

TRANSPORT DE SEDIMENTS I PROCESSOS MORFOSEDIMENTARIS EN EL TRAM BAIX DEL RIU EBRE

*DAMIÀ VERICAT QUEROL**

Centre for Catchment and Coastal Research, Institute of Geography and Earth Sciences, Aberystwyth University, Gal·les (Regne Unit)

RAMON J. BATALLA VILLANUEVA

*Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida.
Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona*

RESUM

Aquest estudi presenta el balanç de sediments i els processos morfosedimentaris del riu Ebre en el tram entre Sàstago i Móra d'Ebre a partir de mesures regulars durant el període 2002-2004. La càrrega sòlida total aigües amunt de la presa de Mequinensa durant els dos anys del període d'estudi va ser de 3,3 milions de tones, el 99% transportades com a sediment en suspensió. Aigües avall de la presa de Flix la càrrega sòlida total va ser de 910.000 tones, gairebé el 60% en suspensió i la resta com a càrrega de fons. La diferència en el patró de transport s'explica tant per la retenció de sediment als embassaments de Mequinensa i Riba-roja com per la magnitud dels cabals alliberats des de les preses, els quals van ser capaços de mobilitzar i transportar una gran quantitat de material groller com a càrrega de fons. El grau de cuirassament del material del llit del riu aigües avall de la presa de Flix oscil·la amb relació a la magnitud de les crescudes. Durant episodis d'alta magnitud en els quals la competència dels cabals és suficient per mobilitzar la totalitat de les fraccions del material superficial del llit del riu, el cuirassament es redueix, encara que alhora s'incrementa la incisió de la llera. Contràriament, durant crescudes de baixa magnitud en les quals el sediment es transporta de manera selectiva, el cuirassament augmenta de manera generalitzada i l'erosió del llit del riu es redueix. Des del tancament del complex de preses format per Mequinensa,

* Damià Vericat va rebre una beca del CERE en la seua VIII Convocatòria de Beques per a l'any 2001, que li va permetre l'inici de la recerca al tram baix del riu Ebre.

Riba-roja i Flix, el tram baix del riu Ebre ha experimentat una pèrdua d'àrees actives de sediment, intrusió de vegetació arbòria i arbustiva, i una reducció de l'amplada de la llera. Aquests processos són deguts a la disminució de l'aportació de sediment i a la reducció de la freqüència i magnitud de les avingudes aigües avall de les preses.

INTRODUCCIÓ

Els rius transporten aigua i sediments d'una manera contínua des de les zones de capçalera de les conques fins a les àrees de deposició a les parts baixes. La dinàmica de l'aigua i els sediments controla l'equilibri entre els processos fluvials i marins en les zones deltaïques i costaneres. En condicions naturals els rius tendeixen a mantenir la morfologia en equilibri dinàmic, ja que la quantitat de sediments exportats des d'un sector determinat és similar a la transportada des d'aigües amunt (Williams i Wolman, 1984). La dinàmica conjunta d'aigua i sediments en les lleres fluvials controla, a més de la seva morfologia, el fràgil equilibri entre els elements abiòtics (morfologia de la llera) i biòtics (hàbitat íctic). La transferència de sediments en una conca fluvial ocorre episòdicament durant moments d'alta energia (crescudes), en els quals els cabals circulants per la llera són suficientment competents per mobilitzar i transportar els materials.

Les activitats humanes alteren el règim de cabals i la càrrega total de sediments transportada pels rius. En alguns casos, la desforestació i l'augment de la superfície destinada a conreus en zones de muntanya han estat les principals causes de l'increment de la magnitud de les crescudes i del transport de sediments. Per la seva banda, augments de la superfície forestal i/o l'entrada en funcionament de preses modifiquen el règim hidrològic aigües avall, per la qual cosa es veuen afectats nombrosos processos físics i biològics, inclosos el transport de sediments, l'intercanvi de nutrients i l'hàbitat íctic (Poff et al., 1997). En concret, les alteracions hidrològiques causades pels embassaments impliquen canvis en la freqüència i magnitud de les avingudes, reducció dels cabals de base i modificació dels règims de cabals estacionals (Ward i Stanford, 1979; Petts, 1984; Ligon et al., 1995; Ward i Stanford 1995; Kondolf, 1997). Les preses també interrompen la continuïtat del transport de sediments, la qual cosa causa canvis morfològics en sectors d'aigües avall, així com en els ecosistemes deltaics i costaners associats (Kondolf i Mathews, 1993). Les alteracions del règim fluvial i la retenció de sediments comporta, generalment, dos efectes aigües avall. D'una banda, si els cabals alliberats per les preses disposen de capacitat suficient per mobilitzar regularment els sediments de la llera i, a més, el subministrament de sediments des d'afluents és escàs, els processos dominants són, en primera instància, l'erosió del llit del riu (Kondolf i Mathews, 1993; Kondolf, 1997; Shields et al., 2000) i, posteriorment, el cuirassament (el material superficial del llit del riu té una mida molt més gran que el material subsuperficial), i la revegetació d'àrees anteriorment actives (Inbar, 1990; Church, 1995; Batalla et al., 2005). Per contra, si els cabals alliberats

no són capaços de mobilitzar sediments que arriben periòdicament des dels tributaris d'aigües avall de les preses, el procés dominant és la sedimentació (Wilcock et al., 1996). Així, la interacció entre la regulació del cabal i la disponibilitat de sediments controla els processos morfosedimentaris d'aigües avall, la magnitud de la qual varia al llarg del temps (Sear, 1992; Brandt, 2000). Per exemple, aigües avall de l'embassament de Danjiangkou, en el riu Hanjiang, a la Xina, s'han identificat dos tipus d'alteracions morfosedimentàries des que l'embassament va ser construït (Xu, 1996). Durant els primers set anys després de la seva construcció, l'embassament es va dedicar a la regulació d'avingudes i d'aquesta manera només va quedar retinguda a la presa una petita part dels sediments transportats. Durant aquest període tan sols es van observar taxes baixes d'erosió, i la mida del material superficial del llit del riu va canviar poc (mínims canvis en el cuirassament del llit del riu). Posteriorment, es va canviar el funcionament de la presa, i l'emmagatzematge d'aigua passà a ser-ne l'objectiu principal. El 95% dels sediments transportats des d'aigües amunt van quedar retinguts en l'embassament. Després de tres anys, la taxa d'erosió del llit del riu va augmentar tres cops i la mida del material superficial progressivament es va anar incrementant (el valor mitjà de la distribució superficial va augmentar de 0,5 a 50 mm).

En aquest context, l'objectiu d'aquest treball és l'estudi del transport de sediments i els processos morfosedimentaris en el tram baix del riu Ebre. Es tracta d'un tram de riu regulat per les preses de Mequinensa, Riba-roja i Flix. El transport de sediments i la dinàmica morfosedimentària associada s'han estudiat aigües amunt de l'embassament de Mequinensa (i.e. Sàstago) i en un tram de riu de 28 km aigües avall de la presa de Flix durant el període 2002-2004, representatiu del règim de cabals de la sèrie postembassaments (1970-2004). L'estudi s'ha dut a terme en el marc de la tesi doctoral de Damià Vericat ("Sediment transport and processes in a highly regulated river. The lower Ebro, NE Iberian Peninsula", Lleida, juny de 2005) i diversos projectes de recerca coordinats per Ramon J. Batalla (Universitat de Lleida) i finançats pel Ministeri de Ciència i Tecnologia. Amb anterioritat a la realització de la tesi doctoral, Damià Vericat va rebre una beca per part del Centre d'Estudis de la Ribera d'Ebre (CERE, 2001) pel treball "Canvis morfològics al riu Ebre aigües avall dels embassaments de Mequinensa i Riba-roja". Alguns dels resultats d'aquell treball han estat corroborats amb les mesures directes fetes durant la tesi doctoral.

