



BALANCE SEDIMENTARIO EN EL TRAMO BAJO DE UN RÍO MEDITERRÁNEO (LA TORDERA, CORDILLERAS COSTERAS CATALANAS)

*Sediment budget in the lower course of a Mediterranean River
(La Tordera, Catalan Coastal Ranges)*

Rovira, A.⁽¹⁾, Batalla, R. J.⁽¹⁾ y Sala, M.⁽²⁾

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

*(2) Departament de Geografia Física, Universitat de Barcelona
Baldiri i Reixac s/n, 08028 Barcelona*

E-mail: albertrovira@hotmail.com

Resumen: El objetivo de este trabajo es establecer el balance sedimentario del tramo bajo de la Tordera (894 km², Cordilleras Costeras Catalanas) a partir de mediciones directas de transporte de sedimento y del control de la topografía del cauce, en un tramo de 11 km de longitud. Para el período de estudio (1997-1999), el tránsito medio anual de sedimento a la entrada del tramo analizado fue de 30.000 toneladas, el 60% como carga de fondo y el 40% restante en suspensión. A la salida, la exportación media anual de material fue de 21.500 toneladas, el 65% como carga de fondo y el 35% en suspensión. Los resultados indican una acumulación media anual de 8.500 toneladas de sedimento (4,5 mm/a). Este proceso se produce en los años en que el río presenta un régimen perenne en las secciones superiores y un régimen estacional en las secciones inferiores, sector por donde las crecidas no llegan a circular.

Palabras clave: balance sedimentario, bimodalidad hidrológica, carga de fondo, crecidas y sedimentación.

Abstract: The objective of this study is to assess the sediment budget of the Lower Tordera River (894 km², Catalan Coastal Ranges) by means of sediment transport measurements and geodetic surveys through an 11 km river channel reach. Study period (1997-1999) was relatively dry compared to the mean annual water yield. Mean annual transfer of sediment in the upper section of the fluvial system was 30,000 tonnes, 60% of which transported as bedload and the rest in suspension. At the river outlet, mean annual sediment exportation was 21,500 tonnes, 65% of which moved as bedload and 35% in suspension. Results indicate that river is experiencing a phase of aggradation. This process is more intensive during years having a permanent fluvial regime in the upper reaches and an ephemeral regime in the lower sections. During such years most floods do not reach the lower end of the river and, therefore, sediment does not. Mean accumulation of sediment is 8,500 tonnes per year, especially around the area affected by gravel mining between 1960 and 1980.

Keywords: sediment budget, bimodal fluvial regime, bedload, river aggradation.



A. Rovira, R. J. Batalla y M. Sala (2004) Balance sedimentario en el tramo bajo de un río mediterráneo (La Tordera, cordilleras costeras catalanas). *Rev. C. & G.*, 18 (1-2), 51-65.

1. Introducción

El balance sedimentario de una cuenca de drenaje es la simplificación conceptual de la interac-

ción entre los procesos geomorfológicos que transfieren el sedimento fuera de la cuenca a partir de la meteorización de la roca y el desplazamiento a lo largo de las vertientes y de la red de drenaje

(Dietrich y Dunne, 1978). La ecuación básica del balance sedimentario es:

$$I \pm S = O$$

donde I equivale a la entrada de sedimento, S es el cambio en el almacenaje de sedimento y, O es la salida de sedimento.

En función de los objetivos y de las características del área de estudio, los balances sedimentarios pueden mostrar diferencias significativas según se ponga el acento en uno u otro proceso hidrogeomorfológico. De esta manera, un balance sedimentario puede ser construido para cualquiera de los pasos en la producción, transporte y exportación de sedimento en una cuenca, así como para su conjunto o para una sección o subsistema de ésta, como por ejemplo la red de drenaje o un tramo fluvial.

Desde los años sesenta del siglo XX varios autores han desarrollado y aplicado la idea del balance sedimentario en cuencas en relación, por ejemplo, al estudio de los episodios de alta magnitud y baja frecuencia (Rapp 1960, Schick 1977), o al análisis de la eficiencia de los procesos actuantes y su relación con la evolución de las formas del relieve (Slaymaker, 1972). Sin embargo, los primeros autores en aplicar de manera global y sistemática el concepto de balance sedimentario en el ámbito de una cuenca fueron Dietrich y Dunne (1978), con la finalidad de identificar y cuantificar los procesos geomorfológicos elementales en una cuenca de la costa de Oregón. Desde entonces se han realizado numerosos trabajos en esta línea, entre los que destacan los trabajos de Lehre (1982), Reid y Dunne (1984), Roberts y Church (1986), Schick y Lekach (1993), y Batalla *et al.* (1995). Al nivel de sección o subsistema fluvial, cabe nombrar los balances sedimentarios realizados por Moore y Newson (1986), Kesel *et al.* (1992), y McLean y Church (1999).

El objetivo de este trabajo es la elaboración de un balance sedimentario en el curso bajo de un río mediterráneo (la Tordera). En la elaboración del balance se ha puesto el énfasis en el estudio de:

- a) El control y análisis del transporte del sedimento en dos secciones fluviales representativas del comportamiento hidrológico del río.
- b) El estudio de la topografía del lecho y su evolución desde la óptica del balance sedimentario y de los procesos de erosión y sedimentación que se producen en el cauce.

2. El área de estudio

2.1. La cuenca de la Tordera

La cuenca de la Tordera, con un área de drenaje de 894 km², se localiza al NE de las Cordilleras Costeras Catalanas (Fig. 1). Comprende parte de los macizos del Montseny y de las Guillerries en su vertiente septentrional, y parte de los macizos del Montnegre y Blanes en su vertiente meridional. Entre estos se extiende la fosa del Vallès. Las principales alturas de la cuenca corresponden al Turó de l'Home, con 1712 m s.n.m. en el macizo del Montseny. El 57% de la superficie de la cuenca está compuesta por rocas plutónicas (granodiorita, leucogranitos y granito diorítico). Destaca el afloramiento metamórfico en la mitad meridional del macizo del Montseny formado básicamente por esquistos, gneis y calcáreas metamorfozadas. Las rocas sedimentarias se localizan en el fondo de la depresión y constan de materiales detríticos en los que abundan las arcosas y los conglomerados que se alternan con lentejones de arcillas.

El clima de la cuenca de la Tordera puede ser clasificado como Mediterráneo subhúmedo de carácter marítimo (Sala, 1979). Las precipitaciones van desde los 1000 mm en los sectores de montaña a los 600 mm en la costa. Las temperaturas presentan un valor medio de 6,7°C en el Turó de l'Home con 0°C de valor medio en enero y 14,8°C en julio (Sala, 1979). La aportación hídrica media anual para el periodo 1967-1987 es de 178 hm³ en la Estación de aforos de Can Serra (802 km²), situada en la parte baja de la cuenca. La aportación específica de agua en este sector es de 7 l/s·km². La población se concentra mayoritariamente a los pies del macizo del Montseny y en la llanura aluvial.

