

# CUANTIFICACIÓN Y EVOLUCIÓN DURANTE EL SIGLO XX DE LOS APORTES DE SEDIMENTO TRANSPORTADO COMO CARGA DE FONDO POR EL RÍO EBRO AL MEDIO MARINO

J. Guillén(1), J.I. Díaz(1) y A. Palanques(1)

(1) Instituto de Ciencias del Mar, C.S.I.C. Paseo Nacional s/n, 08039 BARCELONA

## RESUMEN

Las medidas directas del transporte como carga de fondo en el curso bajo del río Ebro y los cálculos efectuados a partir de ecuaciones empíricas son muy diferentes entre sí, como consecuencia de la presencia de fangos y de la poca disponibilidad de sedimentos tamaño arena en el lecho. Las relaciones entre el material transportado como carga de fondo y el material transportado en suspensión, así como los datos obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas, coinciden en señalar una importante disminución del transporte como carga de fondo durante el siglo actual. Los resultados de las ecuaciones empíricas muestran unos aportes de 1.000.000 Tm/año durante el primer tercio del siglo (1914-1935), de 730.000 Tm/año durante el período 1950-70, e inferior a 300.000 Tm/año en los últimos veinte años. Durante la última década los aportes calculados son inferiores a las 100.000 Tm/año. Estos datos reflejan sólo la reducción de la capacidad de transporte máxima del río, producida por la disminución del caudal a lo largo del siglo y no tienen en cuenta los efectos de retención de sedimentos en los embalses y la no disponibilidad de sedimento tamaño arena en el curso bajo del río. Las medidas directas del transporte por carga de fondo son inferiores a las calculadas empíricamente en cerca de dos órdenes de magnitud. Comparando estos resultados con la capacidad de transporte (320.000 Tm/año) en la zona litoral del delta del Ebro, se pone de manifiesto la existencia de un déficit sedimentario importante desde los años 70 hasta la actualidad, que se ha acentuado durante la última década.

**Palabras clave:** aportes sedimentarios, carga de fondo, balance sedimentario, delta del Ebro.

## ABSTRACT

Estimations of the bedload transport in the lowest Ebro River were carried out by direct measurements and by empirical equations. Results are very different due to the effect of the cohesive sediment deposited in the river bed and the shortage of sand availability in this part of the river. Relationships between the bedload and the suspended load transport along with data from empirical equations indicate a very important decrease of the bedload sediment transport in this river during the XX century. Results from equations show a bedload supply of about 1.000.000 T/year during 1914-35; 730.000 T/year during 1950-70 and lower than 300.000 T/year in the last twenty years. During 1980-90 supplies are lower than 100.000 T/year. These data indicate the decrease of the maximum transport capacity produced by the water discharge decrease of the Ebro river during this century, but they do not consider the sediment retention and shortage of sand availability caused by the dams. Direct measurements of the bedload transport are one or two orders of magnitud lower than the empirical. Considering that the longitudinal transport capacity in the littoral zone of the Ebro delta is about 320.000 T/year there is a deficit in the sedimentary balance of the Ebro littoral system which has been increasing from the 70's up to now.

**Key words:** sediment supply, bedload, sedimentary balance, Ebro delta

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

Guillén, J., Díaz, J.I. and Palanques, A. (1992): Quantification and evolution of the Ebro River bedload sediment supplies during the XX century. *Rev. Soc. Geol. España*, 5: 27-37

## 1. INTRODUCCIÓN

El sedimento transportado por un curso fluvial y que se deposita en su lecho se denomina "*bed-material load*" (Middleton y Southard, 1984). El material que se desplaza en contacto con el lecho o muy próximo a él es conocido como carga de fondo ("*bed load*"), mientras que el material que se desplaza suspendido en el fluido se denomina material en suspensión ("*suspended load*"). Los límites entre el transporte en suspensión y la carga de fondo son graduales y una misma partícula puede ser transportada sucesivamente por ambas modalidades de transporte. Mucha de la arena del lecho de un río ha sido transportada en suspensión la mayor parte de la distancia que ha recorrido (Moss, 1972), sin embargo, el tiempo que ésta ha permanecido en suspensión es muy pequeño respecto al tiempo total que emplea en recorrer todo el trayecto (Middleton, 1976). Esto es debido a que el transporte en suspensión de las arenas tiene lugar sólo en condiciones de alta energía, normalmente durante las avenidas.

La cuantificación del sedimento transportado por un curso fluvial es un tema complejo que requiere la utilización conjunta de diferentes técnicas complementarias entre sí. La aplicación de estas técnicas es función de las características morfológicas e hidráulicas del río a estudiar y de la modalidad de transporte que interesa evaluar (Emmett, 1981; Richards, 1985). El material en suspensión puede ser medido directamente utilizando el muestreo con botellas hidrográficas, bombas de succión y trampas de sedimento, ó a partir de medidas de la turbidez del agua por métodos ópticos. Todas estas técnicas tienen sus limitaciones y sus rangos óptimos de operatividad (Walling y Webb, 1981; Ward, 1984).

La cuantificación del transporte de sedimento como carga de fondo presenta serias dificultades que comienzan ya en la propia definición del término. Desde un punto de vista teórico (Bagnold, 1966) el transporte como carga de fondo incluye los mecanismos de rodadura ("*rolling*"), deslizamiento ("*sliding*"), saltación ("*saltation*") y transporte por colisión entre granos que interrumpen la saltación (Leeder, 1979, 1982). Otra definición de la carga de fondo (Yang, 1986) se refiere a la migración de las estructuras de fondo ("*bed forms*"), es decir, el material que se deposita en la cara de avalancha de estas estructuras. En este caso se incluyen los mecanismos de transporte de la definición anterior y al material que se mueve por suspensión y queda atrapado en la cara de avalancha de las estructuras de fondo, como consecuencia de la disminución de la turbulencia del flujo en esta zona (Yang, 1986).

La evaluación de la cantidad de sedimento transportado como carga de fondo se complica por las variaciones en la tasa de transporte, que presentan un amplio espectro temporal, incluso en condiciones estacionarias de flujo (Gómez *et al.*, 1989). Las mediciones de campo demuestran que la tasa de transporte por carga de fondo está caracterizada por presentar oscilaciones de baja frecuencia a las que normalmente se so-

breimponen otras oscilaciones de frecuencias más altas. Los períodos de estas oscilaciones en el transporte son de 0,47 a 168 minutos (Gómez *et al.*, 1989), hasta 20 horas (Einstein, 1937) y evidencian la necesidad de obtener registros del material transportado como carga de fondo durante períodos de tiempo prolongados para poder efectuar valoraciones generales significativas.

El objetivo de este trabajo es la cuantificación de la cantidad de sedimento transportado como carga de fondo por el río Ebro al medio marino y su evolución durante el siglo actual. Los estudios previos realizados en el curso bajo del río Ebro tratan acerca de la batimetría del cauce del río y la distribución del recubrimiento sedimentario superficial (D.G.P.C., 1985; Verdager *et al.*, 1985; Serra *et al.*, 1990), así como de la valoración de los aportes sólidos en suspensión que alcanzan el medio marino, la distribución de la cuña salina y la presencia de estructuras de fondo (Palanques, 1987; Palanques *et al.*, 1990a; Guillén *et al.*, 1990).