ÀREA D'ESTUDI

La conca del riu Ebre drena una àrea aproximadament de 85.000 km² del nord-est de la península Ibèrica i desemboca a la mar Mediterrània (figura 1). La precipitació mitjana anual en el conjunt de la conca és de 650 mm. El cabal mitjà registrat a l'estació d'aforaments de Tortosa (figura 1) és de 450 m³/s, la qual cosa equival a una aportació hídrica de 14.300 hm³/any. L'aportació màxima registrada a Tortosa ha estat de 30.821 hm³ l'any 1914-1915, mentre

que el cabal màxim estimat ha estat de 12.000 m³/s el 1907 (Novoa, 1984). Gairebé 190 preses regulen al voltant del 60% de l'aportació hídrica anual de l'Ebre i els seus tributaris. Quasi tots els embassaments van ser construïts durant el segle xx. Del total d'embassaments, vint-i-cinc tenen una capacitat superior a 50 hm³ i entre tots emmagatzemen el 90% de l'aportació hídrica anual (Batalla et al., 2004). El cabal màxim a Tortosa en el període 1970-2004 ha estat de 3.300 m³/s (1982).

En aquest estudi es considera tram baix de l'Ebre el sector del riu delimitat pels municipis de Sàstago, situat aigües amunt de la presa de Mequinensa, i Móra d'Ebre, situat 28 km aigües avall de la presa de Flix (figura 1). El pendent mitjà del tram és de $8,5 \times 10^{-4}$ m. L'amplada de la llera aigües avall de Flix oscil·la entre 50 i 160 m. Amb un índex de sinuositat d'1,6 i segons la classificació de Leopold et al. (1964) el tram d'estudi es classifica com a meandriforme. En aquest tram es troba el complex d'embassaments més gran de la conca format per les preses de Mequinensa (operativa des de 1966 i amb una capacitat de 1.534 hm³), Riba-roja (1969, 207 hm³) i Flix (1948, 11 hm³) (figura 1). El principal afluent aigües avall de la presa de Flix és el riu Siurana. Es tracta d'un riu fortament regulat des de la dècada de 1980 i en el qual es porten a terme extraccions d'àrids, fet que atorga a la seva dinàmica hidrosedimentària un paper insignificant. La magnitud de les crescudes freqüents (aquelles amb

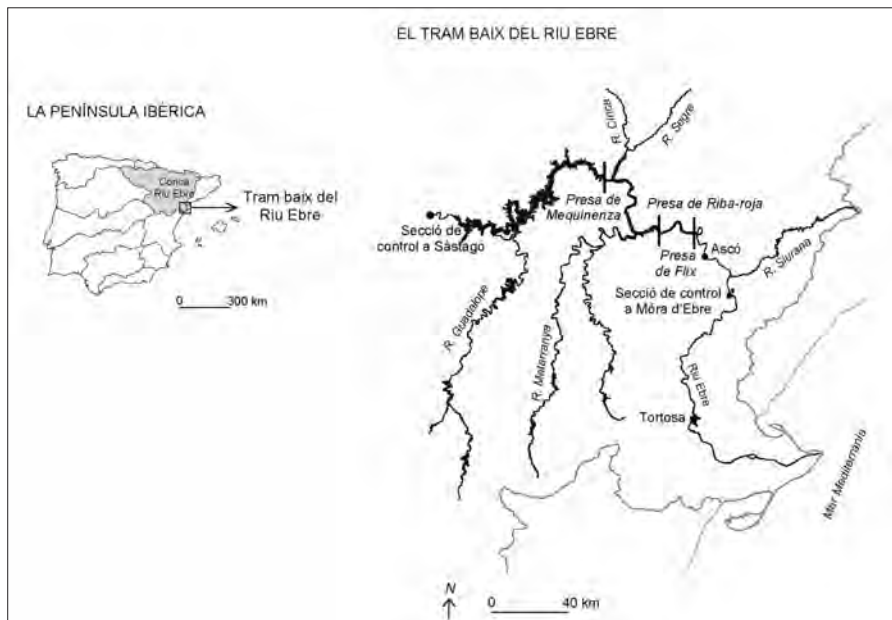


Fig. 1. Situació de la conca del riu Ebre a la península Ibèrica. Situació del tram baix del riu en la conca de l'Ebre i de les seccions de mostreig del transport de sediments i les variables hidràuliques

probabilitat d'ocórrer entre 1 i 25 anys) en el tram baix del riu Ebre s'ha reduït un 25% (Batalla et al., 2004). No obstant això, és important destacar que, encara que la reducció de les crescudes és notable, el riu encara conserva competència per mobilitzar i transportar sediments (Vericat i Batalla, 2004).

METODOLOGIA

El mostreig del transport de sediments i la mesura de paràmetres hidràulics s'ha portat a terme en dues seccions de control, Sàstago i Móra d'Ebre, situades aigües amunt i avall de les preses de Mequinensa i Flix respectivament (figura 1). El control i la mesura dels processos morfosedimentaris s'ha realitzat en vuit seccions de control ubicades aigües avall de la presa de Flix i fins al municipi de Móra d'Ebre (figura 2). Les mesures s'han realitzat durant els anys hidrològics 2002-2003 i 2003-2004.

Hidrologia i hidràulica

Les dades de cabal utilitzats per a l'anàlisi hidrològica a Sàstago són les registrades a l'estació d'aforaments de Saragossa (A011, Confederació Hidrogràfica de l'Ebre), situada 85 km aigües amunt. En el cas de Móra d'Ebre són els cabals de l'estació d'Ascó (A163) situada 10 km aigües amunt (figura 1). Els cabals s'han transitat a les seccions de mostreig del transport de sediments mitjançant el mètode de Muskingum. Els cabals transitats han estat corroborats mitjançant mesuraments directes de cabal en cadascuna de les seccions durant el mostreig. Per a la mesura de la velocitat s'ha utilitzat un molinet hidràulic OTT-C31. S'han realitzat un total de vint-i-un perfils de velocitat per a diferents cabals.

Transport de sediments

El mostreig del transport de sediments s'ha dividit en: *a*) mostreig de sediment en suspensió (sediment transportat en la columna de l'aigua a causa de la turbulència del flux) i *b*) mostreig de càrrega de fons (sediment groller —sorres i grava— transportat en contacte amb el llit del riu).

El mostreig de sediments en suspensió s'ha realitzat d'una manera regular i durant crescudes mitjançant un mostreigador d'integració en profunditat US DH74 suspès amb grua i en una única vertical (figura 3*a*). Vericat i Batalla (2006*a*) van analitzar la variabilitat espacial de les concentracions de sediments en suspensió (C_{ss}) al llarg de la secció de mostreig per determinar la representativitat del mostreig, i van observar que el mostreig en una única vertical és altament representatiu de la concentració de sediments en suspensió en la secció (diferents verticals al llarg de la secció). Per a la determinació de les concentracions s'han filtrat 140 litres d'aigua (464 mostres) mitjançant filtres de cel·lulosa de 1,2 μm de porus.

