficas en España (e.g. Junta d'Aigües, 1994). Para el caso del tramo bajo del río Ebro se presentan tanto los periodos de retorno estimados a partir de la función de Gumbel como los datos muestrales (empíricos) sin ningún ajuste.

Los periodos de retorno $T(x) = 1/(1-F(x))$ se han calculado utilizando la función de probabilidad Tipo I de Gumbel mediante el método de momentos (Shaw, 1983):

$$F(x) = e^{-e^{-B(x-a)}}$$

$$a = \mu_{Q_c} - (s/b) \quad [s = 0,577]$$

$$b = s / Q_c \cdot 6$$

donde $F(X)$ es la probabilidad de que un caudal máximo anual (Q_c) iguale o supere X en un año determinado, y a y b son los dos parámetros relacionados con los momentos de la población de valores Q_c . El primer momento se define como la media (μ_{Q_c}) y el segundo como la varianza (s^2).

Para la aplicación de la función de probabilidad de Gumbel se realizó el ajuste de datos dudosos, que son aquellos valores que se alejan significativamente de la tendencia del conjunto de la serie (Chow *et al.*, 1994):

$$y_h = \mu_{\log Q_c} + (K_n / \log Q_c)$$

$$y_l = \mu_{\log Q_c} - (K_n / \log Q_c)$$

donde y_h e y_l son los límites superior e inferior respectivamente, n es el número de datos de caudal (Q_c), μ es la media, s es la desviación estándar, y K_n es un valor constante asociado al número total de datos de la serie de caudales.

En la serie oficial de la EA27 los límites obtenidos se sitúan entre el rango de caudales utilizados. En las dos series restantes existen valores que exceden el límite superior. Dichos caudales corresponden a datos históricos a partir de las estimaciones de Novoa (1984). De acuerdo con el Water Resources Council (1981) y con Chow *et al.* (1994), si un dato histórico es dudoso y no puede

ser verificado debe ser incluido en el análisis. En el tramo bajo del río Ebro, los datos históricos utilizados que exceden el límite superior calculado no pueden ser verificados. Por consiguiente, han sido utilizados en el análisis.

Además, con el mismo objetivo de mostrar la reducción de la magnitud de las avenidas en el tramo de estudio se han comparado los caudales máximos sin ningún tratamiento estadístico (series muestrales o empíricas). Para ello se ha utilizado la serie de caudales de Tortosa (EA27) a la que se añadieron los datos históricos estimados por Novoa (1984).

3.2. Dinámica geomorfológica y de sedimentos

A lo largo del tramo de estudio se han realizado granulometrías superficiales para la caracterización del material del lecho. Los datos granulométricos se han empleado para la estimación de la carga de fondo mediante fórmulas. La técnica utilizada para la caracterización del material superficial ha sido la de los transectos lineales mediante el método de Wolman (1954) sobre 400 partículas.

La capacidad actual del río para transportar carga de fondo se ha estimado mediante la utilización de fórmulas, debido a la falta de una base de datos de mediciones directas. Para ello se han empleado datos granulométricos y un perfil transversal en el tramo de Tortosa (Figura 3), y se ha estimado la pendiente a partir de mapas topográficos a escala 1:5.000.

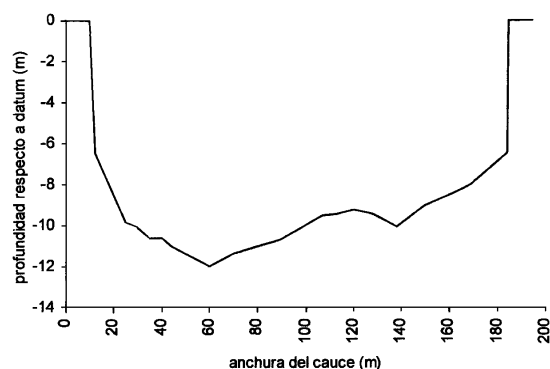


Figura 3. Sección transversal del río Ebro a su paso por Tortosa.
Figure 3. Cross section of the Ebro River in Tortosa.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de las tasas de transporte han sido las de Schoklitsch (1950) y la de Engelund y Hansen (1967):

a) Schoklitsch (1950)

$$i_b = 2500s^{3/2}(q - q_c)$$

donde s es la pendiente, q es el caudal unitario (m^2/s), q_c es el caudal crítico unitario (m^2/s), e i_b es la tasa de transporte en peso seco ($kg/m \cdot s$)

La única limitación de la fórmula de Schoklitsch (1950) hace referencia al diámetro de las partículas. Sólo cuando el tamaño de las partículas no es uniforme se recomienda la utilización del D_{40} como diámetro representativo para el cálculo del caudal crítico de inicio de movimiento (Maza y García, 1996). Dicho caudal se ha estimado directamente en el campo mediante un muestreador de carga de fondo Helley-Smith, y se ha verificado mediante la ecuación de Shields (1936). La granulometría del tramo de estudio presenta un índice de clasificación (Folk y Ward, 1957) de tipo moderadamente clasificado. Por consiguiente, el uso del D_{50} para el cálculo del caudal crítico de inicio de movimiento en el tramo bajo del río Ebro está plenamente justificado.