El conocimiento de la cantidad de material descargado por el río Ebro en forma de carga de fondo es fundamental para el estudio del balance sedimentario de la zona litoral del delta del Ebro y para controlar el impacto sobre el medio deltaico de la retención de sedimentos en los embalses. Desde el año 1988 hasta la actualidad se han venido aplicando diversas técnicas para intentar evaluar el transporte de sedimentos como carga de fondo en el curso bajo del río Ebro a partir de medidas directas (Camp y Guillén, 1988; Guillén y Camp, 1989). Además, se han utilizado seis ecuaciones empíricas para calcular el transporte de sedimento como carga de fondo bajo distintas condiciones, aplicándolas para las características hidrodinámicas y texturales medidas en el río Ebro. Estas ecuaciones han permitido realizar una aproximación al sedimento transportado como carga de fondo por el río Ebro en el transcurso del siglo actual.

## 2. MÉTODOS

### 2.1. Métodos de campo y laboratorio

Para la realización de las medidas directas del transporte de sedimento como carga de fondo en la parte baja del río Ebro se instaló una trampa tipo "Polia-koff" (Singhal *et al.*, 1981) durante períodos de 15-30 minutos en el centro del cauce y cerca de ambas orillas a lo largo de las secciones de Amposta y Desembocadura (Fig. 1B). La instalación de la trampa tuvo lugar durante dos campañas representativas de situaciones de caudal diferentes: Mayo de 1988, con caudal en torno a los 675 m<sup>3</sup>/s, y Septiembre de 1988, con caudal inferior a 250 m<sup>3</sup>/s. En ambas campañas se realizaron, simultáneamente a la instalación de la trampa, perfiles verticales con toma de muestras de agua cada metro para valorar el transporte de sedimento en suspensión, medidas de la velocidad del flujo con un molinete BRAYSTOKE BFM001 y se tomaron muestras de sedimento

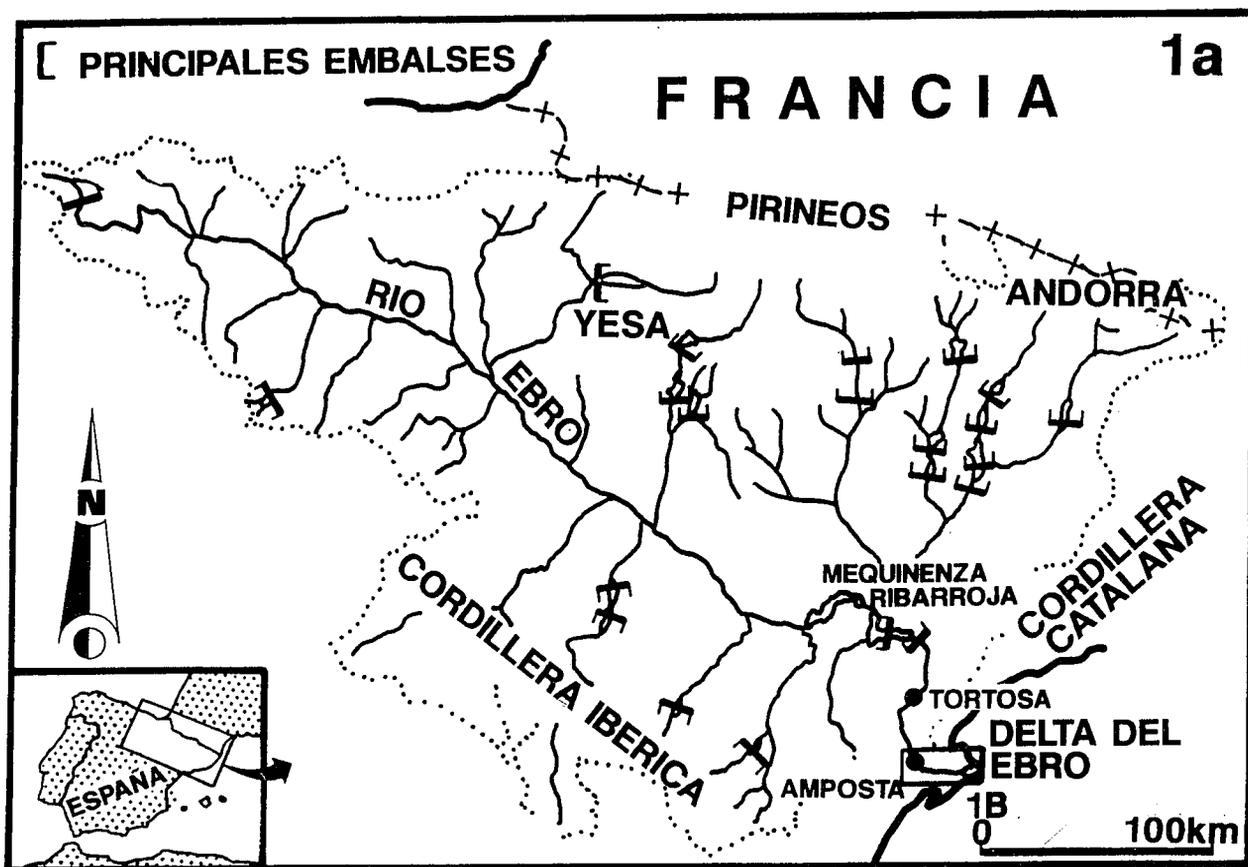


Fig. 1.- Situación del área de estudio. 1a) La cuenca hidrográfica del Ebro y sus principales embalses. La zona del recuadro corresponde a la Figura 1b. 1b) Situación de las secciones donde se tomaron las medidas.

Fig. 1.- Situation of the study area. 1a) Dams built in the Ebro river hydrographic basin. Area outlined by rectangle is the Figure 1b. 1b) Situation of the sections where field measures were taken.

del lecho del río con draga de cuchara. Las muestras de agua fueron filtradas siguiendo el método de Palanques *et al.* (1990b). El análisis textural de los sedimentos del lecho se realizó mediante tubo de sedimentación para la fracción más gruesa (>50 μm) y Sedigraph 5000D MICROMERITICS para la fracción fina (Giró y Maldonado, 1985).

**2.2. Ecuaciones empíricas**

La evaluación del transporte de fondo se ha reali-

zado también a partir de la selección de seis ecuaciones empíricas representativas de los tipos más utilizados en la bibliografía. El sedimento transportado como carga de fondo ( $Q_b$ ) en Kg/ms se calcula como sigue (ver el Anexo para una explicación más amplia de las ecuaciones y el Apéndice para el significado de los símbolos empleados):

- Meyer-Peter y Müller (1948)

$$Q_b = \delta u_*^3 \left[ 1 - \frac{0,047}{(\delta u_*^2 / (\delta_s - \delta) g D)} \right]^{3/2} \tag{1}$$

- Einstein (1942, 1950)

$$Q_b = (P/1-P) (1/A_*) [ [(\delta_s - \delta)gD]^3 / \delta ]^{1/2} \quad (2)$$

- Bagnold (1956, 1963) modificada por Sternberg (1972)

$$Q_b = k_1 \delta_s u_*^3 / d \quad (3)$$

- Yalin (1963, 1972)

$$Q_b = 0,635 \delta_s D u_* S [1 - ((aS)^{-1} \ln(1 + aS))] \quad (4)$$

- Ackers y White (1973)

$$Q_b = (X \delta g U h) / 1000 \quad (5)$$

- Van Rijn (1981, 1984)

$$Q_b = 0,053 \delta_s [dg]^{1/2} D^{1,5} T^{2,1} / D_*^{0,3} \quad (6)$$

### 3. RESULTADOS

Durante la campaña de Mayo las velocidades de la corriente a un metro sobre el fondo oscilan entre 0,5 y 0,6 m/s en Amposta y entre 0,45 y 0,54 m/s en Desembocadura. El sedimento del fondo en la sección Amposta presenta medias granulométricas que varían entre 0,429 mm en la parte central del cauce y 0,012 mm en el margen derecho, con un valor de 0,241 mm en el margen izquierdo. En la sección Desembocadura los sedimentos del lecho del río son más finos, con una media granulométrica de 0,085 mm en el perfil central e inferior a 0,008 mm en ambos márgenes. El material transportado en suspensión es de 11,5 kg/s en la sección Amposta y de 14,4 kg/s en Desembocadura (Camp y Guillén, 1988; Guillén y Palanques, 1992). En la campaña de Septiembre las velocidades de la corriente en Amposta a un metro sobre el fondo oscilan entre 0,16 y 0,19 m/s. Las medias granulométricas del sedimento se sitúan en 0,098 mm en el margen izquierdo y 0,031 mm en el derecho, siendo de 0,079 mm en el perfil central. El material transportado en suspensión es de 2,45 kg/s (Guillén y Camp, 1989).