La càrrega de fons s'ha mostrejat durant crescudes en les quals el cabal va arribar a la tensió crítica d'inici de moviment (850 m^3/s a Sàstago i 600 m^3/s a

Móra d'Ebre). Per a la presa de mostres s'han utilitzat dos mostrejadors Helley-Smith utilitzats mitjançant grues: *a*) mostrejador de 29 kg amb boca de 76 mm i *b*) mostrejador de 76 kg amb boca de 152 mm (figura 3*b*) (per a més detalls sobre l'eficiència dels mostrejadors vegeu Vericat et al., 2006*a*). El mostreig es va realitzar en la mateixa vertical emprada per al mostreig del sediment en suspensió. Vericat i Batalla (2006*b*) van analitzar la variabilitat espacial i temporal de les taxes de transport de càrrega de fons (i_b). En l'esmentat estudi, l'alta variabilitat temporal de la càrrega de fons és el motiu pel qual es justifica el mostreig en una única vertical. En total es van recollir 194 mostres de càrrega de fons, que, una vegada en el laboratori, es van assecar i pesar per determinar les taxes de càrrega de fons i la seva distribució granulomètrica (Vericat i Batalla, 2006*a*).

El transport anual de sediments en suspensió i de càrrega de fons per als anys 2002-2003 i 2003-2004 es va calcular amb les relacions estadístiques entre cabal (Q) i càrrega (C_{ss} i i_b), i mitjançant l'aplicació del mètode de la Corba de Freqüència de Cabals (Walling, 1984).

Processos morfosedimentaris

L'estudi dels processos morfosedimentaris s'ha dividit en: *a*) mostreig del material superficial i subsuperficial del material del llit del riu; *b*) càlcul dels canvis en l'elevació (topografia) del llit del riu durant crescudes, i *c*) estudi dels canvis en la morfologia fluvial del tram d'aigües avall dels embassaments mitjançant l'anàlisi de fotografies aèries preembassaments i postembassaments.

Les mostres granulomètriques del llit del riu s'han obtingut a gairebé totes les barres exposades durant cabal baixos al llarg del tram d'estudi (vuit seccions de control, figura 2). Les mostres s'han obtingut en posicions sedimentològiques equivalents (Rice i Church, 1998). Les barres són sobretot centrals i es troben cobertes per escassa vegetació. Aquestes característiques indiquen tant la important quantitat de sediments emmagatzemats en el sistema com que el llit del riu és relativament actiu, i que el mostreig és representatiu del règim de cabals actual. El mostreig de sediments per a la caracterització granulomètrica de cadascuna de les seccions s'ha realitzat en els estius de 2002, 2003 i 2004. El material superficial s'ha caracteritzat mitjançant el mètode dels transsectes lineals (Wolman, 1954; Rice i Church, 1996). Aquest mètode va permetre la classificació de l'eix *b* d'un mínim de 100 partícules passant-les a través d'una plantilla dividida en intervals $\frac{1}{2}$ phi (Lisle i Madej, 1992). En total s'han mesurat 3.800 partícules. El material subsuperficial s'ha mostrejat mitjançant el mètode volumètric amb extracció prèvia de la capa superficial (figura 2). La partícula més gran de la subsuperfície no va excedir l'1% del pes total de la mostra (Church et al., 1987). En total s'han garbellat 1.390 kg de material durant les tres campanyes de camp.

Els canvis en la topografia de les seccions de control s'han estudiat mitjançant la comparació de seccions topogràfiques realitzades en l'estiu del 2002,

2003 i 2004 (figura 2). Les seccions s'han realitzat mitjançant la combinació de mesures obtingudes amb una estació total model Geodimeter i amb una ecosonda model Lowrance LCX15ci fixada en una embarcació (figura 2). De la mateixa manera, els canvis puntuals en l'elevació de les seccions s'ha estimat mitjançant cadenes d'erosió instal·lades en el llit del riu (figura 2). La ubicació i el control de la mobilitat i dinàmica de traçadors (graves pintades amb diferent color) en cadascuna de les seccions ha ajudat a entendre la magnitud dels processos erosius i sedimentaris (figura 2).

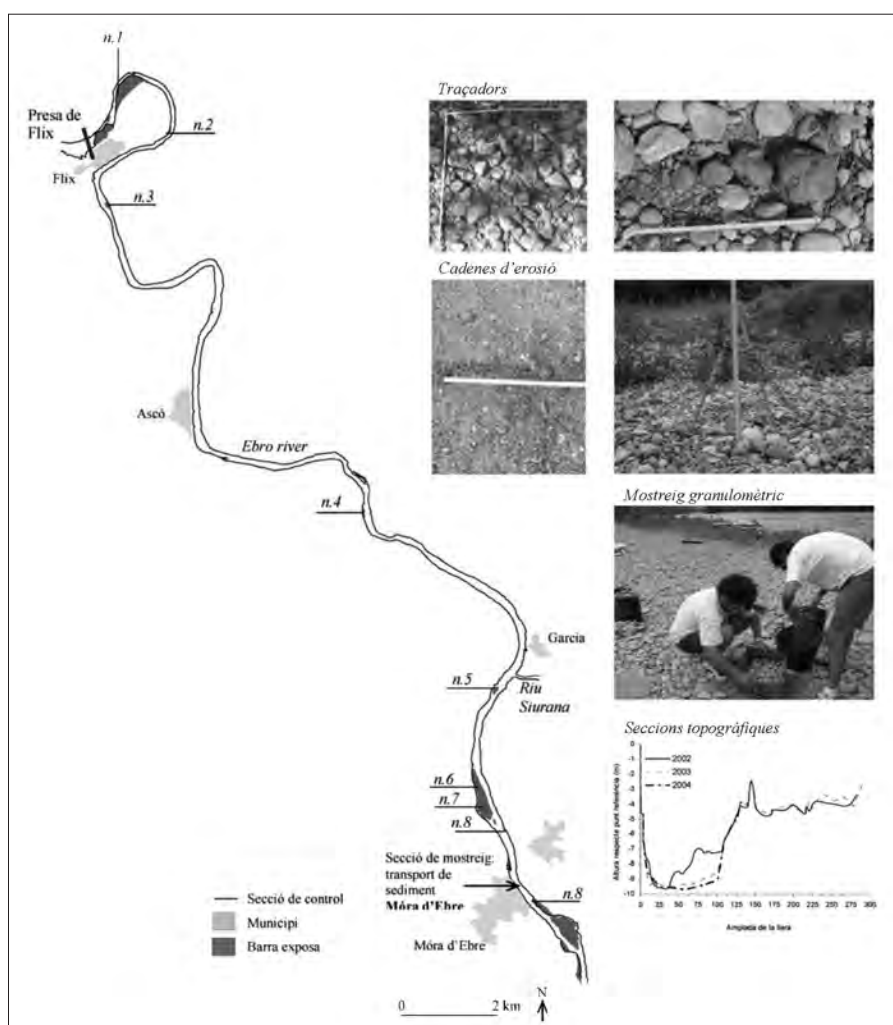


Fig. 2. Situació de les seccions d'estudi aigües avall de la presa de Flix (modificat a partir de Vericat et al., 2006b). Les fotografies mostren els diferents elements d'anàlisi que s'han utilitzat en cadascuna de les seccions