b) Engelund y Hansen (1967)

$$\begin{aligned} i_b &= s \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D_{50}^3 \right) \\ &= (0,1 \rho_s^{5/2}) / f_{EH} \\ f_{EH} &= (2 g d S) / U^2 \\ &= \rho_0 / (\rho_s - \rho) D_{50} \end{aligned}$$

donde s es la pendiente, ρ_s es la densidad del sedimento (2.650 kg/m^3), ρ es la densidad del agua (1.000 kg/m^3), ρ_0 es la densidad relativa del sedimento, D_{50} es el diámetro medio del sedimento (m), g es la aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m s}^{-2}$), d es la profundidad del agua (m), U es la velocidad media (m/s), ρ_0 es la tensión de corte (N/m^2), y i_b es la tasa de transporte en peso seco ($kg/m \cdot s$).

Existen dos limitaciones para la aplicación de la fórmula de Engelund y Hansen (1967) que son $(D_{75}/D_{50})^{0,5} > 1,6$ y $D_{50} < 0,15 \text{ mm}$. Los valores respectivos para el tramo bajo del río Ebro son 0,63 y 19 mm, por lo que queda fundamentado el uso de esta fórmula en el presente trabajo.

Para el cálculo de las tasas de carga de fondo se han utilizado los caudales diarios facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Los caudales utilizados en las fórmulas de transporte sólido corresponden a la energía disponible a partir de un caudal crítico de inicio de movimiento estimado a partir de muestreos de campo y calculado a partir de Shields (1936).

El estudio de los cambios en la morfología del cauce se realizó mediante la comparación de fotografías aéreas tomadas antes y después de la construcción de las presas, a partir de dos series: a) la de 1956 conocida como vuelo americano y b) la de 1994/1995 que corresponde al vuelo realizado por el Institut Cartogràfic de Catalunya. Las fotos se escanearon y se trataron mediante programas de diseño gráfico (Corel Draw 8.0 y FreeHand 8.0), con el objetivo de analizar los cambios en la morfología del cauce, en base al estudio de la tipología de las barras y a su colonización por vegetación de ribera.

4. Resultados

4.1. Reducción de la magnitud de las avenidas

Las crecidas en el tramo inferior del río han sufrido en general una disminución a partir de los años 70 del siglo XX como consecuencia de la regulación de los embalses de la cuenca y, en particular, de las de Mequinenza y Ribarroja (Tabla 1). A partir de la serie de datos oficial, la reducción es, en general, mayor para los caudales de menor magnitud (Q_5) y menor para las crecidas mayores (Q_{25}). Los efectos de la regulación son más evidentes en el tramo cercano a las presas (Flix-Ascó) en el que, por ejemplo, la relación entre $Q_{2\text{post}}$ y $Q_{2\text{pre}}$ es de 0,73 que en el tramo final (Tortosa) en que la misma relación tiene un valor de 0,89.

La magnitud de las avenidas de 25 años de periodo de retorno en Flix-Ascó se ha reducido un 13%, mientras que en Tortosa ya no se ven afectadas por la regulación. No obstante, si en el cálculo se incluyen las avenidas históricas de 1907 y 1937 la reducción de las avenidas Q_{25} en Tortosa alcanza una media del 35%. En este mismo sentido, el análisis de los datos empíricos de los caudales máximos en Tortosa sin ajuste estadístico indica también una clara reducción de los picos de las crecidas después de la construcción de las presas (Figura 4).

Tabla 1. Periodos de retorno en el tramo inferior del río Ebro antes y después de 1975, a partir de series de caudales oficiales, incluyendo las crecidas históricas de 1907 y 1937.

Table 1. Recurrence intervals for the Lower Ebro before and after 1975, using official flow series and including historical floods of 1907 and 1937.

	Q ₂		Q ₁₀		Q ₂₅	
	Q _{cpre} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cpost} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cpre} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cpost} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cpre} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cpost} (m ³ s ⁻¹)
Series EA121 ⁽¹⁾ +EA163 ⁽²⁾ (CHE)	1.585	1.160	2.653	2.235	3.261	2.846
Cociente Q _{post} /Q _{pre}		0,73		0,84		0,87
Serie oficial EA27 ⁽³⁾ (CHE)	1.425	1.267	2.667	2.594	3.374	3.350
Cociente Q _{post} /Q _{pre}		0,89		0,97		0,99
EA27 más 1907 y 1937, con relleno	1.603	1.267	3.632	2.594	4.787	3.350
Cociente Q _{post} /Q _{pre}		0,79		0,71		0,70
Media aritmética (EA27)	1.549	1.267	3.483	2.594	4.584	3.350
Cociente Q _{post} /Q _{pre}		0,82		0,74		0,73