2.2. La parte baja de la Tordera

El sector de estudio comprende el tramo bajo del río Tordera que va desde la estación de aforos de Fogars hasta el puente de la carretera B682 a la altura de la población de Blanes, cercana a su desembocadura en el Mediterráneo (Fig. 1). La longitud del tramo estudiado es de 11 km. En este tramo el río pasa de tener un régimen perenne, con un flujo de agua y sedimento casi continuo, a un régimen estacional, con muchos momentos del año

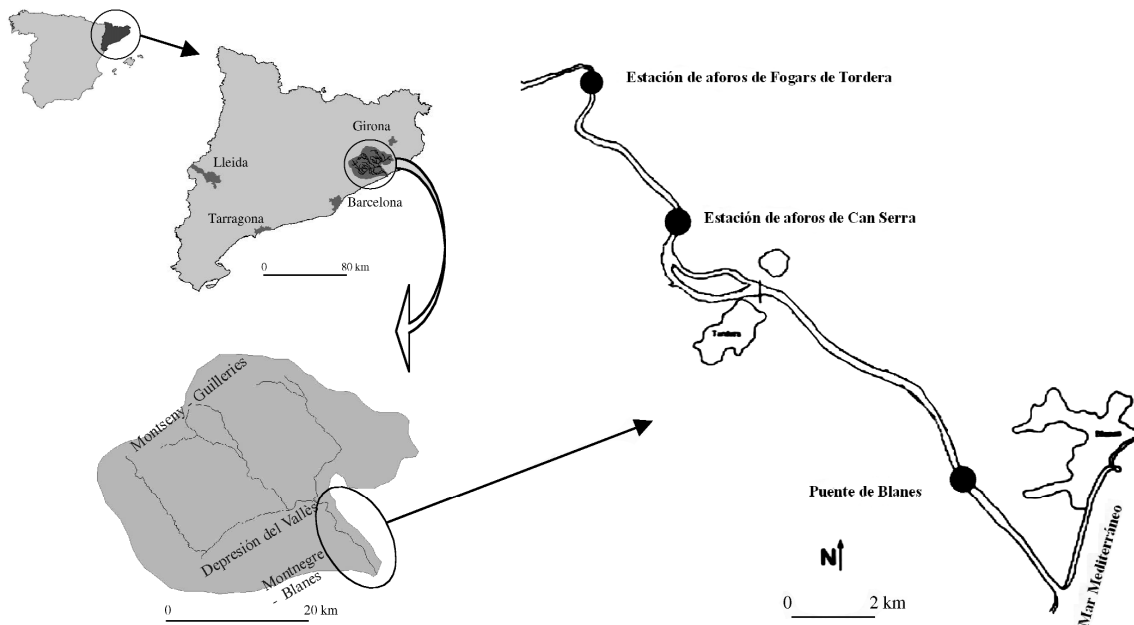


Figura 1. Localización de la cuenca de la Tordera y del tramo de estudio.
 Figure 1. Location of the Tordera basin and the study reach.

sin circulación de agua superficial y sedimento. Así mismo, a lo largo del tramo de estudio el río no recibe ningún afluente que aporte agua y sedimento de manera significativa.

La aportación hídrica total a la entrada del sistema fluvial para el periodo 1997-99 ha sido de 184 hm³, con una aportación media de 73,6 hm³/a, valor que está muy por debajo de la aportación media de la cuenca (178 hm³/a). El periodo de estudio se puede calificar de seco. Las entradas de agua en el sistema fueron de 100 hm³ el año 1997, 50 hm³ el año 1998, y 32 hm³ para los primeros seis meses del año 1999. La variabilidad de las aportaciones hídricas anuales está relacionada con el número y la magnitud de las crecidas que se producen a lo largo del año (Tabla 1). La estación que presenta una mayor aportación de agua en la entrada del sistema es el invierno, con un 65% del volumen total anual. Contrariamente, en verano la entrada de agua por la sección superior del tramo analizado es muy baja (3%). Durante esta estación se producen crecidas de pequeña y moderada magnitud y frecuencia que no tienen salida de la cuenca.

La variabilidad mensual del caudal del río es importante (coeficiente de variación de 0,6), sien-

do enero el mes con el caudal medio más alto (9,1 m³/s). El análisis de la serie de caudales diarios para el periodo de estudio indica una circulación constante de agua en la entrada del sistema en el que un caudal de 5,4 m³/s es igualado o superado en un 10% del tiempo. El caudal medio anual para el periodo de estudio es de 2,1 m³/s con un caudal medio específico de 2,7 l/s·km².

La aportación hídrica total del periodo de estudio 1997-1999 a la altura de la población de Blanes cerca de la desembocadura (sección inferior del tramo), ha sido de 156 hm³, con una aportación

Tabla 1. Características hidrológicas del período de estudio en la sección fluvial inicial (Fogars de Tordera).
 Table 1. Hydrological trends of the study period at the upper river section (Fogars de Tordera).

Año	Crecidas	Qci (m ³ s ⁻¹)	% Aportación hídrica anual
1997	5	16-94	66
1998	4	11-30	60
1999*	2	18-19	41

* El año 1999 comprende los primeros 6 meses

hídrica media de 62,4 hm³/a. Por años, la aportación hídrica fue de 117 hm³ en 1997, de 23 hm³ en 1998, y de 16 hm³ en los primeros seis meses de 1999. El caudal medio anual para el periodo de estudio es de 1,9 m³/s, con un caudal medio específico de 2,2 l/s·km². Por esta sección la circulación de agua a finales de la primavera y en los meses de verano es nula ya que las crecidas no llegan a la parte baja de la cuenca. En otoño la entrada de agua en el sistema aumenta, activándose la recarga desde el cauce. A finales de esta estación la recarga ya es importante y da lugar de nuevo a una circulación permanente de agua entre las dos secciones del tramo fluvial.

Los datos de la aportación hídrica anual en ambos extremos del tramo de estudio han puesto de manifiesto que: 1) durante 1997 se produjo una circulación de agua casi constante a lo largo de este sector ya que los valores obtenidos a la entrada y salida del sistema fueron similares (100 hm³ y 116 hm³, respectivamente); 2) por el contrario en 1998 y durante los primeros 6 meses de 1999 los valores obtenidos entre ambas secciones son bastante dispares: en 1998 se registraron 51 hm³ a la entrada y 23 hm³ a la salida y en el primer semestre de 1999 circularon 33 hm³ por la sección superior y 16 hm³ por la sección inferior del tramo fluvial. Existió, por tanto, una circulación constante de agua, que dio lugar a un régimen hidrológico perenne en la entrada del sistema, mientras que en el tramo final la circulación de agua solamente se produjo en determinados momentos del año, dando lugar a un régimen hidrológico efímero. En consecuencia se produce una bimodalidad hidrológica a lo largo del cauce, con repercusiones importantes en el tránsito y acumulación de sedimento.

El lecho del río está compuesto mayoritariamente de arena gruesa y grava fina (60%) aunque existe una progresiva reducción del tamaño de las partículas aguas abajo. Se pasa de un 29% de arena a la entrada del sistema y un tamaño medio (D₅₀)

del material superficial de 4,5 mm, a un 47% de arena en la parte inferior del área de estudio y un tamaño medio de las partículas (D₅₀) de 2,3 mm. El material está muy poco clasificado con valores de dispersión $[(D_{84}-D_{16})/4+(D_{95}-D_5)/6,6]$ (Folk y Ward, 1957) de 7 y 5 en el inicio y el final del tramo fluvial, respectivamente.

A partir de los años 60 se llevó a término la canalización y estabilización de los márgenes del canal en este tramo, así como la extracción de un mínimo de 2.000.000 m³ de sedimento del lecho del río (Agència Catalana de l'Aigua, comunicación personal) en su última fase (1970 – 1987), destinados a la elaboración de áridos para construcción. A raíz de ello se activó un proceso de encajamiento del lecho (de hasta 4 metros en algunas secciones) con la consecuente desconexión entre el canal y la llanura aluvial en la parte baja de la cuenca. Las repercusiones sobre las aguas subterráneas y la estabilidad de puentes fueron notables y son visibles aún en la actualidad.

3. Metodología

La investigación se ha estructurado siguiendo un modelo de caja gris, a través del control de las entradas y salidas del sistema (Tabla 2), y mediante la observación de la evolución del lecho del río. Los niveles del agua y los hidrogramas de crecida registrados en la sección superior del tramo de estudio (Estación de aforo de Fogars de Tordera) fueron proporcionados por la Agència Catalana de l'Aigua. Los hidrogramas de las crecidas que salieron de la cuenca se obtuvieron mediante el método de tránsito de avenidas de Muskingum (sistema agregado) (Mc Carthy, 1938). Los caudales obtenidos por este método fueron validados con medidas directas tomadas durante las crecidas registradas en la Estación de control de Blanes (Tabla 3).