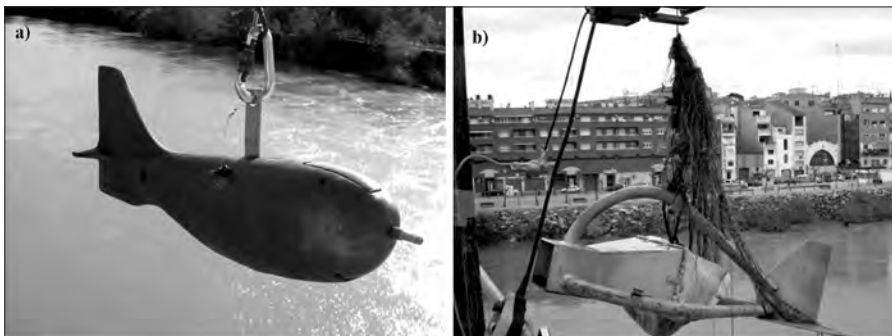


Fig. 3. a) Mostrejador de sediment en suspensió tipus US DH74. b) Mostrejador de càrrega de fons Helley-Smith (model de 152 mm d'obertura de boca)

S'han escanejat i georeferenciat un total de cinc sèries de fotografies aèries per tal de realitzar l'estudi evolutiu de la morfologia fluvial al llarg del segle xx. En concret, s'ha disposat de: a) ortofotomapes de l'any 1927 (font: Confederació Hidrogràfica de l'Ebre), b) fotografies aèries de l'any 1956 (font: Exèrcit de l'Aire), c) fotografies aèries de l'any 1995 (font: Institut Cartogràfic de Catalunya), d) fotografies aèries de l'any 1999 (en format digital i degudament georeferenciades, font: Confederació Hidrogràfica de l'Ebre), i e) fotografies aèries de l'any 2002 (en format digital i degudament georeferenciades, font: Institut Cartogràfic de Catalunya). Les fotografies que no s'han facilitat en format digital ni georeferenciades ho han estat mitjançant els programes informàtics ERDAS i ArcMap. Les diferents unitats morfològiques observades en planta han estat cartografiades i comparades entre anys mitjançant el programa ArcMap.

RESULTATS

Hidrologia i hidràulica

Els anys d'estudi 2002-2003 i 2003-2004 (figura 4) es consideren representatius del règim de cabals en situació postembassaments (1970-2004). L'anàlisi de Vericat i Batalla (2006a) mostra mínimes diferències entre el règim de cabals dels anys d'estudi i el corresponent al conjunt del període postembassaments. El cabal mitjà durant l'any 2002-2003 ha estat de 251 m³/s a Sàstago i de 415 m³/s a Móra d'Ebre, mentre que els cabals mitjans durant l'any 2003-2004 han estat de 235 i 465 m³/s, respectivament. El cabal màxim a Sàstago durant tot el període d'estudi ha estat de 2.604 m³/s (cabal amb un període de retorn de deu anys segons la sèrie postembassaments de l'estació d'aforaments de Saragossa). A Móra d'Ebre, el cabal màxim ha assolit un valor de 2.498 m³/s (període de retorn de vuit anys segons la sèrie de cabals postembassaments a l'estació d'aforaments de Tortosa).

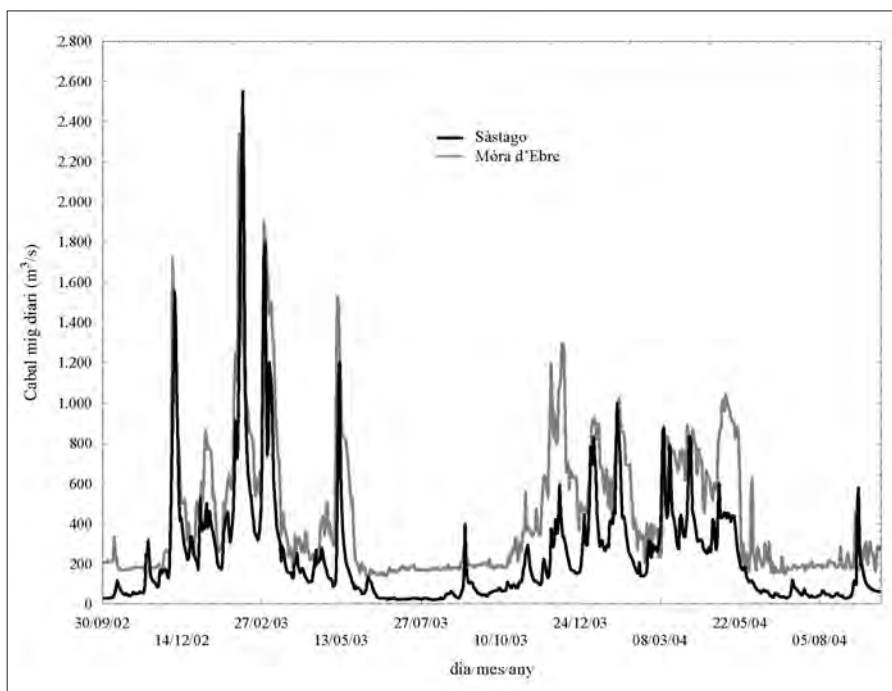


Fig. 4. Cabals mitjans diaris per al període 2002-2004 a la secció de mostreig de sediments a Sàstago i Móra d'Ebre

Els cabals circulants durant la realització dels perfils de velocitat van oscil·lar entre els 2.200 i els 750 m^3/s en ambdues seccions. La velocitat mitjana va variar entre 1,7 i 2,4 m/s a Sàstago, i entre 1,5 i 2,5 m/s a Móra d'Ebre. La velocitat màxima es va obtenir durant cabals superiors a 2.100 m^3/s i va ser de 3 m/s en ambdues seccions. La profunditat de la llera durant el mostreig va oscil·lar entre 3,9 i 6,7 metres a Sàstago i 2,3 i 7,7 metres a Móra d'Ebre. L'amplada de la secció inundada va oscil·lar entre 110 i 250 m a Sàstago (l'aigua va inundar part de la plana al·luvial durant les crescudes de febrer i març de 2003, figura 4), mentre que a Móra d'Ebre el valor s'ha mantingut constant al voltant dels 160 metres.

Transport de sediments

SEDIMENTS EN SUSPENSÍO

La concentració de sediments en suspensió (C_{ss}) mitjana a Sàstago ha estat de 530 mg/l per a un cabal mitjà de mostreig de 1.280 m^3/s durant 2002-2003, i de 215 mg/l per a un cabal de 725 m^3/s l'any 2003-2004. A Móra d'Ebre els valors de les C_{ss} han estat clarament inferiors. La C_{ss} mitjana per a

l'any 2002-2003 ha estat de 38 mg/l per a un cabal de mostreig de 1.280 m³/s i de 27 mg/l l'any 2003-2004 per a un cabal de 910 m³/s. Els valors mostren una clara diferència entre ambdues seccions per a cabals de mostreig molt similars, fet que s'atribueix a la retenció de sediments en els embassaments. Aquesta diferència també s'observa si es comparen els valors màxims de C_{ss} . Durant la crescuda de major magnitud (febrer de 2003, figura 4) s'ha registrat la màxima C_{ss} a ambdues seccions durant tot el període d'estudi: 1.500 mg/l (2.000 m³/s) a Sàstago i 550 mg/l (2.440 m³/s) a Móra d'Ebre. Les C_{ss} a les dues seccions monitoritzades mostren una relació lineal positiva i estadísticament significativa ($p < 0,01$) amb el cabal (figura 5a).