En la campaña de Septiembre la intrusión aguas arriba de la cuña salina llega hasta la Isla de Gracia (Fig. 1B) (Guillén y Camp, 1989). En la sección Desembocadura el agua dulce discurre entre la superficie y los dos metros de profundidad, mientras que la cuña salina está situada entre los dos metros y el fondo (Guillén *et al.*, 1990; Guillén y Palanques, 1992), imposibilitando el transporte como carga de fondo en esta sección.

#### 3.1. Resultados obtenidos con la trampa de sedimentos

La cantidad de sedimento capturado por la trampa en las dos campañas está resumida en la Tabla 1. Durante la campaña de Mayo, en la sección Amposta

la trampa recogió sedimento en el perfil central (0,464 g/ms) y en el margen izquierdo (0,053 g/ms), con una media granulométrica de 0,291 y 0,158 mm respectivamente. En la sección Desembocadura, la trampa sólo recogió material en el perfil central (0,025 g/ms), con una media granulométrica de 0,262 mm.

En la campaña de Septiembre, en la sección Amposta se realizaron tres medidas sucesivas con la trampa de sedimentos en el perfil central (0,333; 0,03 y 0,003 g/ms), dos en el margen izquierdo con idéntico resultado (0,034 g/ms) y una medida en el margen derecho (0,001 g/ms). Las medias granulométricas de los sedimentos recogidos en la trampa fueron de 0,319-0,341 mm en el perfil central, de 0,259-0,264 mm en el margen izquierdo y de 0,221 mm en el margen derecho.

Si se extrapolan las medidas obtenidas con la trampa de sedimentos para todo el cauce del río, se obtiene que la cantidad máxima de sedimento transportado como carga de fondo en la sección Amposta fue de 31 g/s en la campaña de Mayo y de 9 g/s en Septiembre. En Desembocadura, el transporte en Mayo fue de 1 g/s. En relación al total de sedimento transportado (suspensión y carga de fondo) la carga de fondo representó en Amposta el 0,27% en Mayo y el 0,37% en Septiembre. En Desembocadura, la carga de fondo representó un porcentaje despreciable del total de sedimento transportado.

#### 3.2. Resultados de las ecuaciones empíricas

Con objeto de valorar las ecuaciones empíricas descritas anteriormente y comparar sus resultados con los de la trampa de sedimentos, se han hecho los cálculos correspondientes para los mismos casos en los que se tienen medidas con la trampa, utilizando los perfiles verticales de velocidad y los datos granulométricos de los sedimentos del lecho del río. Estos casos corresponden a la campaña de Mayo de 1988 (los tres perfiles de las secciones Amposta y Desembocadura) y a la Campaña de Septiembre de 1988 (los tres perfiles de la sección Amposta). Los resultados obtenidos con las diferentes ecuaciones para los nueve casos estudiados están resumidos en la Tabla 2.

	MAYO 1988	SEPTIEMBRE 1988
AMPOSTA		
centro	0,464	0,003 a 0,333
izquierdo	0,053	0,034
derecho	0	0,001
t o t a l (g/s)	31	9
DESEMBOCADURA		
centro	0,025	*
izquierdo	0	*
derecho	0	*
t o t a l (g/s)	1	0

Tabla 1.- Cantidad de material recogido con la trampa de sedimentos en g/ms en las dos campañas de medida efectuadas y total de sedimento transportado en la sección en g/s (\* = flujo con cuña salina).

Table 1.- Sediment collected by the sediment-trap (in g/ms) during the river cruises and total bedload sediment transport measured in the studied sections in g/s (\* = salt wedge intrusion).

Los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones empíricas difieren entre sí en más de un orden de magnitud. Las mayores tasas de transporte se presentan durante la campaña de Mayo de 1988 en el perfil izquierdo de Amposta y en el central de Desembocadura y el mínimo transporte se da en la campaña de Septiembre, donde la ecuación de Ackers y White prevee un transporte nulo en los tres perfiles (Tabla 2).

**4. DISCUSIÓN**

La media granulométrica de los materiales recogidos por la trampa de sedimentos oscila entre 0,158 y 0,344 mm, con un rango de variación mucho menor que el de los sedimentos del lecho del río (0,008 a 0,429 mm). Este hecho se explica porque el transporte como carga de fondo actúa de un modo selectivo y afecta básicamente a la fracción arena del sedimento:

- Si los sedimentos del lecho del río son arenas limpias bien seleccionadas, los materiales recogidos por la trampa son más finos (sección Amposta, campaña de Mayo).

- Cuando los sedimentos del lecho presentan mezcla de arena y fango, sólo la fracción arena es transportada como carga de fondo, por lo tanto los materiales recogidos por la trampa son más gruesos que los sedimentos del lecho (sección Desembocadura, campaña de Mayo; sección Amposta, campaña de Septiembre).

- En los casos donde el porcentaje de fango en los sedimentos es muy elevado la trampa no recoge material, indicando que el transporte como carga de fondo es nulo (márgenes izquierdo y derecho de la sección Desembocadura en la campaña de Mayo).

De estas situaciones se desprende que el transporte como carga de fondo tiene lugar sólo a través de las zonas del cauce donde hay arenas. Este comportamiento "a priori" razonable de la trampa de sedimentos se confirma también al comparar la tasa de sedimento transportado durante las dos campañas realizadas (Tabla I). La mayor cantidad de sedimento transportado como carga de fondo, medida en Amposta durante la campaña de Mayo (31 g/s), coincide con la máxima velocidad de la corriente y la máxima disponibilidad de sedimento tamaño arena. Durante esta misma campaña, la velocidad de la corriente en Desembocadura (0,5 m/s) era sólo algo inferior que en Amposta (0,55 m/s), sin embargo, el transporte de sedimentos era muy inferior en Desembocadura (1 g/s). Estas diferencias se explican por la existencia de sedimentos fangosos en Desembocadura, que dificultan el transporte como carga de fondo. Finalmente, la baja velocidad de la corriente en la campaña de Septiembre (0,18 m/s) corresponde con una cantidad de sedimento transportado como carga de fondo en la sección Amposta (9 g/s) menor que la obtenida en Mayo (31 g/s).