Tabla 2. Procesos fluviales medidos en las secciones de entrada y salida del tramo estudiado.
Table 2. Fluvial processes monitored at the upper and lower sections of the river reach.

Sección de control	Caudales bajos	Crecidas
Aguas arriba (Fogars de Tordera)	Q, SS y CF*	SS
Aguas abajo (Puente de Blanes)	†	Q, SS y CF

* Q (Caudal), SS (sedimento en Suspensión) y CF (Carga de Fondo)
† sólo circula agua durante crecidas

Tabla 3. Valores teóricos del hidrograma transitado mediante el método de Muskingum (1934) y del caudal real medido en la sección de control del Puente de Blanes durante las crecidas del día 27/1/98 y 11/1/99.

Table 3. Routed flood hydrograph and observed discharges at the monitoring section of the Blanes Bridge for the 27.1.98 and 11.1.99 flood events.

Crecida 27/1/98			
Día	Hora	Caudal Observado	Caudal Teórico
28/1/98	14:00	20,6	21,1
29/1/98	13:00	19,3	20,4
30/1/98	14:00	11,3	13,3
3/1/98	12:00	9,1	7,7
Crecida 11/1/99			
Día	Hora	Caudal Observado	Caudal Teórico
15/1/99	12:00	5,5	5,9
22/1/99	13:00	6,5	6,6

El nivel de caudal lleno o *bankfull* se definió en distintos puntos del tramo inicial de estudio, donde el río es perenne y presenta un cauce unicanal bien definido. Su delimitación se estableció especialmente a partir de evidencias físicas de campo en las secciones topográficas tales como la elevación del escalón más bajo (Schumm 1960, Bray 1972) y/o la elevación del escalón más prominente (Kilpatrick y Barnes, 1964). Este nivel marcaba un caudal pico de 80 m³/s con un período de retorno que oscilaba entre 1,2 y 1,4 años. Aguas abajo del pueblo de Tordera el río tiene un carácter efímero y una morfología trenzada, por lo que se desestimó definir el nivel de cauce lleno basado en la topografía del canal.

El control del sedimento se llevó a cabo mediante la recogida de muestras semanales y durante episodios de crecida en dos secciones del canal: a la entrada del sistema (Estación de aforos de Fogars de Tordera) y a la salida de éste (Sección de control de Blanes). Las muestras de sedimento en suspensión fueron tomadas mediante un muestreador de integración en profundidad US DH48 y un muestreador automático de agua y sedimento ISCO 3200. A la entrada del sistema, la toma de muestras semanales se realizó en el centro del canal de aguas bajas de la Estación de aforos, a la altura de la escala limnimétrica. Para los episodios de crecida, la toma de succión del muestreador automático se instaló a 30 cm sobre la superficie del lecho del río aprovechando la infraestructura del pozo de aguas tranquilizadoras. En este caso, las muestras eran tomadas a intervalos horarios. A la salida del sistema, la toma de muestras se esta-

bleció en 4 puntos del canal, separados 20 metros entre sí, con el fin de obtener la concentración media del sedimento transportado en suspensión a lo ancho de la sección. Cada punto de muestreo se correspondía con el centro de cada uno de los ojos del puente.

La separación entre caudales menores y episodios de crecida se realizó sobre la base de criterios morfológicos y sedimentológicos. Sobre la base de criterios morfológicos se entendía por episodio de crecida cuando se producía un incremento significativo de caudal en el que nivel del agua superaba el lecho menor del cauce. Desde el punto de vista sedimentológico se entendía por episodio de crecida cuando el incremento de caudal conllevaba un aumento del transporte de sedimento.

El muestreo de la carga de fondo se llevó a cabo mediante dos muestreadores Helley-Smith. Para el muestreo semanal y la recesión de crecidas se utilizó un muestreador de tipo manual de 15 kg de capacidad y 76 mm de boca. A la entrada del sistema el muestreo semanal consistía en la toma de dos muestras consecutivas del material transportado como carga de fondo. El tiempo de muestreo era de 5 minutos. El muestreo se realizó siempre en el mismo punto situado en el centro del canal de aguas bajas, a la altura de la escala limnimétrica. A la salida de la cuenca y para los episodios de crecida se utilizó un muestreador de 25 kg de capacidad y 76 mm de boca, suspendido desde el puente por una grúa (Fig. 2). En este caso, los puntos de muestreo se establecieron basándose en la estructura del puente formado por siete ojos. El primer y último

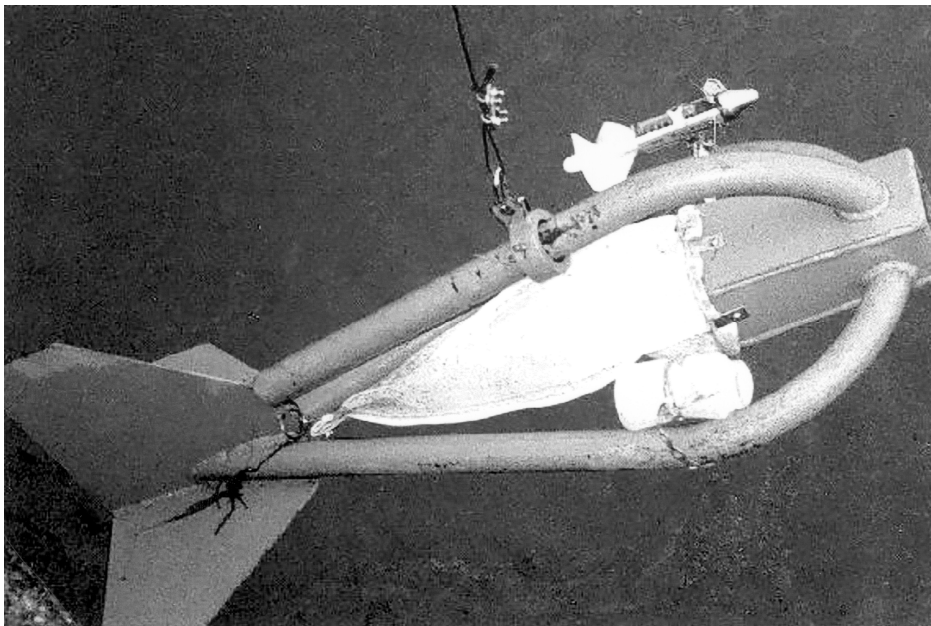


Figura 2. Muestreador de carga de fondo Helley-Smith de 25 kg de peso suspendido mediante grúa en el puente de Blanes.
Figure 2. The 25 kg cable suspended bedload Helley-Smith Sampler used at the monitoring section of the Blanes bridge.

ojo se desestimaron. Cada uno de los ojos se dividió en tres partes localizándose un punto de muestreo en el centro, y los dos restantes, a ambos lados. Se evitó al máximo la influencia de las pilas. El muestreo consistía en la realización de dos pasadas consecutivas, tomándose cada vez y en cada punto una muestra. El tiempo de muestreo era de 5 minutos; el intervalo de muestreo entre muestra y muestra era de 7 minutos y la durada total del muestreo era de aproximadamente 4 horas, en promedio. El muestreo se realizaba de manera continua durante 5 días. Paralelamente, se procedió al control del lecho del río en 18 secciones del cauce separadas entre ellas aproximadamente 500 metros mediante levantamientos topográficos anuales de perfiles transversales. El error de medición se estima en $\pm 2,5$ cm ($0,025\text{m} \cdot 100\text{m} = 2,5 \text{ m}^2$)

A partir de la superposición de los perfiles realizados en cada una de las secciones se obtuvo el balance neto total de material erosionado o acumulado en cada sección. Este valor fue extrapolado 300 metros aguas arriba y aguas abajo del perfil con el fin de dar el mismo peso a cada sección. A este valor se le aplicó un coeficiente reductor por porosidad del 0,36. Este valor de porosidad ponde-

rado se obtuvo de la curva granulométrica realizada en la Estación de Fogars de Tordera en la que predominan las partículas de cuarzo de tamaño de grava fina y media de tipo subangular. La caracterización granulométrica del lecho del río se realizó a través de la recogida de muestras volumétricas en tres puntos diferentes del sector de estudio: a) el primero localizado 300 m aguas arriba de la Estación de aforos de Fogars de Tordera, b) el segundo situado a 6 km del inicio del tramo de estudio, y c) el tercero ubicado 50 m aguas arriba de la sección final de control en Blanes.