CÀRREGA DE FONTS

La taxa de càrrega de fons mitjana (i_b) durant el mostreig de 2002-2003 a Sàstago ha estat de 41 g/ms per a un cabal mitjà de mostreig de 2.012 m³/s, mentre que l'any 2003-2004 ha estat de 2 g/ms per a un cabal de 894 m³/s. A Móra d'Ebre els valors han estat molt superiors. La i_b mitjana l'any 2002-2003 ha estat de 146 g/ms per a un cabal de 1.050 m³/s, i de 68 g/ms per a un cabal de 1.020 m³/s l'any 2003-2004. La i_b mitjana va disminuir més d'un 50% l'any 2003-2004 respecte a 2002-2003, encara que el cabal mitjà durant els dos anys va ser pràcticament el mateix. Aquesta reducció s'atribueix al major nombre i duració dels cabals competents del primer any respecte al segon, fet que va comportar un comportament sedimentari del llit del riu diferent en cadascun dels anys. Aquest fet que es relaciona amb la dinàmica de la cuirassa superficial i la seva influència en la disponibilitat de sediments durant crescudes (Vericat et al., 2006b, vegeu secció de processos morfosedimentaris per a més detalls). La i_b màxima mostrejada a Sàstago ha estat de 135 g/ms, mentre que a Móra d'Ebre ha estat de 1.200 g/ms, ambdós valors registrats també durant la crescuda de febrer de 2003 (figura 4). La diferència entre les i_b s'ha relacionat amb les característiques hidràuliques i granulomètriques de les dues seccions de mostreig (Vericat i Batalla, 2006a). Les i_b en les dues seccions monitoritzades mostren una relació lineal positiva i estadísticament significativa ($p < 0,01$) amb el cabal (figura 5b).

CÀRREGA SÒLIDA TOTAL

Durant l'any 2002-2003 van circular per la secció de Sàstago un total de 2,3 milions de tones de sediments en suspensió, mentre que en el 2003-2004 el transport ha estat de 970.000 tones. Aigües avall de l'embassament de Flix el transport de sediments en suspensió ha estat de 260.000 tones i 290.000 tones durant els anys 2002-2003 i 2003-2004, respectivament. La retenció de sediments en suspensió en els embassaments de Mequinensa, Riba-roja i Flix s'estima, per tant, en un 80% de la càrrega sòlida anual durant el període d'estudi. Per la seva banda, el transport anual de càrrega de fons aigües amunt de l'embassament de Mequinensa ha estat de 15.300 tones l'any 2002-2003 i de 155 tones el 2003-2004. Es tracta de valors clarament inferiors als obtinguts

a Móra d'Ebre, 280.000 tones l'any 2002-2003 i 80.000 tones el 2003-2004. Al tram aigües avall de Flix les partícules de càrrega de fons provenen en la seva totalitat del llit del riu, ja que els embassaments retenen totes les partícules grolleres i per la manca d'aportació sòlida per part del riu Siurana.

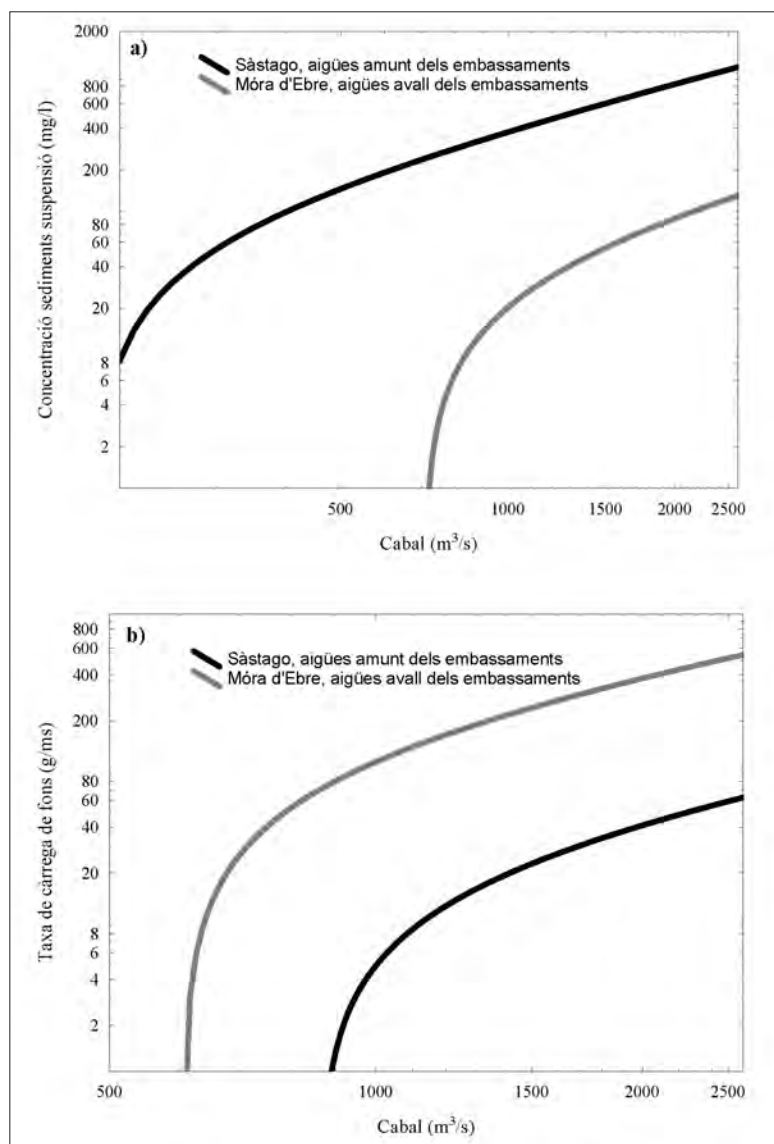


Fig. 5. Exemple de models estadístics derivats a partir de dades obtingudes al camp durant el període 2002-2004. a) Relació general entre cabal i concentració de sediments en suspensió a les seccions de mostreig. b) Relació general entre cabal i taxa de càrrega de fons a les seccions de mostreig

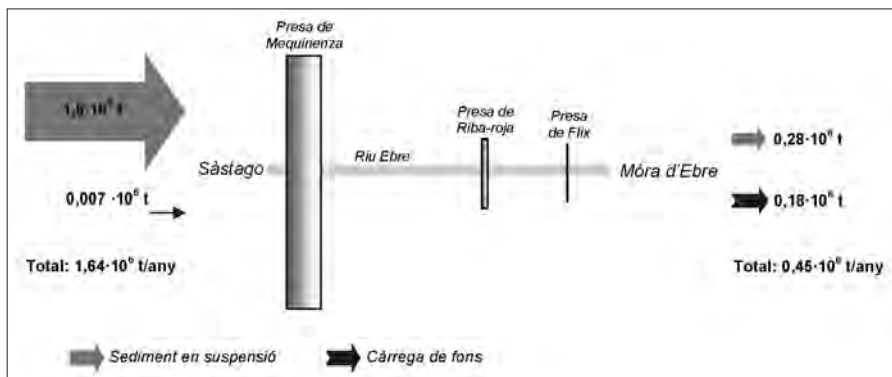


Fig. 6. Càrrega total de sediments en el tram baix del riu Ebre per al període 2002-2004 (modificat a partir de Vericat i Batalla, 2006a)

El transport mitjà anual de sediments a Sàstago ha estat d'1,64 milions de tones/any, gairebé la totalitat en suspensió (figura 6). A Móra d'Ebre, el transport mitjà anual de sediments ha estat de 450.000 tones/any (figura 6), la meitat en suspensió i la resta com a càrrega de fons.