Los resultados obtenidos al aplicar las distintas ecuaciones empíricas de transporte con los parámetros medidos al instalar la trampa de sedimentos son casi

	E C U A C I O N E S						TRAMPA
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
<b>MAYO</b>							
Amposta							
central	36,1	0,4	33,2	4,21	6,72	5,43	0,46
izqdo.	104	69,3	544	104	14,4	47,4	0,05
dcho.	21,4	18,5	2,47	0	0	0,08	0
<b>Desembocadura</b>							
central	76,2	29,6	463	82,7	19,4	98,2	0,02
izqdo.	19,3	16,4	2,1	0	0	0,04	0
dcho.	27,7	18,9	2,6	0	0	0,01	0
<b>SEPTIEMBRE</b>							
Amposta							
central	0,9	0,04	0,2	0	0	0	0-0,3
izqdo.	37,1	8,5	186	33,4	0	0	0,03
dcho.	2,6	0	20	1	0	0,07	0,001

Tabla 2.- Comparación de los resultados obtenidos con las diferentes ecuaciones de transporte utilizadas y con la trampa de sedimentos (datos en g/ms) (1: Meyer-Peter y Müller; 2: Einstein; 3: Bagnold; 4: Yalin; 5: Ackers y White; 6: Van Rijn)

Table 2.- Comparison of the bedload transport estimated by equations and measured directly by the sediment-trap (in g/ms) (1: Meyer-Peter y Müller; 2: Einstein; 3: Bagnold; 4: Yalin; 5: Ackers y White; 6: Van Rijn)

siempre superiores a los medidos directamente con la trampa y difieren con éstos en más de dos órdenes de magnitud en algunos casos (Tabla 2). Estas diferencias se deben, en primer lugar, a que las ecuaciones están calibradas para rangos de tamaño de grano, velocidad y profundidad de flujo determinados y siempre considerando un sedimento homogéneo y muy bien clasificado. Las mayores diferencias entre la cantidad de material recogido por la trampa de sedimentos y el calculado empíricamente se dan cuando el sedimento del lecho del río es fino, ya que en la mayor parte de las ecuaciones el sedimento fino queda fuera de su rango de calibración. En otras situaciones donde las diferencias entre los resultados de la trampa y las ecuaciones también son importantes (perfil izquierdo de Amposta y central de Desembocadura en la campaña de Mayo) hay porcentajes elevados de material tamaño limo y arcilla en el sedimento del lecho del río (5 y 30% respectivamente).

En los casos en que la trampa no ha recogido sedimento siempre existe al menos una ecuación donde el transporte es cero (Tabla 2), indicando que se trata de unas condiciones críticas para el transporte. La Figura 2 muestra la variación de la capacidad de transporte calculada a partir de las seis ecuaciones en condiciones de velocidad estables y variando el tamaño de grano. Bajo estas condiciones, las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller (1) y Ackers y White (5) presentan una disminución en la capacidad de transporte en relación al aumento del tamaño de grano, dando el máximo transporte en el menor tamaño considerado (0,01 mm). En las cuatro ecuaciones restantes, la cantidad de material transportado se incrementa con el tamaño de grano hasta llegar a un tamaño crítico, a partir del cual el transporte empieza a disminuir. Sin embargo, de estas cuatro ecuaciones sólo dos, Yalin (4) y Van Rijn (6), presentan variaciones considerables con el aumento del tamaño de grano, con transporte cero o próximo a cero en los tamaños más finos y en los más gruesos.

Si consideramos tan sólo las dos ecuaciones que presentan mayor sensibilidad a las variaciones del tamaño de grano y calculamos el transporte en cada sección, se observa que con caudal alto (Mayo) el transporte disminuye a la mitad desde Amposta (9,37 kg/s) a la Desembocadura (5,43 kg/s) y, con caudal bajo (Septiembre), el transporte en Amposta sería diez veces menor (1,06 kg/s). Respecto al total de material transportado por el río Ebro (carga de fondo + suspensión), con caudal alto el transporte de carga de fondo representaría entre el 45 y el 27% en Amposta y Desembocadura respectivamente, mientras que con caudales bajos representaría el 30% del transporte total.

## 5. CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE COMO CARGA DE FONDO

El Ebro es actualmente un río fuertemente regulado por los embalses emplazados en su cuenca hidrográfica (Fig. 1A) y gran parte del sedimento transportado como carga de fondo no tiene ninguna posibilidad de superar dichos embalses (Palanques *et al.*, 1990a,b; Guillén y Palanques, 1992). La carga de fondo que actualmente podría llegar al mar procedería de la cuenca más baja del río no afectada por los embalses y que representa tan sólo el 2,75% de la cuenca hidrográfica del Ebro (Varela *et al.*, 1986). Esta cantidad podría ser significativa si tenemos en cuenta que los pequeños afluentes que desembocan en el curso bajo del río discurren por la Cordillera Litoral Catalana, que es una zona susceptible de proporcionar abundante material de tamaño arena y con pendientes relativamente pronunciadas que favorecen el transporte de sedimento (Fig. 1A).

Las condiciones de caudal extraordinariamente bajas que se han mantenido en el río Ebro desde Julio de 1988 hasta comienzos de 1991 (raramente se han superado los 300 m<sup>3</sup>/s) han impedido obtener suficientes datos como para permitir evaluar con métodos directos el transporte de carga de fondo para un período de tiempo representativo. Con caudales inferiores a 300 m<sup>3</sup>/s el curso bajo del río Ebro se comporta como un estuario, con el desarrollo de una cuña salina que puede penetrar más de 30 km río arriba (Guillén *et al.*, 1990; Guillén y Palanques, 1992). En el dominio de la cuña salina las corrientes son muy débiles (5-9 cm/s) y el lecho del río es recubierto por una capa de fangos. Bajo estas condiciones el transporte de arenas como carga de fondo es nulo (Guillén y Palanques, 1992).

Como primera aproximación al orden de magnitud del transporte como carga de fondo en el río Ebro se puede considerar la relación entre el sedimento transportado como carga de fondo y en suspensión. Para ríos con una relación de caudal/sedimento transportado en suspensión equiparable con la del río Ebro, la carga de fondo corresponde al 2-10% del transporte en suspensión (Emett, 1984). Con estas proporciones, si consideramos los datos históricos del río Ebro a partir de

los cuales se ha realizado la evolución de los aportes de sedimento en suspensión descargados al medio marino desde principios de siglo hasta la actualidad (Palanques *et al.*, 1990a,b; Guillén y Palanques, 1992), la carga de fondo estaría comprendida entre 400.000 y 2.000.000 de Tm/a a principios de siglo, antes de la construcción de la mayor parte de los embalses. A principios de los años sesenta, antes de la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja (Fig. 1A), el transporte como carga de fondo sería de 40.000 a 200.000 Tm/a. En la actualidad, el transporte como carga de fondo en el río Ebro oscilaría entre 1.600 y 33.000 Tm/a, calculado a partir de los datos correspondientes a las campañas de Mayo y Septiembre de 1988, pero sería inferior a las 15.000 Tm/a si consideramos las estimaciones anuales de material en suspensión realizadas durante los períodos 1983-86 y 1988-90 (Palanques *et al.*, 1990b; Guillén y Palanques, 1992).

Una valoración más detallada de los aportes como carga de fondo puede hacerse a partir de los aforos de caudal diarios de la estación de Tortosa existentes desde principios de siglo. Con ellos es posible calcular el transporte de fondo a partir de las ecuaciones empíricas si se aceptan algunas premisas:

- El caudal está relacionado directamente con la velocidad de la corriente. En el curso bajo del río Ebro, especialmente en la zona de la desembocadura, las variaciones del nivel del agua con los cambios del caudal son casi imperceptibles, inferiores a 0,5 m bajo las condiciones habituales. Con esta premisa, puede establecerse una sección constante de paso del flujo de agua y relacionar el caudal con la velocidad.

- El tamaño de grano medio de los sedimentos es constante. Los sedimentos del curso bajo del río Ebro están formados básicamente por dos fracciones texturales: la fracción arena, con una moda de 0,297 mm, y la fracción pelita, en la que es posible diferenciar varias poblaciones. Para valorar el transporte como carga de fondo sólo se ha tenido en cuenta la fracción arena, que está presente en todas las muestras, y se ha considerado un tamaño medio equivalente a su moda (0,297 mm).