Las entradas y salidas de sedimento en el tramo de estudio se calcularon mediante la aplicación del método de extrapolación propuesto por Walling (1984). Este método consiste en la extrapolación de los valores de las tasas de transporte obtenidos mediante la construcción de una relación estadísticamente significativa entre caudal y sedimento en suspensión (Fig. 3a), y entre caudal y carga de fondo (Fig. 3b). A partir de la relación entre ambas variables se estima la carga transportada por cada caudal instantáneo registrado durante el periodo de estudio. Se optó por este método dado que en algunos de los episodios de crecida registrados en la

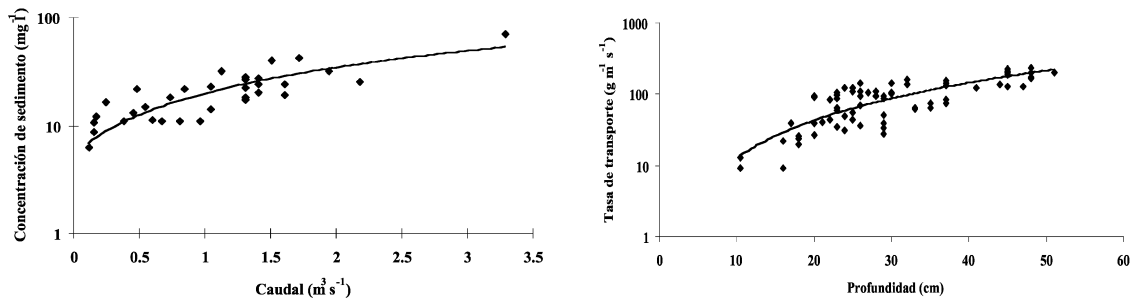


Figura 3. Relación entre (a) caudal y concentración de sedimento para los caudales bajos y (b) profundidad y tasa de transporte de fondo a la entrada del tramo fluvial analizado.

Figure 3. Relation between (a) discharge and suspended sediment concentration and (b) water depth and bedload transport rate at the entrance of the fluvial reach.

Estación de aforos de Fogars de Tordera no fue posible la toma de muestras como carga de fondo. Este método aunque requiere de un gran número de cálculos, permite observar la variabilidad mensual y anual en la exportación de sedimento. También es cierto que en relación con otros métodos, como por ejemplo el método de interpolación, tiende a subestimar las entradas de sedimento en suspensión durante los periodos de caudal base (Rovira, 2001).

4. Resultados

4.1. Entradas de sedimento en suspensión en el tramo de estudio

Para el periodo de estudio (1997-99) el volumen total de material transportado en suspensión a la entrada del sistema fue de 31.700 toneladas. Esta cantidad representa el 40% del total de sedimento (carga de fondo más sedimento en suspensión) que entró en el sistema fluvial. La contribución media sobre la superficie de la cuenca es de 16 t/km²·a. La concentración media de sedimento en suspensión es de 260 mg/l, con una concentración máxima de 2.810 mg l⁻¹ para un caudal de 21,7 m³ s⁻¹ y una concentración mínima de 6 mg l⁻¹ para un caudal de 0,11 m³ s⁻¹. Por años las entradas fueron:

- 18.700 toneladas en 1997, el 80% de las cuales fueron transportadas únicamente en un 20% del tiempo.

- 11.500 toneladas en 1998, el 80% de las cuales fueron transportadas en un 2% del tiempo.
- 1.500 toneladas entre enero y junio de 1999, el 80% de las cuales fueron transportadas en un 7,5% del tiempo. En relación con los seis primeros meses de 1997 y 1998, la entrada de sedimento fue sensiblemente inferior, un 86% y un 50% menor respectivamente.

Los resultados obtenidos indican una variabilidad interanual importante en la entrada de sedimento en el sistema fluvial, tanto en relación con la carga total como en el porcentaje de tiempo en que el material es transportado. Estas diferencias interanuales se relacionan con el número de crecidas registradas cada año, que fueron de 5 en 1997, 4 en 1998, y 2 en el primer semestre de 1999 (Tabla 1).

Para el conjunto del periodo de estudio las curvas de frecuencias de caudales y sedimento (Fig. 4) muestran que, por ejemplo, el 90% del material transportado en suspensión fue exportado por caudales igualados o superados un 15% del tiempo, o bien el 50% del sedimento transportado en suspensión fue transferido por caudales igualados o superados tan sólo el 3,5% del tiempo.

El caudal efectivo, definido como el caudal que con relación a su frecuencia transporta la mayor parte del sedimento (Andrews, 1980), se obtuvo a partir de la curva de frecuencias de caudales. Para el periodo de estudio (1997-1999), este caudal medio diario fue de 14 m³/s, lo que significa una frecuencia media del 3,5% del tiempo, valor que está por debajo del caudal lleno o *bankfull*, que tuvo una frecuencia media del 0,5%.

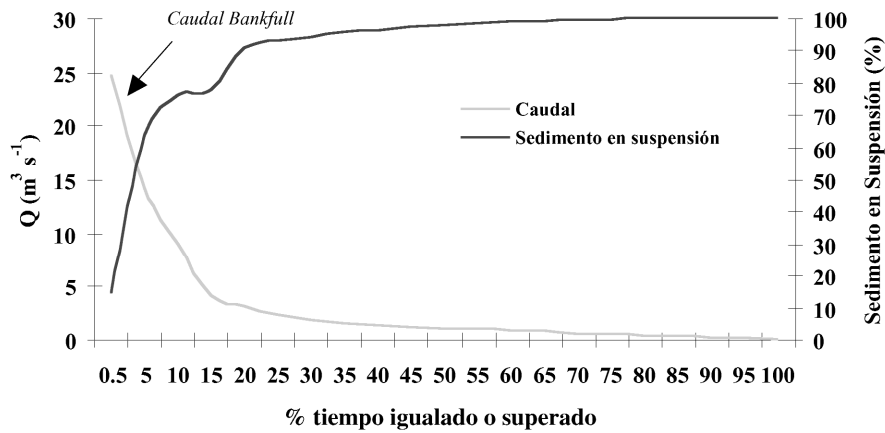


Figura 4. Distribución temporal de la carga de sedimento en suspensión en la sección superior (Fogars de Tordera) en relación con la frecuencia de caudales (enero de 1997 a junio de 1999). La curva de sedimento en suspensión es acumulada.

Figure 4. Temporal distribution of the suspended sediment load in relation to flow frequency at the upper river section (Fogars de Tordera) between January 1997 and June 1999.

4.2 Entradas como carga de fondo

Para el periodo de estudio (1997-99) la cantidad total de material transportada como carga de fondo en la entrada del sistema fue de 48.400 toneladas. La contribución media sobre la superficie de la cuenca es de 25 t/km².a. La tasa de transporte media es de 91 g/m·s con una tasa de transporte máxima de 238 g/m·s para un caudal de 3,8 m³ s⁻¹ y una tasa mínima de 9 g/m·s para un caudal de 0,15 m³ s⁻¹. Por años las cantidades que circularon por la sección superior del tramo fueron:

- 25.500 toneladas en 1997, el 80% de las cuales fueron transportadas en un 30 % del tiempo.
- 14.300 toneladas en 1998, el 80% de las cuales fueron transportadas en un 45 % del tiempo.
- 8.600 toneladas durante los 6 primeros meses de 1999, el 80% de las cuales fueron transportadas en un 40 % del tiempo. En relación con los primeros semestres de 1997 y 1998 la entrada de carga de fondo fue un 54% y un 27% inferior respectivamente.