Processos morfosedimentaris

EVOLUCIÓ DEL CUIRASSAMENT DEL LLIT DEL RIU

El coeficient de cuirassament mostra la relació entre el valor mitjà de la distribució granulomètrica del material superficial i subsuperficial del llit del riu. Aquest coeficient s'utilitza, entre altres coses, per determinar l'estabilitat del llit del riu, per estimar l'energia necessària per mobilitzar-ne les partícules i també per avaluar la qualitat de l'estructura sedimentària com a hàbitat per a peixos. El coeficient de cuirassament (A_c) ha experimentat una reducció notable en alguna de les vuit seccions de control en l'estiu de l'any 2003, a causa de l'alta dinàmica hidrològica durant l'any 2002-2003 (figura 4). El valor mitjà de l' A_c per a l'any 2002 s'ha calculat de 2,3, mentre que l'any 2003 s'ha reduït a 1,9. El major canvi es va observar en la secció n.6 (figura 2), ubicada 2 km aigües amunt de Móra d'Ebre (4,4, l'any 2002; 2,4, el 2003). El valor màxim de cuirassament ($A_c=3,0$) s'ha estimat en la secció n.1 (figura 2), 0,8 km aigües avall de la presa de Flix, on la granulometria i l'estructura de llit del riu són molt estables. El valor mínim de cuirassament ($A_c=1,0$) s'ha obtingut en la secció n.4 (figura 2), en la qual no es van observar canvis significatius respecte a la situació de 2002.

L'any 2004 el cuirassament va augmentar de nou de manera generalitzada. El valor mitjà de l' A_c va ser de 2,3, és a dir, 0,4 punts superior al valor calculat a l'estiu de 2003. La figura 7a mostra els canvis en les distribucions granulomètriques superficials i subsuperficials (i, en conseqüència, de l' A_c)

durant el període d'estudi. El valor màxim d' A_c (2,7) s'ha obtingut en el tram comprès entre les seccions n.5 i n.8 (ambdues incloses, figura 2). En comparació amb l'any 2003, l' A_c en aquest tram ha augmentat entre 0,3 i 1,1 punts.

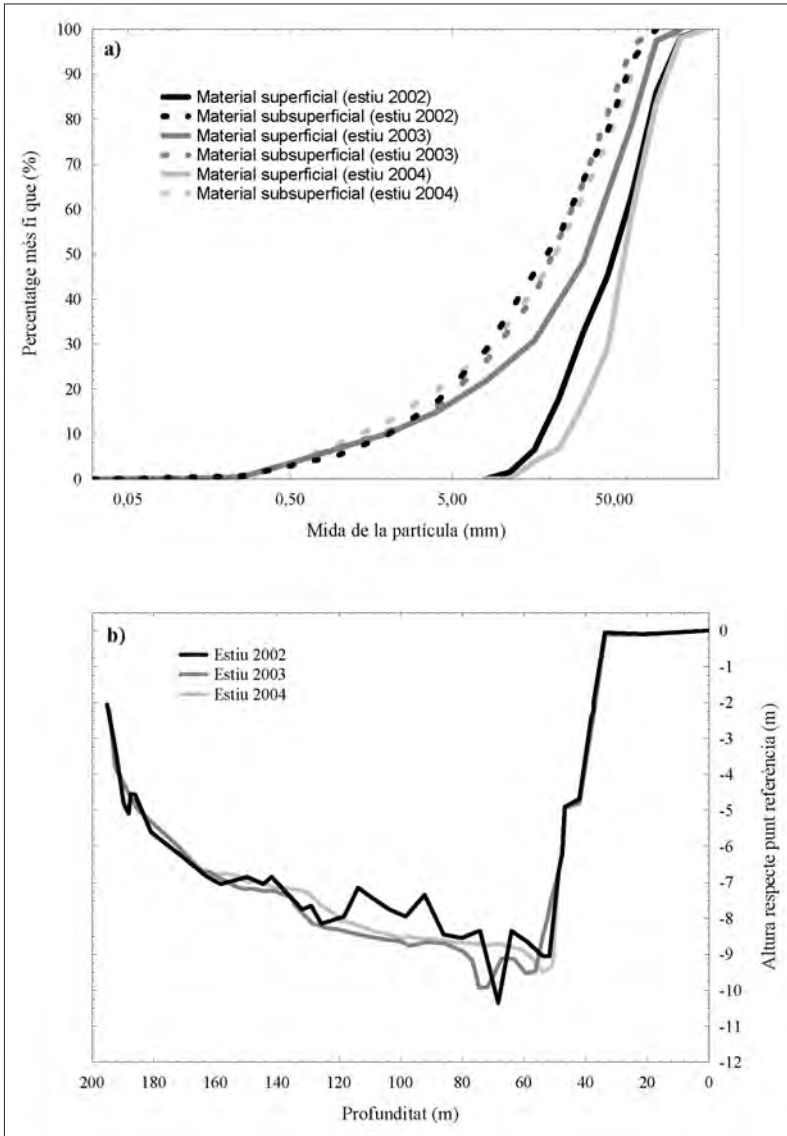


Fig. 7. a) Evolució de les distribucions granulomètriques del material superficial i subsuperficial del llit del riu d'una de les seccions d'estudi ubicada en les proximitats de Móra d'Ebre (n.8, figura 2). b) Evolució de la topografia d'una de la secció d'estudi n.8 (figura 2)

L'increment màxim s'ha observat a la secció n.8 (figura 7a). El valor mínim de cuirassament s'ha obtingut en la secció n.4 (figura 2), tal i com ja va passar el 2003. Les diferències en l' A_c reflecteixen les variacions en la disponibilitat de sediments en cadascuna de les seccions de control, determinades, bàsicament, per les característiques granulomètriques dels trams entre seccions (Vericat et al., 2006b).

EVOLUCIÓ DE LA TOPOGRAFIA DEL LLIT DEL RIU

Els canvis en la topografia de les seccions d'estudi aigües avall de la presa de Flix han estat controlats per la magnitud de les crescudes. La figura 7b mostra un exemple de l'evolució topogràfica de la secció n.8 (figura 2), ubicada en les proximitats del municipi de Móra d'Ebre. De manera general, els majors canvis topogràfics s'han observat en l'estiu del 2003 com a conseqüència de l'alta magnitud de les crescudes registrades durant l'any hidrològic 2002-2003 (figura 4).

Després de l'any hidrològic 2002-2003 s'han observat valors màxims de sedimentació de 52 cm i d'incisió de 17 cm (vegeu taula I) estimat amb cadenes d'erosió. El valor màxim de sedimentació s'ha observat aigües avall del meandre de Flix. La mitjana ponderada d'incisió per a tot el tram d'estudi en l'estiu de 2003 ha estat de 0,4 cm considerant la totalitat de les seccions, i de 6 cm si s'exclou la secció de Flix (n.3, figura 2 i taula I). La baixa magnitud de les crescudes registrades durant l'any hidrològic 2003-2004 ha estat la causa dels mínims canvis observats en la topografia de les seccions de control (vegeu taula I), amb valors d'erosió i sedimentació pràcticament insignificants.