Bajo estos supuestos se ha calculado el sedimento transportado como carga de fondo desde el año 1914 hasta la actualidad utilizando el valor medio de los resultados obtenidos con las ecuaciones de Yalin (4) y Van Rijn (6). El cálculo del sedimento transportado se ha hecho para cada año a partir del sumatorio del sedimento transportado cada mes, obtenido a partir de las medias mensuales de caudal (Fig. 3). Aunque la curva general del sedimento transportado como carga de fondo presenta múltiples oscilaciones, hay una clara tendencia a la disminución de los aportes en el transcurso del siglo.

Durante el período de 1914 a 1935 los aportes medios son aproximadamente 1.000.000 Tm/a, mientras que en el período de 1951 a 1980 los aportes medios se reducen casi a la mitad (600.000 Tm/a). Finalmente, durante la década de los 80 los aportes medios son de 100.000 Tm/a, un 10% de los sedimentos aportados du-

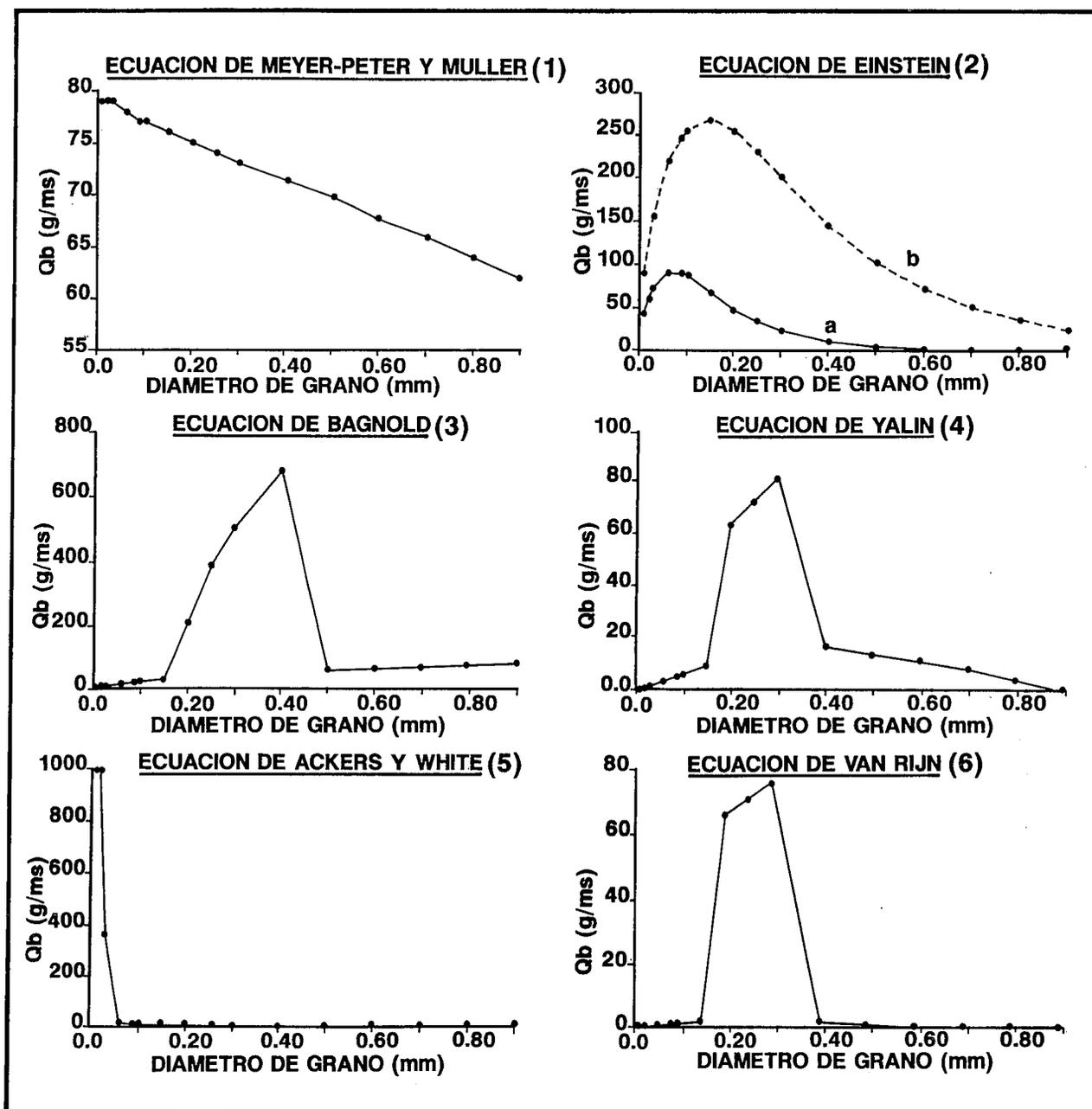


Fig. 2.-Variación de la capacidad de transporte con el incremento del tamaño de grano según las diferentes ecuaciones de transporte utilizadas (velocidad de la corriente= 1 m/s).

Fig. 2.-Variation of the bedload transport capacity in relation to the grain size increasing, according to different equations (flow velocity= 1 m/s).

rante el primer período del siglo. Esta reducción de los aportes sería debida tan sólo al descenso del caudal y a su regulación por los embalses. Durante el siglo XX los caudales del río Ebro disminuyen paulatinamente (Maldonado, 1972; Guillén y Palanques, 1992) provocando una pérdida de la capacidad de transporte del río. Además, la regulación del caudal por los embalses es otro factor importante a considerar, ya que esta regulación amortigua el caudal descargado durante situaciones de avenidas. En estos casos la reducción de los aportes es muy importante puesto que la cantidad de sedimento transportado es una función exponencial de

la velocidad (y del caudal) y la regulación de las avenidas por los embalses supone una merma considerable de la velocidad máxima de la corriente.

A todos estos efectos debe añadirse además la retención de sedimentos en los embalses contruidos a lo largo de la cuenca del Ebro. Debido a esta retención, que afecta especialmente a los sedimentos gruesos, los aportes de arenas al medio marino después de la construcción de las presas proceden mayoritariamente de la cuenca hidrográfica no regulada por las presas y de la propia erosión del cauce del río. Esta limitación de la cuenca hidrográfica, sólo el 2.75% de la cuenca del