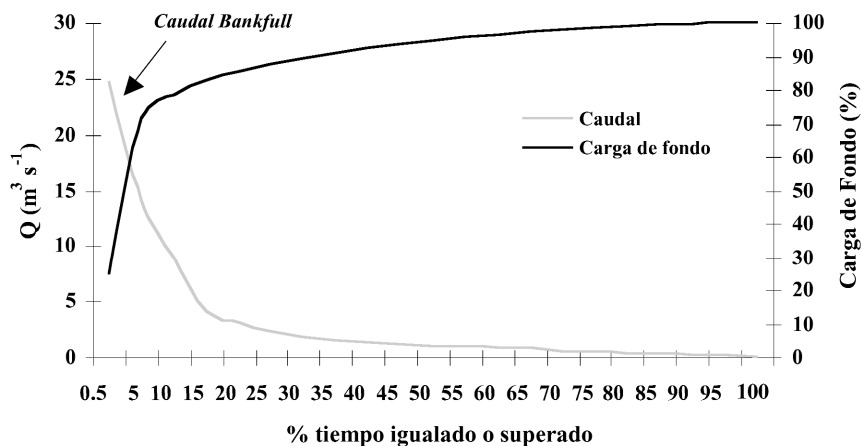


Figura 5. Distribución temporal de la carga de fondo en la sección superior (Fogars de Tordera) en relación con la frecuencia de caudales (enero de 1997 a junio de 1999). La curva de carga de fondo es acumulada.

Figure 5. Temporal distribution of the bedload in relation to flow frequency at the upper river section (Fogars de Tordera) between January 1997 and June 1999.

Apartir de las curvas de frecuencias de caudales y sedimento obtenidas para el total de periodo de estudio (Fig. 5) se observa que, por ejemplo, el 90% de la carga de fondo se mueve durante el 25% del tiempo, lo que indicaría que el transporte de sedimento como carga de fondo es más constante a lo largo del tiempo y tiene un umbral de movimiento inferior que el sedimento transportado en suspensión, el cual presenta una mayor dependencia del caudal circulante. De ello se desprende que, incluso durante caudales bajos, el lecho de arena puede ser móvil, mientras que es necesaria una crecida del río para proveer al río de sedimento en suspensión.

Para el conjunto del periodo de estudio, el caudal medio diario más efectivo en este punto de la cuenca es de $9 \text{ m}^3/\text{s}$ y tiene una frecuencia del 7,5% del tiempo. La curva de frecuencias de caudales anual pone en evidencia que los caudales de alta y moderada frecuencia igualados o superados en promedio el 5% del tiempo, representan un papel clave en la entrada del sistema tanto desde el punto de vista del volumen de material transportado como del porcentaje de tiempo de movilización de la carga de sedimento. De hecho, la efectividad de los caudales (entendiendo por efectividad el porcentaje de carga transportada en relación con su frecuencia) varía en función de la magnitud y frecuencia de las crecidas que se producen cada año. Por ejemplo, en el año 1997 el 50% de la carga fue transportada en un 7,5% del tiempo. En el año 1998 el mismo porcentaje del total de la carga fue exportado en un 12,5% del tiempo, es decir, fue más constante. En el año 1999 el porcentaje es del 7,5%, si bien no se contempla el año entero. Esta variabilidad temporal del material transportado como carga de fondo a la entrada del sistema se explica principalmente por el número y la magnitud de las crecidas que se producen anualmente (12 para el 1997, 9 para el 1998, y 4 para el 1999) donde un mayor número de crecidas implica una mayor entrada de sedimento al sistema.

4.3. Salidas de sedimento en suspensión

Para el periodo de estudio (1997-99) el volumen total de material transportado en suspensión a la salida de la cuenca fue de 18.700 toneladas. Este valor representa el 33% del total de sedimento (carga de fondo más sedimento en suspensión) exportado por el sistema fluvial al mar Mediterráneo. La contribución media sobre la superficie de la cuenca en esta sección es de $8,5 \text{ t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$. La concentración media es de $69 \text{ mg}/\text{l}$ con

una concentración máxima de 90 mg l^{-1} para un caudal de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un valor mínimo de $0,024 \text{ mg l}^{-1}$ para un caudal de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Por años las salidas fueron:

- 15.200 toneladas en el año 1997, lo que significa el 81% del material en suspensión transportado durante todo el periodo de estudio (1997-1999).
- 1.800 toneladas en 1998, que representan el 10% del total exportado para el todo el periodo de estudio.
- 1.700 toneladas durante los seis primeros meses de 1999, que corresponden al 9% del sedimento estimado para el periodo 1997-99.

En esta sección (Blanes), la circulación de sedimento se produce únicamente durante las crecidas.

Comparando los resultados en ambos extremos del tramo de estudio se observa que las diferencias entre el material transportado a la entrada y a la salida de este (Tabla 4) fueron mínimas en 1999 (-200 toneladas) y máximas en 1998 (9.800 toneladas). Durante 1998 se produjeron crecidas que no salieron de la cuenca (Fig. 6), y una parte importante del sedimento en circulación quedó almacenado a lo largo del tramo de estudio. Contrariamente, en 1997 y 1999 la mayor parte de las crecidas si circularon por la sección inferior, por lo que las posibilidades de sedimentación de grandes volúmenes de sedimento fueron menores. En conjunto, una parte importante del sedimento transferido al sistema fue acumulado a lo largo del tramo de estudio.

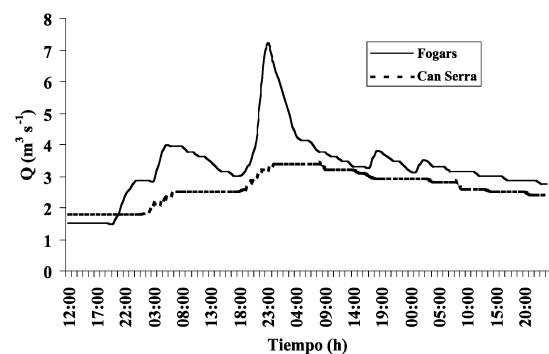


Figura 6. Hidrograma de la crecida del 30/4/98 por las estaciones de aforo de Fogars de Tordera y Can Serra. Ejemplo de crecida que no llegó a la salida de la cuenca (Puente de Blanes).
Figure 6. The 30.4.98 flood between the Fogars de Tordera and the Can Serra gauging stations. It is shown as an example of a flood which did not reached the basin outlet (Blanes Bridge).

A partir de estas observaciones, se deduce que el comportamiento sedimentario del río a lo largo del periodo de estudio se explica por la bimodalidad hidrológica del régimen fluvial, y por el número, duración y magnitud de las crecidas que ocurren anualmente.

4.4. Salidas como carga de fondo

La cantidad de sedimento exportado fuera de la cuenca a lo largo de todo el periodo de estudio y que llegó al mar fue de 37.500 toneladas. Este valor representa un 22 % menos que el sedimento que entró en el sistema (48.400 toneladas). La contribución media sobre la superficie de la cuenca fue de 17 t/km².a. La tasa media de transporte es de 47 g/m·s con valores que están entre 1,2 g/ms y 93,6 g/ms para unas profundidades de 0,03 m y 0,98 m, respectivamente. Por años las salidas fueron:

- 29.900 toneladas durante 1997, que representan el 80% del total de sedimento exportado como carga de fondo para el conjunto del estudio en este punto de la cuenca.
- 4.300 toneladas en 1998, que representan el 11% del total de material exportado como carga de fondo.
- 3.300 toneladas durante los primeros 6 meses de 1999, es decir, el 9% de toda la carga de fondo entre 1997 y 1999.

En esta sección, más del 90% del sedimento transportado como carga de fondo fue exportado al mar durante los episodios de crecida.