(1) Estación de aforos de Flix (EA121)
 (2) Estación de aforos de Ascó (EA163)
 (3) Estación de aforos de Tortosa(EA27)

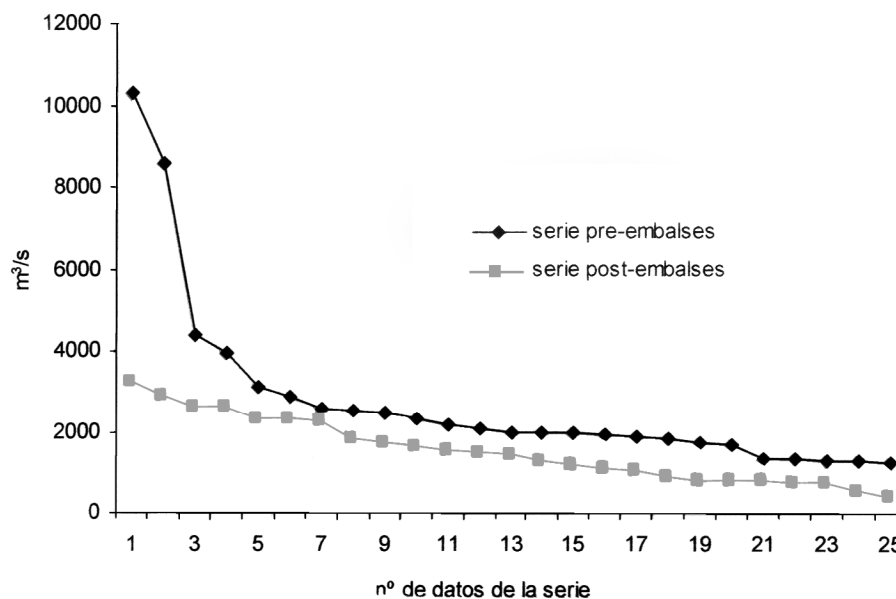


Figura 4. Caudales máximos diarios del río Ebro en Tortosa (EA27) antes y después de 1975, incluyendo los datos de las crecidas históricas de 1907 y 1937 (Novoa, 1984).

Figure 4. Maximum daily discharge in the Lower Ebro (Tortosa, EA27) before and after 1975, including the historical floods of 1907 and 1937 (Novoa, 1984).

La falta de avenidas importantes en el río Siurana debida a la regulación de las presas de Siurana (1972), Margalef (1983) y Guiamets (1983), ha contribuido también a la reducción de las avenidas en el tramo bajo del Ebro.

4.2. Efectos sobre la carga de fondo

La aplicación de las fórmulas de Schoklitsch (1950) y de Engelund y Hansen (1967) muestra cómo la capacidad del caudal circulante entre

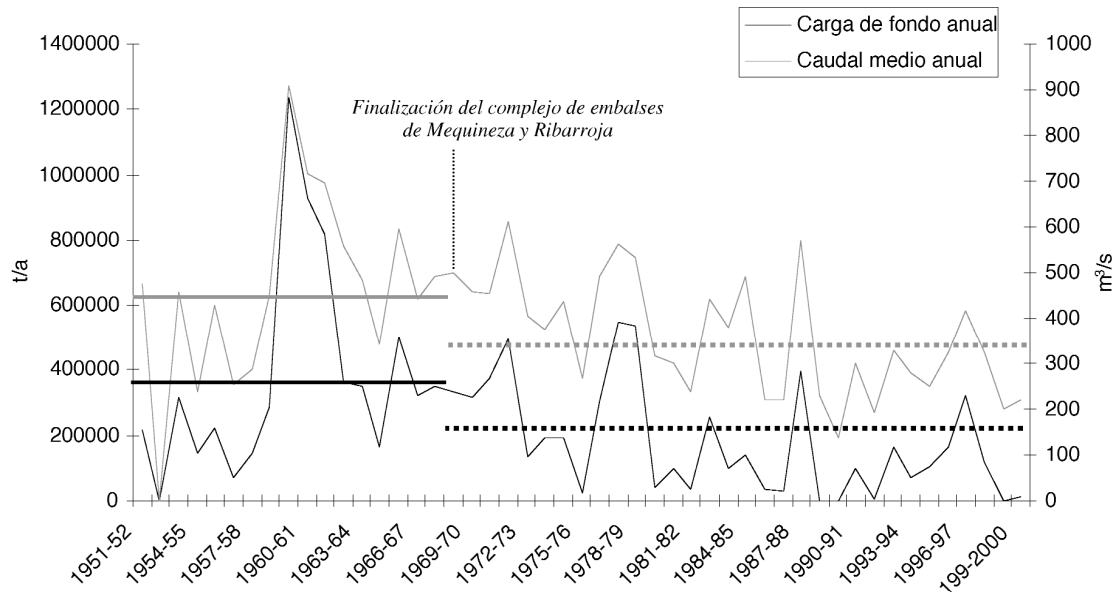


Figura 5. Caudal medio anual y capacidad de transporte del flujo en el bajo Ebro (Tortosa) a partir de las fórmulas de Schoklitch (1950) y Engelund y Hansen (1967). Las líneas continuas y discontinuas marcan los niveles del caudal medio y la tasa media para el periodo pre-embalses y post-embalses respectivamente.