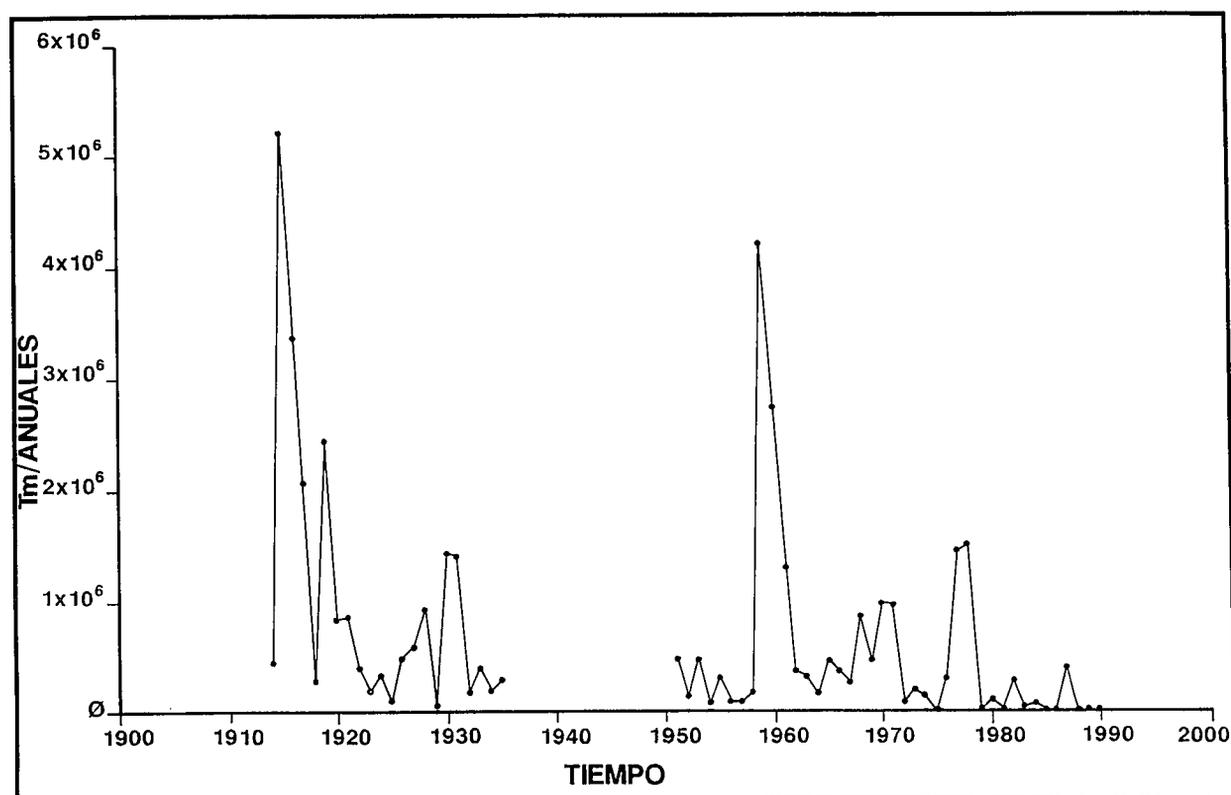


Fig. 3.-Variación de la tasa anual de sedimentos transportados como carga de fondo al medio marino durante el siglo XX a partir de las ecuaciones de Yalin y Van Rijn. Los datos de velocidad se han deducido de los caudales aforados en la estación de Tortosa.

Fig. 3.-Variation of the annual bedload sediment supply during the XX century according to equations of Yalin and Van Rijn. Flow velocity is deduced from water discharge data measured at the Tortosa station.

Ebro, plantea el problema de la disponibilidad de la suficiente cantidad de sedimentos tamaño arena en el curso bajo del río Ebro. La abundancia de afloramientos del sustrato en el curso bajo del cauce del río Ebro (Guillén *et al.*, 1989) indica un déficit en los sedimentos disponibles para el transporte. En todo caso, el efecto de la retención de sedimentos en los embalses hace que el transporte como carga de fondo sea inferior al calculado por las ecuaciones empíricas. Este es otro factor que explica las diferencias entre el transporte medido con la trampa de sedimentos y el calculado.

Si se comparan los aportes sedimentarios del río Ebro al medio marino durante la última década (100.000 Tm/a) con las 320.000 Tm/a de capacidad de transporte longitudinal calculadas para la zona litoral del delta del Ebro (Callís *et al.*, 1989), el proceso de erosión del delta del Ebro durante esta década puede explicarse por un déficit sedimentario de más de 2 millones de toneladas de sedimento, que sería superior si se considerase el efecto de retención de sedimento en las presas. En el transcurso del siglo actual se presentan otros períodos con un déficit sedimentario importante (Fig. 3): durante los años 1954 a 1958 y 1972 a 1976 los aportes de sedimentos transportados como carga de fondo fueron inferiores a 160.000 Tm/a. Esta distribución de los períodos con aportes sedimentarios mínimos coincide con los estudios realizados sobre la evolución reciente

del delta del Ebro, donde se pone de manifiesto que el proceso de erosión del delta se inició hacia la mitad del siglo actual y ha sido especialmente intenso en los últimos veinte años (Maldonado, 1986; Callís *et al.* 1989).

## 6. CONCLUSIONES

Para establecer el balance sedimentario en el delta del Ebro y poder interpretar su evolución reciente y futura es imprescindible conocer la cantidad de aportes que descarga el río en el mar. Si bien respecto al material en suspensión se dispone de datos suficientes para establecer una evaluación apropiada, apenas existen referencias respecto al transporte como carga de fondo. Se pone de manifiesto asimismo la necesidad de intensificar las medidas directas con caudales medios y altos y de utilizar diferentes técnicas para poder evaluar con precisión la cantidad de sedimentos transportados como carga de fondo que son aportados por el río Ebro al medio marino.

Ante el número insuficiente de medidas directas en condiciones de alta energía, la utilización de ecuaciones empíricas para calcular el transporte de fondo permite conocer su orden de magnitud y la variación a lo largo de este siglo. La evaluación efectuada utilizando las ecuaciones de Yalin (4) y Van Rijn (6) indica

que el transporte como carga de fondo durante el primer tercio del siglo sería del orden de 1.000.000 de Tm/a de sedimentos; en el período 1950-70, inferior a 730.000 Tm/a y en el período 1970-1990 de 300.000 Tm/a, siendo inferior a las 100.000 Tm/a el promedio durante la última década. Este importante descenso de los aportes sedimentarios calculados por las ecuaciones refleja tan solo el descenso del transporte de fondo debido a la regulación del caudal por las presas y a la disminución del caudal a lo largo del siglo. Estos resultados no contemplan los efectos de retención de sedimentos por parte de los embalses y los problemas relacionados con la disponibilidad de sedimento tamaño arena en el curso bajo del río. Por estos motivos, el descenso real de los aportes durante las últimas décadas debe ser superior al calculado.

Si se mantuvieran las condiciones de la década 1980-90, los sedimentos transportados como carga de fondo representarían menos del 10% de los aportados a principios de siglo, y el balance sedimentario con respecto al medio marino sería negativo en más de 200.000 Tm/a. Estas valoraciones concuerdan con el descenso de los aportes del material en suspensión a lo largo del siglo y con la aceleración del proceso erosivo del delta del Ebro observado a partir de los años setenta.

**AGRADECIMIENTOS**

Este estudio se ha realizado dentro del Convenio entre el Instituto de Ciencias del Mar del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya para el Proyecto de Investigación "Anàlisi i proposta de solucions per a estabilitzar el delta de l'Ebre", financiado por la Direcció General de Ports i Costas de la Generalitat de Catalunya.

Queremos agradecer a J. Camp su colaboración en las campañas y su orientación y aportaciones durante el presente estudio. Asimismo agradecemos a M. Farrán, T. Moya y J. Sapiña su asistencia en las campañas. Este artículo se ha beneficiado de la revisión efectuada por los Drs. B. Alonso, J. Baraza, A. Maldonado y J. Serra a quienes agradecemos su colaboración. El análisis textural ha sido realizado por N. Maestro y las figuras por J.M. Anguita.

**ANEXO**

Para la determinación de la velocidad de corte ( $u_*$ ) se ha utilizado la metodología propuesta por Van Rijn (1986) basada en la construcción del perfil logarítmico de velocidades a partir de los datos de campo, siguiendo la ecuación de la ley de velocidad logarítmica de Kármán-Prandl:

$$U(z) = A_1 \ln(z/h) + A_2;$$

donde

$$A_1 = u_*/k \quad \text{y} \quad A_2 = -(u_*/k)\ln(z_0/h);$$

siendo  $z_0 = 0,033k_s$  y  $k_s = 3D_{10}$  (Van Rijn, 1982). La determinación por regresión lineal de los parámetros  $A_1$  y  $A_2$  (Van Rijn, 1979) permite el cálculo de  $u_*$  y  $z_0$ .