Las diferencias entre el sedimento transportado en ambas secciones de estudio (Tabla 4) muestran que en 1997 la exportación de sedimento a la salida de la cuenca fue superior a la del inicio del tramo de estudio. Contrariamente, en 1998 y

durante los primeros 6 meses de 1999 se produjo una acumulación neta de material en el canal. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el volumen de sedimento transportado como carga de fondo es similar durante los años en que el régimen de crecidas entre los dos extremos del tramo de estudio es parecido (p.e. 1997), mientras que difiere en la medida en que se acentúan las diferencias entre ambos, como es el caso de 1998 y 1999. El patrón de transferencia de carga de fondo es muy parecido al observado para el sedimento en suspensión. Un régimen perenne en todo el cauce representa el tránsito efectivo de material entre ambos extremos del tramo de estudio. Por el contrario, la bimodalidad hidrológica acentúa las diferencias entre ambas secciones. Sin embargo, el patrón de transferencia de carga de fondo difiere, con relación al sedimento en suspensión, en la existencia de una continuidad en el transporte de la carga de fondo donde un 35% del total del material entrante al sistema lo ha sido por caudales bajos, mientras que en el caso del sedimento en suspensión este es mucho más dependiente de las crecidas donde más del 90% del material es transportado durante episodios de caudales altos.

4.5. Balance sedimentario en el tramo bajo de la Tordera

4.5.1. Balance global (1997 - 1999)

Durante el período de estudio circularon por la sección superior del río del orden de 80.000 toneladas de sedimento (60% como carga de fondo y 40% en suspensión), de las cuales aproximadamente 56.000 llegaron al mar Mediterráneo, en una proporción similar entre carga de fondo y sedimento en

Tabla 4. Balance anual de agua y sedimento en la Tordera baja.
Table 4. Annual water and sediment budget for the Lower Tordera.

	Entradas (t)	Concentración (g/m ³)	Salidas (t)	Concentración (g/m ³)	Balance (t)
Sedimento en suspensión	31.812	175	18.764	120	+13.048
Carga de fondo	48.421	266	37.524	241	+10.847
Total	80.233	441	56.288	361	+23.945
	(hm ³)		(hm ³)		(hm ³)
Aportación hídrica	182		156		-29

Tabla 5. Balance global de agua y sedimento de la Tordera baja (1997-1999).
 Table 5. Global water and sediment budget for the Lower Tordera (1997-1999).

	Año	Entradas (t)	Concentración (g/m ³)	Salidas (t)	Concentración (g/m ³)	Balance (t)
Sedimento en suspensión	1997	18.729	187	15.234	130	+3.495
	1998	11.590	230	1.814	79	+9.776
	1999*	1.493	47	1.716	107	-223
Carga de fondo	1997	25.436	254	29.897	255	-4.461
	1998	14.320	286	4.335	188	+9.985
	1999*	8.665	262	3.292	206	+5.373
Total	1997	44.165	441	45.131	385	-966
	1998	25.910	516	6.149	267	+19.761
	1999*	10.158	309	5.008	313	+5.150
		(hm ³)		(hm ³)		(hm ³)
Aportación hídrica	1997	100		117		+ 17
	1998	50		23		- 27
	1999*	32		16		- 16

suspensión al anterior (Tabla 5). La composición mayoritaria de arena y gravas finas del lecho y el bajo umbral de inicio de movimiento para las partículas del cauce implica el transporte de manera casi continua de la carga de fondo. Estos factores explicarían, en parte, la mayor proporción de carga de fondo respecto al sedimento transportado en suspensión en el conjunto del balance sedimentario.

La cantidad total acumulada de sedimento en el tramo de estudio fue de 24.000 toneladas, lo que significa una media de 9.500 toneladas por año y una tasa media de recuperación del lecho de 5,3 mm/a (sobre una anchura media del cauce de 100 m y asumiendo una densidad del material en peso sumergido de 1,65 t/m³), en años relativamente secos. Ello se debe a que no toda el agua (15%) que entró en el sector de estudio, especialmente en forma de crecidas, tuvo salida de la cuenca, lo que provocó que alrededor del 30% del sedimento quedara retenido en el cauce. Este fenómeno se produce habitualmente en las últimas semanas de primavera y los meses de verano.

4.5.2. Balance anual de agua y sedimento

El año 1997 fue el más húmedo de los tres estudiados, aunque todavía por debajo de la media de la cuenca (tabla 4). Ello significa un balance negativo para el sistema, con lo que este tramo del río se comportó como un exportador neto de sedimento,

todo en forma de carga de fondo. El régimen fluvial fue perenne en todo el tramo y las crecidas circularon entre los dos extremos del canal, por lo que el balance de sedimento en suspensión no sufrió apenas variaciones.

El año 1998 fue un año más seco que el anterior y con un régimen claramente bimodal en el tramo de estudio, lo que provocó que la mitad del agua que entró en el sector no tuviera salida del mismo (Tabla 5). El resultado fue un balance positivo para el sistema de 18.000 toneladas, con lo que el cauce se comportó como una zona deposicional.

Los primeros meses de 1999 tuvieron un comportamiento hidrológico similar a 1998. La mitad del agua que entró en el tramo no circuló a la salida del mismo. El resultado fue un balance positivo para el sistema. El cauce se comportó como una trampa de sedimento aunque menos efectiva que en 1998, ya que la cantidad exportada al mar fue similar en sólo seis meses a todo el año anterior. Este hecho puede explicarse por la gran cantidad de sedimento que se había acumulado en 1998 y que tuvo una rápida salida de la cuenca durante las primeras crecidas de 1999.

En la medida en que aumenta la diferencia entre las aportaciones hídricas anuales también aumenta la diferencia en la transferencia de sedimento, no solamente entre los años sino también en las dos secciones de control. En el transcurso de 1997 el material que circuló por la Estación de aforos de

Fogars de Tordera representó el 55% del total del periodo analizado, mientras que en el tramo inferior este valor asciende al 80%. Durante el año 1998 pasa por la sección superior (Fogars de Tordera) el 33% del total del periodo estudiado, mientras que aguas abajo el transporte de material representó el 11%. Para el año 1999 los valores obtenidos son del 12% para las entradas y del 9% para las salidas.

Finalmente cabe señalar que una mayor aportación hídrica del río no conlleva una mayor acumulación de sedimento en el cauce, ya que es en los años intermedios de los ciclos secos cuando se deposita más sedimento mientras que, en los años o muy húmedos o muy secos la transferencia de sedimento se iguala entre la entrada y la salida del sistema.

4.6. Evolución del volumen de sedimento en el cauce

Sobre la base de los resultados se obtiene que, en conjunto, las secciones que más tienden a acumular material son aquellas que están localizadas inmediatamente aguas arriba de un puente o en puntos donde el río gana mucha anchura (Fig. 7). Es un buen ejemplo de ello la sección de El Pla

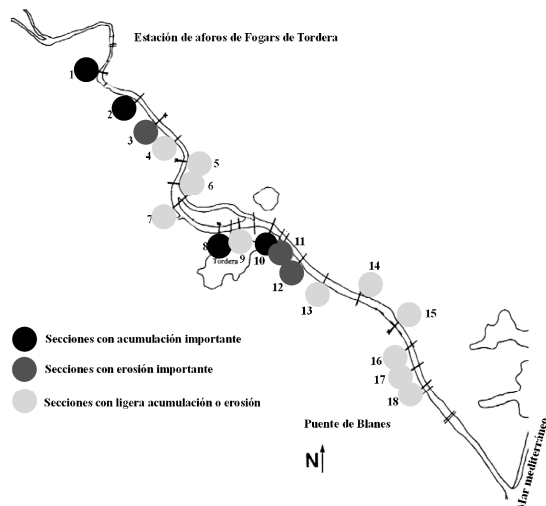


Figura 7. Balance de sedimento por secciones en la parte baja de la Tordera entre enero de 1997 y junio de 1999. *Figure 7. Sediment budget at selected river sections in the Lower Tordera between January 1997 and June 1999.*

(sección 3, Fig. 8a). Por el contrario existen otras secciones que presentan una clara tendencia a la erosión. Se localizan en puntos donde el cauce se estrecha o aguas abajo de un puente. Es un buen ejemplo de ello la sección de Petit Camí (sección 15 Fig. 8b). Se corrobora, por tanto, la influencia que las infraestructuras fluviales tienen sobre el lecho del río, con una tendencia a retener material aguas arriba de los puentes y una dinámica erosiva inmediatamente aguas abajo de estos. El resto de las secciones presentan una primera fase acumulativa o erosiva seguida de una segunda fase erosiva o acumulativa. Las secciones que inicialmente presentan una acumulación neta de material, en un segundo momento tienden a perderlo durante crecidas posteriores. También se observa una sucesión de sectores erosivos y acumulativos. Las secciones topográficas que en una primera fase presentan una acumulación neta de material están precedidas por sectores que, en la misma fase, pierden material. Este comportamiento se invierte en crecidas posteriores.

