

INCISIÓN, EROSIÓN TRANSITORIA Y FORMAS DE FONDO EN LOS TRAMOS MEDIO Y BAJO DEL RÍO TORDERA

J.P. Martín Vide¹, R.J. Batalla², M. Roca Collell¹, A. Rovira² y A. Andreatta¹

Resumen:

Se presenta en este trabajo los datos de campo y análisis que prueban el comportamiento dinámico del río Tordera. El aspecto más llamativo es el descenso general (incisión) del cauce del río, del orden de 3m y a lo largo de unos 15 km, en los últimos 40 años. Se muestra con datos de campo que la erosión general transitoria del cauce arenoso puede ser del orden de metros y que el lecho presenta grandes dunas.

Palabras clave: erosión general, incisión, erosión transitoria, extracción de áridos.

INTRODUCCIÓN

El río Tordera es uno de los cursos de agua no regulados de Catalunya con más interés como espacio natural. Se trata de un río con un funcionamiento hidrológico marcadamente mediterráneo que presenta además un comportamiento muy dinámico como curso fluvial: en él se dan movimientos del fondo de tipo transitorio durante las avenidas, movimientos del fondo de tipo permanente o sea manifestados a largo plazo, desplazamientos laterales con erosión de orillas, etc. La cimentación de muchos puentes (p.e. el de la carretera N-II en Tordera, fig.1), la historia de otros que sucumbieron a las crecidas (el de la autopista A7 en 1971, en la desembocadura de la riera de Santa Coloma), el estado de otras obras en el cauce (tan socavadas como la estación de aforos de Can Simó) o la incisión de un brazo en la isla de Tordera son ejemplos de estas variaciones (fig.1). El río es finalmente la principal fuente de sedimento que alimenta su frente deltaico y toda la costa y sus playas desde Badalona hasta Malgrat de Mar.

La cuenca del Tordera tiene un área de 894 km² y se localiza al NE de las Cordilleras Costeras Catalanas (fig. 1). La Tordera drena parte de los macizos del Montseny y de las Guillerries en su parte norte, y parte de los macizos del Montnegre y Blanes en su parte sur. El curso principal circula por las fosas del Vallès y parte de la Selva. La mayor parte de la cuenca tiene una litología formada por rocas plutónicas.

El clima de la cuenca se clasifica como Mediterráneo subhúmedo de carácter marítimo (Sala, 1978). Las precipitaciones van desde los 1000 mm en los sectores de montaña a los 600 mm en la costa. La aportación hídrica media anual (1967-1998) es de 178 hm³, lo que significa un caudal medio de 5,6 m³/s.

Este artículo presenta una síntesis de la investigación realizada entre los años 1996 y 2002 sobre el comportamiento dinámico del río, en particular sobre su incisión en las últimas décadas y sobre su movilidad transitoria durante las crecidas, aspecto este último que se ha estudiado a partir de trabajo de campo.

METODOLOGÍA

Datos topográficos

Para estudiar la evolución con el tiempo del perfil longitudinal del río Tordera y cuantificar la erosión a largo plazo o incisión que ha ocurrido, se han tomado datos de la cota del fondo del río en distintos puntos y años. En informes antiguos, mapas, planos, inventarios, etc. se han encontrado 4 datos de desniveles entre varias obras y el mar que datan de 1910, 7 datos de cotas de 1915, 10 datos de 1924, 34 datos de los años 1970-80 y 6 datos de cotas del río bajo los puentes en 1973. Por otra parte hay topografías más precisas, con centenares de datos del perfil, que son de las siguientes fechas: anterior a 1987, anterior a 1996 y del año 2002.

¹ Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Jordi Girona 1, 3. D1 08034 Barcelona. tel: 93 401 64 76. e-mail: vide@grahi.upc.edu

² Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure, 177. 25198 Lleida

Artículo recibido el 21 de mayo de 2004, recibido en forma revisada el 4 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 16 de febrero de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Se ha tenido el mayor cuidado posible en extraer correctamente la información topográfica de estas fuentes, de escalas y orígenes distintos. Para ello, se ha buscado siempre la cota más baja del cauce, interpretando las líneas de nivel o los datos de cota. Asimismo se han usado los puentes del río Tordera como puntos fijos para obtener las distancias, a fin evitar desviaciones debidas a imprecisiones de los planos. Con ello, se ha definido una coordenada a lo largo del río con origen en el mar.

Esta información ha permitido dibujar el perfil longitudinal del tramo de estudio sobre el que se ha analizado el proceso de incisión del lecho del río. Además de estas fuentes cartográficas, se han llevado a cabo observaciones de campo buscando evidencias de la erosión ocurrida en el río Tordera en su tramo bajo, especialmente en construcciones fijas como pilas de puente y estaciones de aforo.