Figure 5. Mean discharge and river bedload capacity of the Ebro in Tortosa estimated by means of the Schoklitch (1950) and Engelund y Hansen (1967) formulae. Full lines indicate mean pre-dam values and dotted lines indicate mean post-dam values.

Flix y Tortosa para transportar material como carga de fondo se ha reducido considerablemente después de la construcción de los embalses de Mequinez y Ribarroja (Figura 5). Esta disminución está directamente relacionada con la reducción de la frecuencia y magnitud de las avenidas y, por tanto, con el alcance periódico de los umbrales de movimiento de las fracciones de material presentes en el propio lecho del río. Tal y como se observa en la figura 5, además de disminuir el aporte de sedimento también lo hace el caudal medio anual. Dicha reducción no tiene porque ser un efecto directo de la construcción de las presas sino del almacenaje y uso posterior del agua. García *et al.* (2001), en un estudio de los ríos pirenaicos, han llegado a la conclusión de que los procesos que explican la disminución de los recursos hídricos son muy complejos debido a la interacción de factores físicos y humanos. Por su parte Ibáñez *et al.* (1996) indican que las causas de la disminución de los caudales medios en el tramo bajo del río Ebro son: a) el aumento de la demanda de agua en la cuenca, mayoritaria-

mente para usos agrícolas, lo que equivaldría a 74% de la reducción, b) la evaporación del agua embalsada en el conjunto de la cuenca representaría el 22% de la reducción, en cuyo caso los cambios en la temperatura citados por García *et al.* (2001) corroborarían esta idea, y c) el 4% restante correspondería a los efectos de las alteraciones climáticas y a las posibles variaciones de los usos del suelo.

El transporte medio anual como carga de fondo para los periodos anterior y posterior a 1975 se muestra en la tabla 2. Aunque la diferencia entre las estimaciones de las fórmulas es notable, el porcentaje de reducción de la carga de fondo es muy similar. El caudal crítico de inicio de movimiento se ha estimado directamente en el campo mediante un muestreador de carga de fondo Helley-Smith. Caudales alrededor de 680 m³/s son capaces de movilizar partículas de 25 mm, calibre que corresponde al D₅₀ del material superficial del lecho no acorazado del río. Este valor se corroboró mediante la ecuación de Shields (1936):

Tabla 2. Carga de fondo (t/a) en el tramo inferior del río Ebro para los períodos anterior y posterior a 1975, a partir de las fórmulas de Schoklitsch (1950) y Engelund y Hansen (1967).
 Table 2. Bedload yield (t/y) in the Lower Ebro before and after 1975 from Schoklitsch (1950) and Engelund and Hansen (1967).

	Schoklitsch (t/a)	Engelund & Hansen (t/a)
Anterior a 1975	209.171	519.551
Posterior a 1975	77.801	209.855
% reducción	63	60

$$\tau_c = \rho_s g D_{50} 0,056 = 1.650 \cdot 9,8 \cdot 0,025 \cdot 0,056 = 22,3 \text{ N m}^{-2}$$

$$d = \tau_c / (\rho_s g s) = 22,3 / (1.000 \cdot 9,8 \cdot 0,00085) = 2,7 \text{ m (680 m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ en EA27)}$$

donde τ_c es la tensión de corte crítica (N m^{-2}), ρ_s es la densidad del sedimento en peso sumergido (g cm^{-3}), D_{50} es el tamaño medio del sedimento (m), g es la aceleración de la gravedad (m s^{-2}), d es el calado medio (m), ρ es la densidad del agua (g cm^{-3}), y s es la pendiente (adimensional).

A principio del siglo XX la contribución total anual de sedimento del río Ebro al mar era de $15 \cdot 10^6$ toneladas (Bayerri 1935, Nelson 1990), la mayor parte del cual era transportado en suspensión, como

indican las concentraciones de 10 g l^{-1} obtenidas durante crecidas. Asumiendo que en ríos aluviales la carga de fondo supone un 10% de la carga total de sedimento, la carga de fondo total se estima alrededor de $1 \cdot 10^6$ a $1,5 \cdot 10^6$ toneladas anuales. Antes de la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, el río Ebro ya había visto reducido la carga total de sedimento hasta valores entre $3 \cdot 10^6$ y $6 \cdot 10^6$ toneladas anuales debido a la retención en embalses de aguas arriba (Avendaño *et al.*, 1997). De ellas, el 10% (ca. 450.000) serían de carga de fondo. Esta estimación se ajusta a las 400.000 toneladas de capacidad de transporte anual que ofrecen las fórmulas para el periodo 1950-1975. En el periodo posterior a la construcción de las grandes presas el valor medio de carga de fondo se ha reducido a 170.000 toneladas anuales (Figura 6). Los resultados obtenidos se ajustan a los de Guillén *et al.* (1992). Durante la década de los años 90 la capacidad de transporte se ha situado por debajo de las 100.000 toneladas anuales, con algunos años en los que no se alcanzó el umbral de movimiento.