La extrapolación de los valores del balance entre el material acumulado y erosionado en cada sección (Fig. 9) permite establecer tres grandes sectores bien diferenciados a lo largo del cauce:

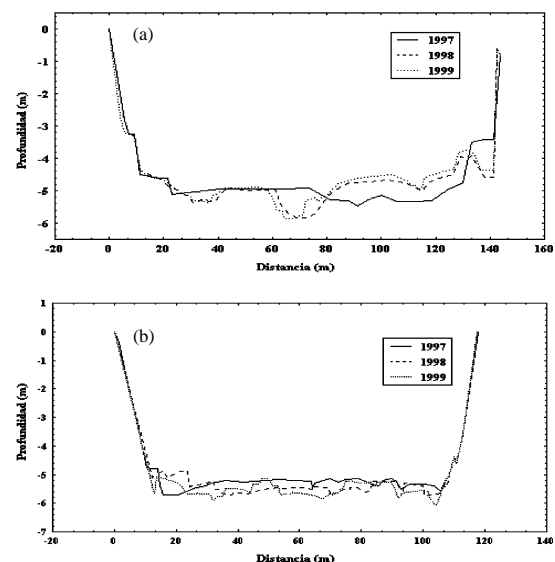


Figura 8. Perfiles transversales superpuestos en (a) la sección 3 (El Pla) y (b) la sección 15 (Petit Camí).

Figure 8. Superimposed cross sections at (a) section 3 (El Pla) and (b) section 15 (Petit Camí).

- i) tramo 1: Se localiza entre la sección inicial y los 3,3 km aguas abajo. A lo largo del período de estudio muestra una acumulación neta de 3.400 toneladas de sedimento, lo que significa una tasa de acumulación media de 3,1 mm/a (a partir de una anchura media del cauce de 80 m).
- ii) tramo 2: Comprende el sector de río desde los 3,3 km de la sección inicial hasta los 7 km aguas abajo. En este tramo el río presenta una tendencia todavía más clara a la acumulación de material en el lecho con 28.800 toneladas, lo que significa una tasa de acumulación media de 26,4 mm/a (a partir de una anchura media del cauce de 100 m). Se trata del tramo más afectado por las extracciones y en el que el río actúa como un sumidero de material.
- iii) tramo 3: Se sitúa entre los 7 km del inicio hasta la desembocadura del río al mar. En este sector el cauce presenta una ligera tendencia a la erosión. Durante el período de estudio se ha estimado que la exportación neta de sedimento ha sido de 2.000 toneladas, lo que significa una incisión de 1,6 mm/a (a partir de una anchura media del cauce de 100 m).

La acumulación neta de material en el cauce a lo largo de los tres años de estudio estimada a partir de las secciones transversales fue de 30.000 toneladas (con un rango de error estimado de medición de $\pm 2,5$ m² en secciones-tipo de 100 m de

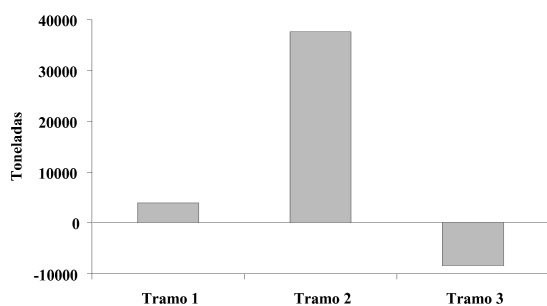


Figura 9. Balance global de sedimento estimado a partir de perfiles transversales para los tres sectores del tramo de estudio (1997-1999). El año 1999 solamente comprende los 6 primeros meses.

Figure 9. Global sediment budget derived from cross sections between 1997 and 1999 (January to June).

anchura). Este valor es superior a las 24.000 toneladas obtenidas mediante la aplicación del método utilizado en el cálculo del transporte y la exportación del sedimento fluvial (con un rango de error del 3% en comparación con los métodos de interpolación y frecuencia de caudales (Rovira, 2001)). La extrapolación de los valores obtenidos en cada sección conlleva la sobreestimación del material acumulado en el canal.

Teniendo en cuenta que el balance sedimentario se ha construido a partir de datos obtenidos en años secos, y asumiendo una sedimentación anual media de 10.000 toneladas, se estima que el tiempo medio de recuperación del nivel del lecho anterior a la última fase de extracción de áridos se situaría alrededor de los 500 años.

5. Discusión

El volumen medio de material transportado en suspensión para el tramo de estudio representa aproximadamente el 35 % del total de sedimento (carga de fondo más sedimento en suspensión) exportado por el río Tordera al mar Mediterráneo. Esta proporción es similar a la observada por Batalla (1993) en la Riera de Arbúcies donde el 35% del sedimento exportado fuera de la cuenca lo hacía en suspensión. Emmett (1984) obtuvo un valor del 50% en el East Fork River y Kesel et al (1992) un valor del 30% en el río Mississippi. Por su parte, Bhowmik (1981) observó en el río Kankakee (Illinois) que más del 95% del sedimento anual exportado fuera de la cuenca viajaba en suspensión pero que ocasionalmente, durante la época de crecidas este valor bajaba hasta el 60%. En el río Tordera, la circulación de sedimento en el tramo final (Blanes) se produce únicamente durante las crecidas y, por lo tanto, este valor no estaría alejado al observado en el río Kankakee.

Así mismo, se ha obtenido a la entrada del sistema que cerca del 90% del sedimento en suspensión es transportado por caudales igualados o superados en un 15% del tiempo. Estos valores son similares a los descritos por Batalla *et al.*, (1995) y Walling (1984). Batalla *et al.*, (1995) observa en la Riera de Arbúcies (114 km²) uno de los principales afluentes del río Tordera, que el 90% del sedimento en suspensión era transportado en un 10 % del

tiempo. Por su parte, Walling (1984) determinó en el Creedy River (UK) que cerca del 50% de la carga del sedimento en suspensión anual era transportada en un 2% del tiempo. Sin embargo, la frecuencia media del caudal efectivo, obtenida para el río Tordera es inferior a las observaciones realizadas por Benson y Thomas (1966) y Nolan *et al.* (1988). En concreto, Benson y Thomas (1966) mostraron para varios cursos fluviales de la costa este y sudoeste de Estados Unidos que el transporte de sedimento en suspensión era distribuido en un rango de caudales, donde el caudal más efectivo tenía una frecuencia media del 12,4% del tiempo, variando entre el 8% y el 18,5% del tiempo. En relación con el sedimento transportado como carga de fondo, la frecuencia media del caudal efectivo es superior a la observada por Andrews (2000) en el río East Fork Virgin. Este autor constató que el caudal efectivo tenía una frecuencia media del 1,5% del tiempo y que el 75% de la carga era transportada por caudales iguales o inferiores al caudal lleno o *bankfull*.

Finalmente, cabe destacar que Andrews (1979) puso de manifiesto en el East Fork River, Western Wyoming la influencia que tienen las infraestructuras fluviales en el lecho del río. Este autor constata una tendencia a retener material aguas arriba de los puentes y una dinámica erosiva inmediatamente aguas abajo de estos. En el río Tordera se ha observado esta misma dinámica.