En los casos donde no se disponía del perfil vertical de velocidades completo, la velocidad de corte se ha calculado según

$$u_* = k U(z)/\ln(30 z/k_s), \quad (\text{Van Den Berg, 1987}).$$

La ecuación de Meyer-Peter y Müller (1948) es una ecuación de fuerza tractiva que relaciona la tasa de transporte con el exceso de esfuerzo de corte. Los datos utilizados en su calibración corresponden a tamaños de grano de 0,4 a 30 mm y profundidades del flujo entre 1 y 120 cm. Puede expresarse en la forma:

$$Qb = \delta u_*^3 [1 - (0,047 / (\delta u_*^2 / ((\delta_s - \delta)gD))]^{3/2} \quad (1)$$

La ecuación de Einstein (1942, 1950) es una aproximación probabilística, en la que se asume que el movimiento de los granos se realiza mediante saltos discretos y que el lecho del río está formado por granos de idéntico tamaño y geometrías equivalentes y, por tanto, todos los granos tienen la misma longitud de salto cuando se ponen en movimiento. La ecuación puede escribirse como:

$$Qb = (P/1-P) (1/A_*) [((\delta_s - \delta)gD)^3 / \delta]^{1/2} \quad (2)$$

siendo:

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{(B^*\Gamma - 1/\cap \int_0^\Gamma e^{-t^2} dt \quad \text{y} \quad -B^*\Gamma + 1/\cap$$

$$\Gamma = g[(\delta_s - \delta)/\delta] D / u_*^2;$$

donde  $B_*$ ,  $A_*$  y  $\cap$  son coeficientes calculados por el autor. En este trabajo se toman los valores de Einstein (1950) en los que  $A_* = 43,5$  y  $B_* = 0,143$ , aunque con posterioridad Gadd *et al.* (1978) encuentran un mejor ajuste con  $A_* = 60,0$  y  $B_* = 0,07$ , en ambos casos con  $\cap = 0,5$ .

La ecuación de Bagnold (1956, 1963) está basada en criterios de balance de energía y equilibrio mecánico. La ecuación de Bagnold modificada por Sternberg (1972) queda en la forma

$$Qb = k_1 \delta_s u_*^3 / d g \quad (3)$$

siendo  $d = (\delta_s - \delta)/\delta$  y  $k_1$  un coeficiente que varía con el tamaño de grano y con el exceso de esfuerzo de corte. Se han utilizado los valores de  $k_1$  calculados a partir de las ecuaciones de Yang (1986).

La ecuación de Yalin (1963, 1972) está desarrollada para características medias del flujo. Interpreta el transporte como el producto entre el peso del material granular que se mueve por unidad de superficie del lecho móvil y la velocidad de dicho movimiento. La ecuación es:

$$Q_b = 0,635 \delta_s D u_* S [1 - ((aS)^{-1} \ln(1 + aS))] \quad (4)$$

donde

$$S = (u_*^2 / u_{*cr}^2) - 1; \quad y$$

$$a = 2,45 (\delta / \delta_s)^{0,4} [\delta u_{*cr}^2 / (\delta_s - \delta) g D]^{1/2}$$

El cálculo de  $u_{*cr}$  se ha realizado a partir de la aproximación analítica de la curva de Shields (1936) realizada por Van Rijn (1984).

La ecuación de Ackers y White (1973) considera el tamaño del sedimento, su movilidad y la capacidad de transporte del medio. Su calibración se efectuó a partir de ensayos de laboratorio a flujo constante, con profundidad hasta 0,4 m y tamaño de grano superior a 0,04 mm. El transporte (X) en unidades C.G.S. se obtiene en partes por millón de peso de sedimento con respecto al peso del flujo del fluido:

$$X = (G_* (\delta_s / \delta) D) / (h (u_* / U)^n);$$

siendo  $G_* = C [(F_* / A)^{-1}]^m$  y A, n, m y C coeficientes dependientes de  $D_*$  ( $D_* = D (g / \mu)^{1/3}$ ). La movilidad del sedimento ( $F_*$ ) queda definida como

$$F_* = [u_*^n / (g D (d)^{1/2})] [U / (\sqrt{32 \log(\alpha h / D)})]^{1-n};$$

siendo  $\alpha$  un coeficiente de valor próximo a 10.

Para obtener el sedimento transportado en kg/ms

$$Q_b = (X \delta g U h) / 1000 \quad (5)$$

En la ecuación de Van Rijn (1981, 1984) el transporte se calcula como el producto de dos funciones derivadas independientemente, que describen la altura de saltación, la velocidad de la partícula y la concentración. El transporte como carga de fondo en Kg/ms se expresa como:

$$Q_b = 0,053 \delta_s [d g]^{1/2} D^{1,5} T^{2,1} / D_*^{0,3} \quad (6)$$

siendo  $T = (u_*'^2 / u_{*cr}^2) / u_{*cr}^2$ ;  $u_*' = (g^{1/2} / C') U$ ; donde  $C' = 18 \log(12 h / k_s)$ .

## APENDICE: Simbología utilizada

A: coeficiente

A<sub>1</sub>: coeficiente

A<sub>2</sub>: coeficiente

A<sub>\*</sub>: coeficiente

B<sub>\*</sub>: coeficiente

C: coeficiente

C': coeficiente de Chézy relacionado con los granos

D: mediana de la distribución granulométrica

D<sub>10</sub>: tamaño que separa el 10% de los granos más gruesos de la distribución

D<sub>\*</sub>: función de tamaño del sedimento

d: densidad específica

F: función de intensidad del flujo

F<sub>\*</sub>: función de movilidad del sedimento

G<sub>\*</sub>: función adimensional de transporte

g: aceleración de la gravedad

h: profundidad del cauce

k: constante de Von Karman (=0,4)

k<sub>i</sub>: coeficiente

k<sub>s</sub>: rugosidad equivalente de Nikuradse

m: coeficiente

n: coeficiente

P: probabilidad de transporte

Q<sub>b</sub>: sedimento transportado como carga de fondo

T: parámetro de estado de transporte

U: velocidad media del flujo

u<sub>\*</sub>: velocidad de corte

U<sub>(z)</sub>: velocidad a una distancia z sobre el fondo

u<sub>\*cr</sub>: velocidad de corte crítica

u'<sub>\*</sub>: velocidad de corte relacionada con los granos

X: sedimento transportado (en ppm)

z: distancia sobre el fondo

z<sub>0</sub>: nivel de velocidad cero sobre el fondo

α: coeficiente

δ: densidad del fluido

δ<sub>s</sub>: densidad del sedimento

∩: coeficiente

μ: viscosidad cinemática del fluido

Γ: función de intensidad de flujo

## BIBLIOGRAFÍA

Ackers, P. y White, W.R. (1973): Sediment Transport: New Approach and Analysis. *J. Hydraulics Division*, November 1973: 2041-2060.

Bagnold, R.A. (1956): The flow of cohesionless grains in fluids. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A, 249, N.º 964: 235-297.

Bagnold, R.A. (1963): Beach and nearshore processes, I: mechanics of marine sedimentation. In: *The Sea* (M.N. Hill, ed.), Wiley, New York, 507-549.

Bagnold, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics. *Prof. Pap. U.S. Geol. Surv.*, 422-I.