El sedimento que finalmente el río transporta se moviliza del propio cauce, ya que la aportación de aguas arriba es nula. Este hecho junto con los cambios en las crecidas provoca cambios morfológicos, lo que supone un factor clave para la degradación del ecosistema fluvial y un riesgo para el mantenimiento del delta.

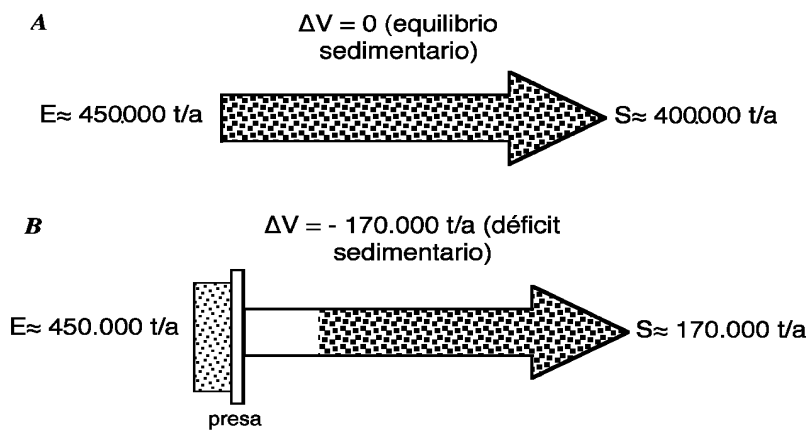


Figura 6. Cambios en el balance de sedimento en el tramo final del río Ebro sin tener en cuenta las aportaciones de los tributarios. Las entradas se han calculado asumiendo que cerca del 10% del material que retienen las presas de Mequinenza y Ribarroja (Avendaño *et al.*, 1997) es carga de fondo. Las salidas corresponden a los valores medios estimados mediante fórmulas (E: entradas, V: variación del volumen y S: salidas). (A) Situación de equilibrio en ausencia de embalses y (B) cambios en la transferencia de sedimentos aguas abajo de la presa de Flix.

Figure 6. Changes in the Ebro River sediment budget. Sediment input from tributaries is not taken into account. Estimation are based on the assumption that 10% of sediment captured by Mequinenza y Ribarroja dams (Avendaño *et al.*, 1997) is bedload. Downstream transfers are estimations using formulae (E: input, V: change of volume and S: output). (A) Equilibrium in absence of dams and (B) changes in the sediment transfer downstream Flix dam.

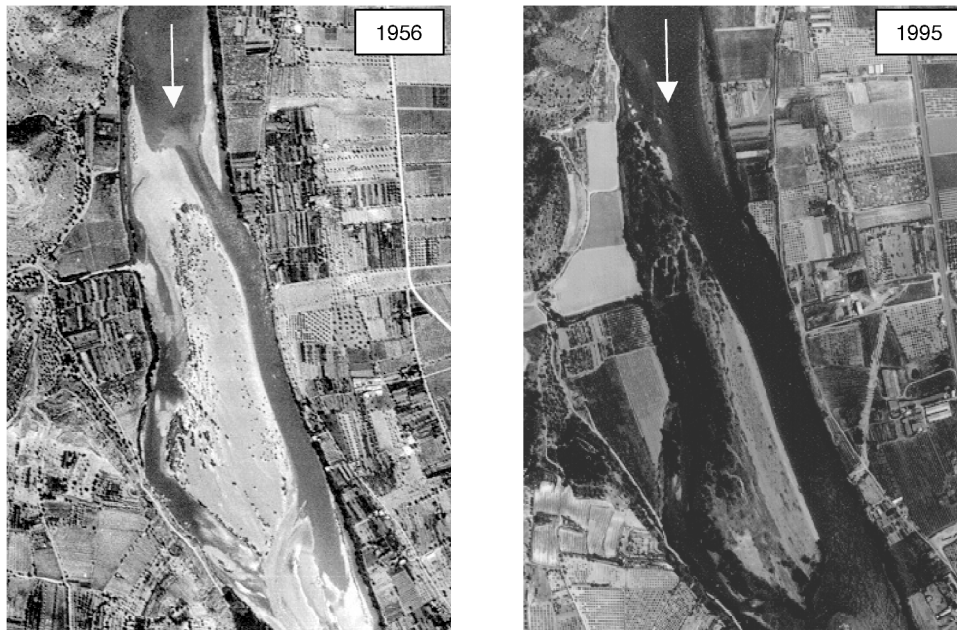


Figura 7. Colonización por vegetación de ribera de una barra en las proximidades de Móra d'Ebre entre 1956 y 1995 (fotografías aéreas: Ejército del aire 1956 e Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) 1995).