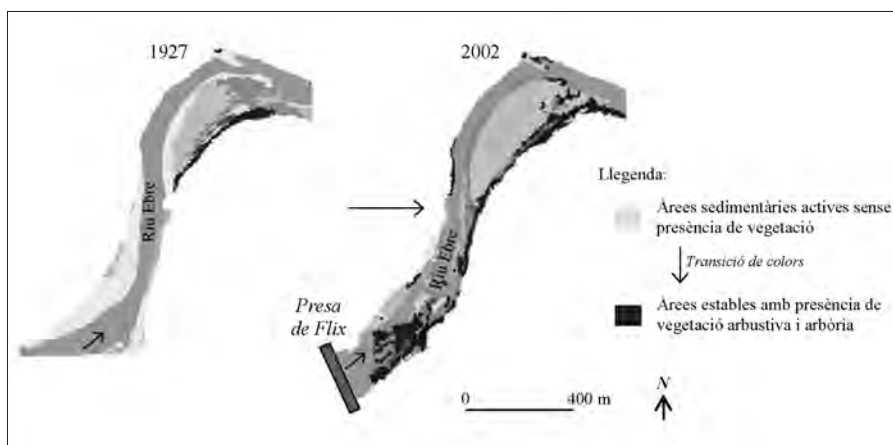


Fig. 8. Canvis morfològics en un tram de riu ubicat en el meandre de Flix aigües avall de la presa de Flix (modificat a partir de Batalla et al., 2006)

TAULA I. PROCESSOS EROSIUS I SEDIMENTARIS A LES SECCIONS D'ESTUDI
DEL RIU EBRE AIGÜES AVALL DE LA PRESA DE FLIX

Secció de control	Distància des de la presa de Flix (km)	2002-2003 ¹	2003-2004 ⁵
		Erosió/ sedimentació (cm) ²	Erosió/ sedimentació (cm) ²
Meandre de Flix (n.2)	2,7	-1,8	0,4
Flix (n.3)	5,6	-17,5	-0,3
Pas de l'Ase (n.4)	18,3	+52,3	2,6
Garcia (n.5)	22,9	-1,3	-0,9
Móra d'Ebre 1 (n.6)	25,2	3	3
Móra d'Ebre 2 (n.7)	25,5	-11,5	1,9
Móra d'Ebre 3 (n.8)	28,0	-2,2	-0,2
Mitjana ponderada ⁴		-14,5	-4,1
Mitjana ponderada sense la secció de Flix		-0,4	0
		-6,0	-0,3

¹ El cabal màxim a la secció de Móra d'Ebre durant l'any hidrològic 2002-2003 ha estat de 2.498 m³/s.

² Cadenes d'erosió: on els valors - indiquen erosió neta, i els valors + sedimentació neta.

³ No es disposa de dades.

⁴ La mitjana s'ha calculat ponderant els valors amb la distància entre seccions.

⁵ El cabal màxim a la secció de Móra d'Ebre durant l'any hidrològic 2003-2004 ha estat de 1.355 m³/s.

CANVIS MORFOLÒGICS

Mitjançant la comparació de les diferents unitats morfològiques fluvials cartografiades a partir de les sèries de fotografies aèries disponibles per al període preembassaments i postembassaments s'ha observat una progressiva pèrdua d'àrees sedimentàriament actives a la llera del riu aigües avall de les preses, intrusió de vegetació arbustiva i arbòria i, com a conseqüència d'ambdues, una reducció de l'amplada de la llera (figura 8). A mode d'exemple, en el cas del meandre de Flix, la llera activa s'ha reduït al voltant de 4 ha entre el 1956 i el 2002, aproximadament el 30% de les àrees actives de sediment estan ocupades per vegetació arbòria (p. ex. *Rubio-Populetum albae*), i l'amplada de la llera s'ha reduït al voltant del 25% (Batalla et al., 2006). Els canvis morfològics observats aigües avall de l'embassament de Flix es deuen principalment a un procés de *feedback* en el qual intervenen la reducció de la magnitud i

freqüència de les avingudes, el canvi de les condicions hidràuliques del flux (p. ex. rugositat) i de l'energia disponible per a l'erosió de la llera, i la manca de sediment per al transport aigües avall.

DISCUSSIÓ

Els embassaments retenen percentatges molt elevats de la càrrega de sediments, de manera que redueixen el subministrament aigües avall. La retenció de sediments en l'embassament de Mequinensa i Riba-roja ha estat estimada d'entorn al 85% per Varela et al. (1986) per al període 1974-1979. Posteriorment, Palanques (1987) va calcular una retenció en aquests embassament del 72% durant el període 1983-1986. Avendaño et al. (1997) van estimar una retenció de la càrrega sedimentària en el tram baix de l'Ebre d'entorn al 75% mitjançant la comparació de diferents batimetries dels embassaments. Sanz et al. (1999) van estimar valors similars de retenció a partir de mostres aleatòries de sediments en suspensió. Recentment, Roura (2004) va estimar una retenció de sediments en suspensió en l'embassament de Mequinensa del 95% a partir de dades diàries de concentració de sediments en suspensió. Els valors calculats en aquest treball també se situen en l'ordre de magnitud dels treballs anteriors. La retenció de sediments en suspensió oscil·la entre el 70 i el 88%. Les diferències amb treballs anteriors es poden atribuir als diferents rangs de cabals mostrejats i a les característiques hidrològiques dels diferents períodes d'estudi. Així mateix, és important assenyalar que aquest estudi no ha considerat les aportacions del sistema Segre-Cinca, que desemboquen a l'Ebre a l'embassament de Riba-roja. Tenint en compte que l'aportació de sediments per part d'aquest dos rius és important, la retenció total podria ser força superior.

Aigües avall de la presa de Flix el riu ha transportat una càrrega mitjana anual de 450.000 tones. Aquest valor representa un 2% de la càrrega anual transportada per l'Ebre a finals de segle XIX (Gorría, 1877) i el 3% de l'estimada a principis del segle XX (Bayerri, 1934-1935; Nelson, 1990). Els valors obtinguts en aquest treball confirmen l'alta reducció de la càrrega de sediments en el tram baix de l'Ebre. Els valors són similars als obtinguts per Sanz et al. (1999) sense considerar la càrrega de fons i quatre vegades superiors als estimats per Guillén i Palanques (1992) a partir de mesures a la plana deltaica.

A més de la retenció de sediments en els embassaments, aquests també modifiquen el patró de transport de sediments. El transport de càrrega de fons constitueix habitualment el 10% de la càrrega total transportada en sistemes naturals (Dedkov i Mozzerin, 1996). Aquesta proporció pot canviar en rius regulats a causa de la retenció de la càrrega de sediments en suspensió i a la competència dels cabals alliberats. En el cas del tram baix del riu Ebre aigües avall de Flix, el 60% de la càrrega sòlida és transportada en suspensió, mentre que el 40% ho és com a càrrega de fons. Durant les crescudes d'alta magnitud de 2002-2003 el flux va tenir suficient competència per al trencament de la cuirassa superficial i el posterior transport de material subsuperficial, la qual cosa

va provocar l'increment de les taxes de càrrega de fons i la incisió del llit del riu. Durant el 2003-2004 la magnitud de les crescudes va ser inferior. El cabal no va tenir competència suficient per a la mobilització de totes les partícules del llit. D'aquesta forma, tenint en compte la limitació del subministrament de sediments des d'aigües amunt, es va incrementar el cuirassament del llit del riu i, conseqüentment, les taxes de càrrega de fons van disminuir.

Tal i com s'ha observat en aquest treball, la relació entre els rius i les seves preses és complexa i evoluciona, i els efectes últims de la regulació són encara desconeguts. La regulació i la desregulació fluvial plantegen reptes científics i de gestió importants per al segle XXI. En aquest context cal citar que són encara escassos els estudis sobre transport de sediments disponibles en grans rius regulats. No obstant això, els rius regulats requereixen sovint de programes de restauració fluvial que permeten minimitzar els efectes dels embassaments sobre el funcionament de l'ecosistema fluvial d'aigües avall de les preses. En el riu Ebre es treballa en aquest sentit des de 2002 mitjançant el disseny i execució regular de crescudes de manteniment que a priori permeten millorar com a mínim la capacitat autodepurativa del riu.