Callís, L.M., Sánchez-Arcilla, A., García, M., Monsó, J.L., Collado, F., Alvarez, E. y Lo Presti, A. (1989): Análisis i proposta de solucions per a estabilitzar el Delta del l'Ebre: Estudi Morfològic. *Lab. Ing. Marítima*, Univ. Politec. Catalunya (inédito): 240 p.

Camp, J. y Guillén, J. (1988): Resultados preliminares de la campaña Ebro 88-I. *Inst. Cienc. Mar, CSIC*, Barcelona, (inédito): 22 p.

Direcció General de Ports i Costas (1985): Estudi d'infraestructura portuaria del tram inferior del riu Ebre. Resum General. *Generalitat de Catalunya. Servei de Ports*: 55p.

Emmett, W.W. (1981): Measurement of bed load in rivers. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Proc. Florence

- Symp., IAHS Publ. 133: 3-15.
- Emmett, W.W. (1984): Measurement of bedload in rivers. In: *Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modelling* (R.F. Hadley and D.E. Walling, eds.). Geo Books, University Press, Cambridge, England: 91-109.
- Einstein, H.A. (1937): The calibration of the bedload trap used in the Rhine. *Schweizerische Bauzeitung*, 110: 29-32.
- Einstein, H.A. (1942): Formulae for the transportation of bed load. *Trans. A.S.C.E.*: 107 p.
- Einstein, H.A. (1950): The bedload function for sediment transportation in open channels flows. *U.S. Dept. Agric. Soil Conserv. Ser., Tech. Bull.*, 1026: 1-71.
- Gadd, P.E., Lavelle, J.W. y Swift, D.J. (1978): Estimates of sand transport on the New York Shelf using nearbottom current meter observations. *Jour. Sedim. Petrol.*, 48: 239-252.
- Giró, S. y Maldonado, A. (1985): Análisis granulométrico por métodos automáticos: Tubo de sedimentación y sedigraph. *Acta. Geol. Hisp.*, 20: 95-102.
- Gómez, B., Naff, R. y Hubbel, D.W. (1989): Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms. *Earth Surface Proc. and Landforms*, 14: 135-156.
- Guillén, J. y Camp, J. (1989): Resultados preliminares de la campaña realizada en el río Ebro en Septiembre de 1988. *Inst. Cienc. Mar, CSIC, Barcelona* (inédito): 19 p.
- Guillén, J., Camp, J., Díaz, J.I., Farrán, M. y Maldonado, A. (1989): Hydrodynamics and bed configurations in the lower Ebro River. *4th Inter. Conf. on Fluvial Sedimentology*, Sitges, Octubre 1989: 143.
- Guillén, J., Palanques, A., Camp, J. y Díaz, J.I. (1990): Microtidal influence in the Ebro river salt wedge (Northwestern Mediterranean). *XXXII Ind Congres and Plenary assembly of I.C.S.E.M.*, Perpignan, Francia: 85.
- Guillén, J. y Palanques, A. (1992): Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology* (en prensa).
- Leeder, M.R. (1979): Bed load dynamics: grain-grain interactions in water flows. *Earth Surf. Processes*, 4: 229-240.
- Leeder, M.R. (1982): *Sedimentology, Process and Product*. Allen and Unwin, London: 344 p.
- Maldonado, A. (1972): El Delta del Ebro. Estudio Sedimentológico y Estratigráfico. *Bol. Estratigrafía*, Universidad de Barcelona: 1-486.
- Maldonado, A. (1986): Dinámica Sedimentaria y evolución litoral reciente del Delta del Ebro. In: *Sistema integrado del Ebro: Cuenca, Delta y Medio Marino* (M.G. Mariño, ed.). Gráficas Hermes, Madrid: 33-60.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948): Formulas for bed load transport. *Proc. 2nd Congr. IAHR*, Sweden, 2: 39-64.
- Middleton, G.V. (1976): Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Jour. Geology*, 84: 405-426.
- Middleton, G.V. y Southard, J.B. (1984): Mechanics of sediment movement. *S.E.P.M. Short Course number 3*, 2nd Ed., Providence, E.E.U.U.: 401 p.
- Moss, A.J. (1972): Bed-load sediments. *Sedimentology*, 18: 159-219.
- Palanques, A. (1987): *Dinámica sedimentaria mineralógica y microcontaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro*. Tesis Univ. Politécnica de Cataluña, 475 p.
- Palanques, A., Guillén, J. y Camp, J. (1990a): The effects of damming on sediment and water discharge of the Ebro River into the Mediterranean Sea. *XXXII Ind Congres and Plenary assembly of I.C.S.E.M.*, Perpignan, Francia: 86.
- Palanques, A., Plana, F. y Maldonado, A. (1990b): Recent influence of man on Ebro margin sedimentation system (Northwestern Mediterranean Sea). *Mar. Geol.*, 95: 247-263.
- Richards, K. (1985): *Rivers. Form and process in alluvial channels*. Methuen, London, Reprint with revisions: 361 p.
- Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990): Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta (Tarragona, España). *Geogaceta*, 8: 107-109.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Berlin, Mitteilungen, V. 26: 26 p.
- Singhal, H.S.S., Joshi, G.C. y Verma, R.S. (1981): Sediment sampling in rivers and canals. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Proc. Florence Symp., IAHS Publ. 133: 169-175.
- Sternberg, R.W. (1972): Prediction of initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environment. In: *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern* (J.P. Swift, Duane y O.H. Pilkey, eds.). Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg: 61-82.
- Van Den Berg, J.H. (1987): Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments. *Sedimentology*, 34: 681-698.
- Van Rijn, L.C. (1979): *SUDATA, Computer Program for Sediment Transport Measurements (in Dutch)*. Delft Hydraulics Laboratory, Report R1267-1, Delft, The Netherlands.
- Van Rijn, L.C. (1981): *Computation of bed-load concentration and bed-load transport*. Delft Hydraulics Laboratory Research Report S487-L, Delft, The Netherlands: 43 p.
- Van Rijn, L.C. (1982): Equivalent roughness of alluvial bed. *Jour. Hydraul. Div. Am. Soc. civ. Engrs.*, HY 10: 1215-1218.
- Van Rijn, L.C. (1984): Sediment transport, part I: bed-load transport. *J. Hydraul. Engng.*, 110: 1431-1456.
- Van Rijn, L.C. (1986): *Manual sediment transport measurements*. Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands: 217 p.
- Varela, J.M., Gallardo, A. y López de Velasco, A. (1986): Retención de sólidos por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al Delta del Ebro. In: *Sistema integrado del Ebro: Cuenca, Delta y Medio Marino*, (M.G. Mariño, ed.). Gráficas Hermes, Madrid: 203-219.
- Verdaguer, A., Serra, J. y Canals, M. (1985): L'interaction fluviale et marine dans le cours inferieur de l'Ebre: consequences sedimentologiques. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 29 (2): 185-187.
- Walling, D.E. y Webb, B.W. (1981): The reliability of suspended sediment load data. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Proc. Florence Symp., IAHS Publ. 133: 177-194.
- Ward, P.R.B. (1984): Measurement of sediment yield. In: *Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modelling*, (R.F. Hadley and D.E. Walling, eds.). Geo Books, University Press, Cambridge, England: 37-70.
- Yalin, M.S. (1963): An expression for bed-load transportation. *Proc. A.S.C.E.* 89, HY3.
- Yalin, M.S. (1972): *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, New York: 298 p.
- Yang, C.S. (1986): On Bagnold's sediment transport equation in tidal marine environments and the practical definition of bedload. *Sedimentology*, 33: 465-486.

Recibido el 9 de agosto de 1991  
Aceptado el 6 de noviembre de 1991