Figure 7. Colonization by vegetation of an active bar in the vicinity of Móra d'Ebre between 1956 and 1995 (air photos: Ejército del Aire 1956 and Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) 1995).

4.3. Cambios morfológicos

El análisis de las series fotográficas ha permitido constatar una serie de cambios en el cauce del curso inferior del Ebro. Dichos cambios se pueden resumir en: a) colonización de áreas anteriormente activas del cauce por vegetación de ribera, b) cambios en la anchura del cauce, c) incisión del lecho, y d) cambios en la dinámica y tipología de las barras, y en el patrón de drenaje fluvial. La reducción de la magnitud de las avenidas responsables del modelaje del cauce, y la disminución tanto de la capacidad del caudal para transportar sedimento como al déficit de material causado por los embalses, son las responsables de los cambios morfológicos.

La reducción de la magnitud de las avenidas facilita que la vegetación de ribera pueda colonizar áreas que, con anterioridad a la construcción de las presas, eran habitualmente activas, reduciendo de esta forma, la sección activa del cauce. La figura 7 muestra los cambios en la vegetación de ribera en una barra próxima al municipio de Móra d'Ebre.

La reducción del suministro de sedimento como carga de fondo provoca también cambios en la mor-

fología del cauce y su patrón de drenaje (Kondolf, 1997). Según Sanz *et al.* (2001) a partir de la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja no se han apreciado nuevos cambios de sedimentación aguas abajo pero, contrariamente, se observan otro tipo de modificaciones que afectan tanto al cauce como a los depósitos. En este sentido, en el tramo bajo del río Ebro uno de los cambios más destacados ha sido la migración lateral. Numerosas barras que anteriormente eran activas han sido colonizadas por vegetación y han pasado de centrales a laterales, favoreciendo su ocupación por campos de cultivo. Se ha producido también el abandono de cauces secundarios, lo que indicaría una incisión del cauce principal debida a la falta de sedimento y una colonización no sólo de las barras sino de segmentos de cauce anteriormente activos. La figura 8 ilustra los cambios en el cauce con un ejemplo aguas abajo del municipio de Móra d'Ebre. Por lo que se refiere al cauce principal, se ha reducido tanto su sinuosidad como su anchura (-10%).

En relación a la anchura del cauce, se han detectado dos tipos de cambios. Parte del cauce que era activo antes de los embalses ha pasado a ser

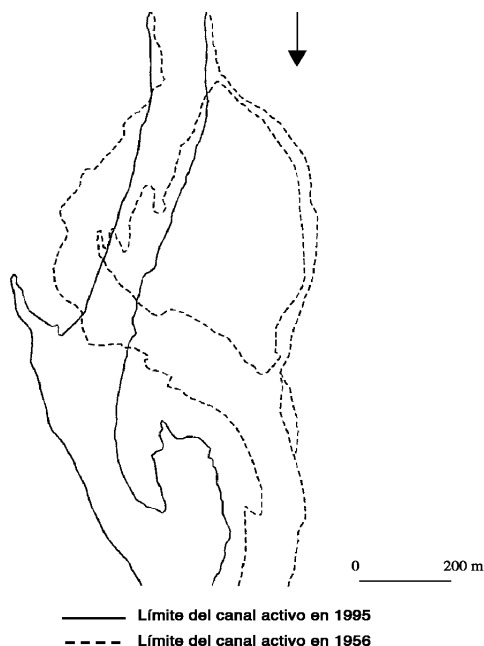


Figura 8. Cambio en el patrón fluvial aguas abajo del municipio de Móra d'Ebre (fotografías aéreas: Ejército del Aire 1956 e ICC 1995).
 Figure 8. Changes in the fluvial pattern downstream Móra d'Ebre (air photos: Ejército del Aire 1956 and ICC 1995).

estable debido a la aparición de vegetación de ribera y, en algunos casos, incluso de nuevos campos de cultivo, que han aprovechado las áreas que se inundaban con frecuencia y que dejaron de hacerlo después de la construcción de las presas. Como

consecuencia, en esos sectores se ha producido una reducción de la anchura del cauce, que en algunos casos llega al 20% (Figura 9a). En otras zonas, la anchura del cauce se ha incrementado, debido a procesos de erosión lateral que se han convertido en la única fuente relevante de sedimento en el río (Figura 9b). En estado natural (sin embalses) los procesos de erosión lateral están compensados a largo plazo por la sedimentación de material, por lo que la anchura del cauce se mantiene estable o en equilibrio dinámico. Después de la construcción de las presas, la erosión lateral continua pero el equilibrio se rompe debido a la reducción de las avenidas y a la falta de suministro de sedimento (Chien, 1985), lo que en el caso del Ebro se ve agravado por la nula aportación del Siurana muy afectado por las extracciones de áridos.