AGRAÏMENTS

Aquesta investigació s'ha realitzat en el marc del projecte REN2001-0840-C02-01/HID, finançat pel Ministeri de Ciència i Tecnologia. El primer autor va gaudir d'una beca del Ministeri d'Educació, Cultura i Esport. La Confederació Hidrogràfica de l'Ebre va subministrar-hi les dades hidrològiques. L'Ajuntament de Mòra d'Ebre va proporcionar-hi ajuda logística. Albert Rovira va col·laborar-hi en el treball de camp i de laboratori.

BIBLIOGRAFIA

AVENDAÑO, C.; COBO, R.; SANZ, M.E.; GÓMEZ, J.L. (1997): "Capacity situation in Spanish reservoirs". I.C.O.L.D. *Proceedings of the Nineteenth Congress on Large Dams*, 74 (52): 849-862.

BATALLA, R.J.; KONDOLF, G.M.; GÓMEZ, C.M. (2004): "Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain". *Journal of Hydrology*, 290: 117-136.

BATALLA, R.J.; VERICAT, D.; MARTÍNEZ, T.I. (2006): "River-channel changes downstream large dams: the lower Ebro River". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 143: 1-14.

BAYERRI, E. (1934-1935): *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta Moderna de Alguerri, Tortosa.

BRANDT, S.A. (2000): "Prediction of downstream geomorphological changes after dam construction: a stream power approach". *International Journal of Water Resources Development*, 16 (3): 343-367.

CHURCH, M. (1995): "Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales". *Regulated Rivers: Research and Management*, 11 (1): 3-22.

CHURCH, M.; McLEAN, D.G.; WOLCOTT, J.F. (1987): "River bed gravels: sampling and analysis", dins THORNE C. R., BARTHURST J.C. i HEY R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, 43-88.

DEDKOV, A.P.; MOZZHERIN, V.I. (1996): "Erosion and sediment yield on the Earth", dins WALLING, D.E. i WEBB, B.W. (eds.): *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publ., 236, Wallingford, 29-33.

GORRÍA, H. (1877): *Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques*. Imprenta la Giralda, Madrid.

GUILLÉN, J.; PALANQUES, A. (1992): "Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River". *Sedimentology*, 39: 567-579.

INBAR, M. (1990): "Effect of dams on mountainous bedrock rivers". *Physical Geography*, 11 (4): 305-319.

KONDOLF, G.M. (1997): "Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels". *Environmental Management*, 21 (4): 533-551.

KONDOLF, G.M.; MATTHEWS, W.V.G. (1993): *Management of coarse sediment in regulated rivers of California*. University of California Water Resources Center: Davis, California.

LEOPOLD, L.P.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. (1964): *Fluvial processes in geomorphology*. WH Freeman, San Francisco; 522 p.

LIGON, F.; DIETRICH, W.E.; TRUSH, W.J. (1995): "Downstream ecological effects of dams: a geomorphic perspective". *BioScience*, 45 (3): 183-192.

LISLE, T.E.; MADEJ, M.A. (1992): "Spatial variation in a channel with high sediment supply", dins BILLI, P., HEY, R.D., THORNE, C.R., TACCONI, P. (eds.): *Dynamics of Gravel Bed Rivers*, John Willey, Nova York, 277-291.

NELSON, C.H. (1990): "Post Messinian deposition rates and estimated river loads in the Ebro sedimentary system", dins NELSON C.H., MALDONADO A. (eds.): *Marine Geology of the Ebro Continental Margin*, *Marine Geology*, 95: 395-418.

NOVOA, M. (1984): "Precipitaciones y avenidas extraordinarias en Catalunya". *Proceedings of the Jornadas de Trabajo sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo*. Barcelona, 1-15.

PALANQUES, A. (1987): *Dinámica sedimentaria, mineralogía y microcontaminantes inorgánicos de las suspensiones de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro*. Tesis doctoral, Instituto de Ciencias del Mar (CSIC), Barcelona, 438 p.

PETTS, G.E. (1984): *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management*. Wiley, Nova York; 326 p.

POFF, N.L.; ALLAN, J.D.; BAIN, M.B.; KARR, J.R.; PRESTEGAARD, K.L.; RICHTER, B.D.; SPARKS, R.E.; STROMBERG, J.C. (1997): "The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration". *Bioscience*, 47 (11): 769-784.

RICE, S.; CHURCH, M. (1996): "Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates". *Journal of Sedimentary Research*, 66 (3): 654-665.

RICE, S.; CHURCH, M. (1998): "Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links". *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 345-363.

ROURA, M. (2004): *Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre*. Tesi doctoral, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Barcelona; 145 p.

SANZ, M.E.; AVENDAÑO, C.; 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.

SEAR, D.A. (1992): "Impact of hydroelectric power releases on sediment transport processes in pool-riffle sequences", dins BILLI, P., HEY, R.D., THORNE, C.R., TACCONI, P. (eds.): *Dynamics of Gravel Bed Rivers*, John Wiley, Nova York, 629-649.

SHIELDS, F.D.; SIMON, A.; STEFFEN L.J. (2000): "Reservoir effects on downstream river channel migration". *Environmental Conservation*, 27 (1): 54-66.

VARELA, J.; GALLARDO, A.; LÓPEZ DE VELASCO, A. (1986): "Retención de sólidos por los embalses de Mequinensa y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al Delta del Ebro", dins M. MARIÑO (ed.): *El sistema integrado del Ebro*. Gráficas Hermes, Madrid, 200-219.

VERICAT, D.; 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.; BATALLA, R.J. (2006a): "Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula". *Geomorphology*, 79 (1-2): 72-92.

VERICAT, D.; BATALLA, R.J. (2006b): "Bedload variability under low sediment transport conditions in the lower Ebro River (NE Spain)", dins BATALLA, R.J. i GARCIA, C. (eds.): *River/Catchment Dynamics: Natural Processes and Human Impacts*. IAHS Red Book Publication 299, Wallingford, 171-178.

VERICAT, D.; CHURCH, M.; BATALLA, R.J. (2006a): "Bedload bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel-bed river". *Water Resources Research*, 41, W01402.

VERICAT, D.; BATALLA, R.J.; GARCIA, C. (2006b): "Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro". *Geomorphology*, 76: 122-136.

WALLING, D.E. (1984): "Dissolved loads and their measurements", dins HADLEY R.F., WALLING D.E. (eds.): *Erosion and sediment yield: Some methods of measurements and modeling*. Geo Books, Londres, 111-177.

WARD, J.V.; STANFORD, J.A. (1979): *The Ecology of Regulated Streams*. Plenum Press, Nova York.

WARD, J.V.; STANFORD, J.A. (1995): "Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation". *Regulated Rivers: Research and Management*, 11: 105-119.

WILCOCK, P.R.; KONDOLF, G.M.; MATTHEWS, W.V.; BARTA, A.F. (1996): "Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river". *Water Resources Research*, 32: 2911-2921.

WILLIAMS, G.P.; WOLMAN, M.G. (1984): *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. US Geological Survey Professional Paper 1986.

WOLMAN, M.G. (1954): "A method of sampling coarse bed material". *American Geophysical Union Transactions*, 35: 951-956.

XU, J. (1996): "Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment". *Geomorphology*, 17: 351-359.