6. Conclusiones

Se ha presentado el balance sedimentario del tramo final del río Tordera, evaluado a partir de mediciones directas de transporte de sedimento y del control de los cambios en la topografía del lecho fluvial. El período de estudio fue relativamente seco en comparación con la aportación hídrica media de la cuenca. Los resultados indican que el cauce se encuentra en su mayor parte en una fase de acumulación neta de material, proceso que se produce preferentemente en años en los que el río presenta una bimodalidad hidrológica, con un régimen perenne en las secciones superiores y un régimen efímero en el sector inferior cercano a la desembocadura al Mediterráneo. En estos años, una parte muy importante del sedimento arrastrado por las crecidas no

sale de la cuenca ya que estas no llegan a circular por las secciones inferiores. Cuantitativamente el balance se establece como sigue:

- 1) el tránsito medio anual de sedimento durante los años 1997-99 en la entrada del sistema fluvial fue de 32.000 toneladas, el 60% de las cuales fueron transportadas como carga de fondo y el 40% restante en suspensión. La concentración media de material en suspensión fue de 260 mg/l y la tasa media de carga de fondo de 91 g/m.s.
- 2) a la salida del sistema fluvial, la exportación media anual de material fue de 22.500 toneladas, el 65% como carga de fondo y el 35% en suspensión. La concentración media de sedimento en suspensión fue de 70 mg/l y la tasa de transporte de fondo de 47 g/m.s.
- 3) la acumulación media anual en el cauce es de 9.500 toneladas de sedimento. Se trata de material que no sale de la cuenca porque las crecidas que lo transportan no llegan a circular por la parte final de la cuenca. Este proceso fue especialmente intenso durante 1998.
- 4) el análisis topográfico del cauce ha corroborado la tendencia general a la acumulación de sedimento en el río y ha permitido diferenciar dos sectores con relación a su dinámica erosivo-sedimentaria: un primero que cubre los 2/3 superiores del tramo analizado con una clara tendencia a la acumulación (15 mm/a), especialmente en el sector más afectado por las extracciones de áridos alrededor del pueblo de Tordera, y el tercio inferior con una tendencia a la erosión (1,6 mm/a) y a la exportación neta de sedimento al mar, en el que los efectos de la recuperación post-extractiva no son todavía perceptibles.
- 5) de acuerdo con los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que el período analizado ha sido relativamente seco, se estima que el tiempo medio de recuperación del nivel del lecho de la Tordera anterior a las extracciones de áridos es del orden de 500 años.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el seno del Grup de Recerca Ambiental de la Mediterrània

(GRAM) y gracias a una beca de Investigación del Programa de Doctorado de la Universidad de Barcelona, y del proyecto CICYT HID96-0971. Diversos miembros del GRAM han colaborado en el trabajo de campo. La Agència Catalana de l'Aigua ha colaborado en este trabajo facilitando datos hidrológicos y de extracciones de áridos. Los autores agradecen la revisión del manuscrito original por parte de Jorge Guillén (CSIC) y de un revisor anónimo.

Referencias bibliográficas

- Andrews, E.D. (1980): Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa river basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology*, 46, 311-330.
- Andrews, E.D. (2000): Bed material transport in the Virgin River, Utah. *Water Resources Research*, 36, 2, 585-596.
- Batalla, R. J. (1993): *Contribució del transport de sorres en el balanç de sediments d'una conca granítica mediterrània*. Tesis doctoral inédita, Universitat de Barcelona, Barcelona, 198 p.
- Batalla, R.J., Sala, M., y Werritty, A. (1995): Sediment budget focused on solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29, 2, 249-264.
- Benson, M.A. y Thomas, D.M. (1966): A definition of dominant discharge. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 11, 76-80.
- Bhowmik, N. (1981): Measurement of suspended sediment and bedload in sand bed channels and the associated problems. En: *Erosion and Sediment Transport Measurements (Proceedings of the Florence Symposium, June 1981)*. IAHS Publ. 133, 295-303.
- Bray, D.I. (1972): Generalized regime-type analysis of Alberta rivers, Tesis doctoral inédita, University of Alta, Edmonton.
- Dietrich, W. y Dunne, T. (1978): Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Z. Geomorph. N. F. Suppl. Bd.* 29, 191-206.
- Emmett, W. (1984): Measurements of bedload in rivers. En: Hadley, R.F. y Walling, D.E. (eds): *Erosion and sediment yield: Some methods of measurements and modelling*. London, Geo Books, 89-109.
- Kesel, R., Yodis, E. y McCraw, D. (1992): An Approximation of the Sediment Budget of the Lower Mississippi River prior to Major Human modification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 711-722.
- Kilpatrick, F.A. y Barnes, H.H. (1964): Channel geometry of Piedmont streams as related to frequency of floods. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 422-E, 10pp.
- Lehre, A.K. (1982): Sediment budget of a small coast range drainage basin in North-Central California. En: Swanson, J., Janda, R. J., Dunne, T. and Swanson, D.N. (eds.): *Sediment budgets and routing in forested drainage basins* U.S.D.A. Forest Service, Gen.Techn.Rept. PNW-141, 67-77.
- McCarthy, G.T. (1938): *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Conferencia de la División Noratlántica, U.S. Army Corps of Engineers (manuscrito no publicado), ., 24 de junio de 1938.
- McLean, D.G. y Church, M. (1999): Sediment Transport along Lower Fraser River:2. Estimates Based on the Long-Term Gravel Budget. *Water Resources Research*, 35, 8, 2549-2559.
- Moore, R.J. y Newson, M.D. (1986): Production, storage and output of coarse upland sediments: natural and artificial influences as revealed by research catchments studies. *Journal of the Geological Society*, 143, 921-926.
- Nolan, K. M., Lisle, T.E. y Kelsey, H.M. (1987): Bankfull discharge and sediment transport in northwestern California, Erosion and sediment in the Pacific Rim, *IAHS Publ.*, 165, 439-449.
- Pedraza, P. (1998): *Estudio de la erosión general en el río Tordera*. Tesina de especialidad inédita. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, 66 p.
- Pickup, G y Warner, R.F. (1976): Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. *Journal of Hydrology*, 29, 51-75
- Rapp, A. (1960): Recent development of mountain slopes in Karkevage and surroundings, Norther Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 42, 73-200.
- Reid, L. M. y Dunne, T. (1984): Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research*, 20, 11, 1753-1761.
- Roberts, R.G. y Church, M. (1986): The sediment budget of severely disturbed watersheds, Queen Charlotte Ranges, British Columbia. *Can. J. For. Res.*, 16, 1092-1106.
- Rovira, A. (2001): *Balanç de sediments i dinàmica fluvial en un riu de règim hidrològic transitori (Tram final de la Tordera)*. Tesis doctoral inédita. Barcelona, Universitat de Barcelona.
- Sala, M. (1979): *La cuenca del Tordera. Estudio geomorfològic - co*. Tesis doctoral inédita. Barcelona, Universitat de Barcelona.
- Schick, A.P. (1977): A tentative sediment budget for an extreme arid watershed in the southern Negev. En: Doehring, D.O. (ed.): *Geomorphology in arid regions*, 139-163.
- Schick, A.P. y Lekach, J. (1993): An evaluation of two ten-year sediment budgets, Nahal Yael, Israel. *Physical Geography*, 14, 3, 225-238.
- Schumm, S.A. (1960): The shape of alluvial channels in relation to sediment type. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 352-B, 30pp.
- Slaymaker, H.O. (1972): Patterns of present sub-aerial erosion and landforms in mid-Wales. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 55, 47-68.
- Walling, D.E. (1984): Dissolved loads and their measurements. En: Hadley, R.F. y Walling, D.E. (eds.): *Erosion and sediment yield: Some methods of measurements and modelling*. London, Geo Books. 111-177.

Recibido 24 de febrero de 2003

Aceptado 10 de septiembre de 2003