Estos cambios morfológicos han podido ser identificados puntualmente a lo largo del tramo bajo del río Ebro (Figuras 8 y 9). Aunque podrían sugerir que corresponden a procesos naturales, a lo largo del tramo de estudio todas las evidencias apuntan en la misma dirección, lo que sugiere una clara influencia de los embalses en la dinámica fluvial aguas abajo.

5. Conclusiones

El trabajo ha mostrado los principales cambios que afectan el comportamiento hidrológico y geomorfológico del tramo bajo del río Ebro y los ajus-

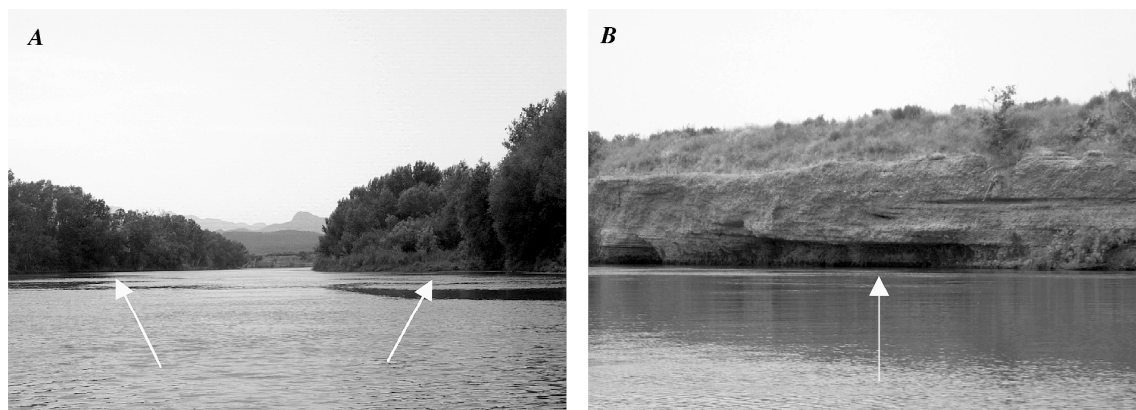


Figura 9. (A) Colonización por vegetación de ribera y reducción de la anchura del cauce aguas abajo del municipio de Benissanet y (B) erosión lateral cerca del municipio de Ascó.

Figure 9. (A) Colonization of the active channel by riverine vegetation and reduction of channel width downstream Benissanet and (B) lateral erosion in the vicinity of Ascó.

tes en el balance sedimentario y su morfología como consecuencia de la acción de las presas aguas arriba, principalmente:

1. Una reducción de la magnitud y frecuencia de las avenidas, con especial incidencia en las crecidas de menor magnitud y mayor frecuencia, en el tramo inmediatamente aguas abajo de las presas.

2. La disminución de la capacidad del río para transportar carga de fondo a causa de la reducción de los picos de las avenidas y de los caudales medios desde los años setenta del siglo XX.

3. Cambios morfológicos como, por ejemplo, la colonización por vegetación de ribera de zonas del cauce anteriormente activas y la disminución de la anchura del mismo.

Estos cambios conllevan el reajuste del cauce fluvial al déficit de sedimento por la escasa o nula aportación de material grueso desde aguas arriba y desde los tributarios, lo que implica la erosión del propio lecho, y a largo plazo, la degradación del ecosistema.

Agradecimientos

Este trabajo se está llevando a cabo gracias a una beca de investigación de Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, y en el marco del proyecto (REN2001-0840-C02-01/HID). Los datos hidrológicos han sido suministrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Los autores agradecen las correcciones de José M. García Ruiz (CSIC) y de un revisor anónimo de la primera versión del trabajo, y a Albert Rovira (UdL) la colaboración en el trabajo de campo.

Referencias bibliográficas

- Avendaño, C., Cobo, R., Sanz, M.E. y Gómez, J.L. (1997): Capacity situation in Spanish reservoirs. *I.C.O.L.D. Nineteenth Congress on Large Dams*, 74, 52, 849-862.
- Bayerri, E. (1934-35): *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta Moderna de Alguerri, Tortosa, vol. II, 704 p. And vol. III, 751 p.
- Brookes, A. (1994): River channel change. En: Calow, P. y Petts, G.E. (1994): *The rivers Handbook. Hydrological and ecological principles*. Blackwell Science, Oxford, 55-75.
- Brune, G.M. (1953): The trap efficiency of reservoirs. *Transactions of the American Geophysical Union*, 34, 407-418.
- Chien, N. (1985): Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth surface processes and land forms*, 10, 143-159.
- Chow, V., Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1994): *Hidrología aplicada*, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá, 584p.
- Church, M., McLean, D.G. y Wolcott, J.F. (1987): River bed gravels: sampling and analysis. En: Thorne, C. R., Barthurst, J.C. y Hey, R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Chichester, John Wiley and Sons, 43-88.
- Collier, M.P., Webb, R.H., y Schmidt, J. (1996): *A primer on the downstream effects of dams*. United States Geological Survey Circular 1126, 94 p.
- Day, J.W. y Templet, P.H. (1989): Consequences of sea level rise: implications from the Mississippi delta. En: Benkema, J. et al. (eds.): *Expected effects of climate change on marine coastal ecosystems*, 155-165.
- Durrans, S.R. (1998): Total probability methods for problems in flood frequency estimation. En: Parent, E., Hubert, P., Bobee, B. and Miquel, J. (eds.): *Statistical and Bayesian methods in hydrological sciences*. UNESCO, Paris, Technical Documents in Hydrology, 20, 299-326.
- Engelund, F. y Hansen, E. (1967): *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Channels*. Danish Technical Press, Copenhagen.
- Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957): Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
- García, J.M., Beguería, S., López, J.I., Lorente, A. y Seeger, M. (2001): *Los Recursos Hídricos Superficiales del Pirineo Aragonés y su Evolución Reciente*, Geoforma Ediciones, Logroño, 192p.
- Geografía de Catalunya*, Aedos, Barcelona, vol 1, 665 p.
- Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992): Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo por el río Ebro al medio marino. *Rev. Soc. Geol. España*, 5, 27-37.
- Ibáñez, C., Prat, N. y Canicio, A. (1996): Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the Lower Ebro River and Its Estuary. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, 51-62.
- Inbar, M. (1990): Effect of dams on mountainous bedrock rivers. *Physical Geography*, 11, 4, 305-319.
- Junta d'Aigües (1994): *Recomanacions sobre mètodes d'estimació d'avingudes màximes*, Generalitat de Catalunya, 164 p.
- 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.
- Kondolf, G.M. y Wolman, M.G. (1993): The sizes of salmonid spawning gravels. *Water Resources Reserach*, 29, 2275-2285.

- Leopold, L.B., Wolman, M.G., y Miller, J.P. (1964): *Fluvial processes in geomorphology*. W. H. Freeman, San Francisco, 522 p.
- López, J.I., Beguería, S. y García, J.M. (2002): Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 4, 753-762.
- Maza, J.M. y García, M. (1996): *Transporte de Sedimentos*, Series del Instituto de Ingeniería, 584.
- Moore, C.M. (1969): Effects of small structures on peak flows, En: Moore W.L. and Morgan, C.W. (eds.): *Effects of Watershed Changes on Streamflow*, University of Texas Press, Austin, 101-117.
- Nelson, C.H. (1990): Post Messinian deposition rates and estimated river loads in the Ebro sedimentary system. En: Nelson, C.H. y Maldonado, A. (eds.): *Marine Geology of the Ebro Continental Margin*. *Marine Geology*, 95, 395-418.
- Novoa, M. (1984): Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Catalunya. *Ponencias y comunicaciones de las Jornadas de Trabajo sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo*, vol. 1., 1-15, Barcelona.
- Petts, G.E. (1984): *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management*. Wiley, New York, 326 p.
- Prat, N. y Ibáñez, C. (1995): Effects of water transfers projected in the Spanish Hydrological Plan on the ecology of the Lower River Ebro (N.E. Spain) and Its Delta. *Wat. Sci. Tech.*, 31, 8, 79-86.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. y Cobo, R. (1999): Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hasta el río Ebro (España). En: *Hydrological and geochemical processes in large-scale river basins*. HIBAM, Manaus.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. y Cobo, R. (2001): Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (Río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo. *Rev. Soc. Geol. España*, 14(1-2), 3-17.
- Schoklitsch, A. (1950): *Handbuch des Wasserbaues*. Springer verlag, New York.
- Shaw, E. (1983): *Hydrology in Practice*, Van Nostrand-Reinhold, Amsterdam, 322 p.
- USACE (1993): *Engineering Manual EM 1110-2-1415*, Chapter 3. Flood Frequency Analysis, US Army Corps of Engineers.
- Water Resources Council, *Guidelines for determining flood flow frequency*, Boletín 17B, U.S. Geological Survey, Reston, VA 22092, 1981.
- 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 Reserach*, 32, 2911-2921.
- Williams, G.P. y Wolman, M.G. (1984): Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. *US Geological Survey*, 83 p.
- Wolman, M.G. (1954): A method of sampling coarse bed material. *American Geophysical Union, Transactions*, 951-956.

Recibido 24 de marzo de 2003

Aceptado 2 de septiembre de 2003