Datos granulométricos

La granulometría de los cauces se ha analizado con varias campañas de muestreo. Allí donde no se ha apreciado una diferencia notable entre el material superficial del lecho y el que se encuentra bajo la superficie (*sub-superficial*), como por ejemplo en el tramo bajo del río desde la desembocadura de la riera de Santa Coloma hasta el mar, se han tomado muestras volumétricas de unos 40 kg de peso, a partir de la metodología propuesta por Church et al (1987).

En cambio, en los tramos donde se ha observado la presencia de una coraza superficial más gruesa, como por ejemplo diversas barras activas entre Sant Celoni y Hostalric, se ha realizado un muestreo superficial por el método de conteo (o de Wolman, 1954), para determinar las características de la coraza y un muestreo volumétrico (de unos 50 kg) del material que se encuentra bajo la superficie (Church et al., 1987).

Experimentación de campo y obtención de datos hidráulicos

Los restantes datos de campo que se usan en este estudio provienen de dos instalaciones totalmente diferentes. La primera son los testigos de carbón colocados en 5 secciones del tramo bajo del río Tordera los días 18 al 20 de junio de 1997 (fig.1). El tramo bajo presenta cauces aluviales anchos con apariencia de tener gran movilidad de fondo.

Se buscaron secciones con cauce bien definido, de fácil acceso y con referencias topográficas seguras. Una sección (la A) se tomó en una curva de fuerte curvatura. La altura de la columna del testigo de carbón que eventualmente haya desaparecido tras el paso de una crecida se determina excavando el lecho hasta encontrar el carbón y usando la referencia topográfica para registrar su cota. La parte de columna desaparecida fue sustituida por el material aluvial del río durante el paso de la crecida e indica por tanto la magnitud de la erosión general transitoria máxima. Posteriormente hay que reponer la columna de carbón perdida hasta la cota del lecho (fig.2).

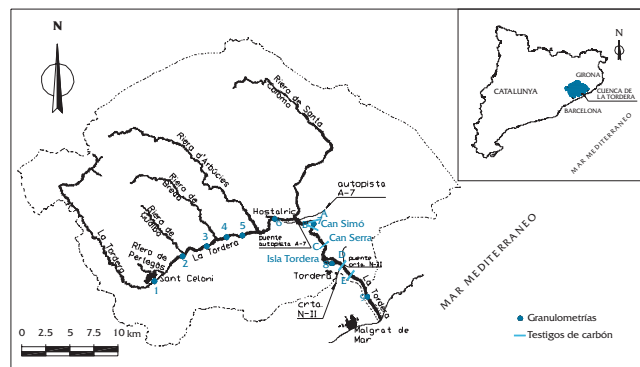


Figura 1. Localización y curso del tramo medio y bajo de río Tordera al norte de Barcelona y sur de Girona. En el mapa se indican los puntos de control de la dinámica fluvial (granulometrías – 1-9 y testigos de carbón A-E) y los puntos de control hidrométrico (Can Simó y Can Serra).

Los días 8 al 10 de junio de 1999, dos años después de su instalación, se realizó la primera campaña de localización de los testigos de carbón. A continuación se repusieron las columnas de carbón hasta la superficie del lecho. Los días 23 al 24 de julio de 2002, se realizó la segunda campaña. La relación entre estas fechas y las avenidas se verá más adelante.

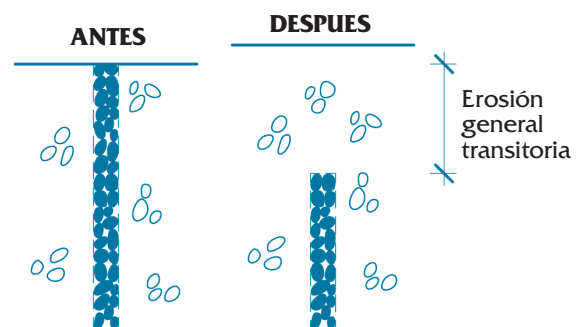


Figura 2. Principio de medida de la erosión transitoria por medio de testigos. El carbón ofrece la facilidad de ser reconocido rápidamente por su color.

INCISIÓN, EROSIÓN TRANSITORIA Y FORMAS DE FONDO EN LOS TRAMOS MEDIO Y BAJO DEL RÍO TORDERA

La segunda instalación son las estaciones de aforo de Can Simó y Can Serra (fig.1). La segunda, en la coordenada 10285, es una estación de aforos sin estructura hidráulica alguna, en lecho móvil y donde el material aluvial, como veremos, es esencialmente arenoso. En ella, se registra el nivel de agua por medio de un limnógrafo de boya. Se ha verificado el ce-ro de la estación (es decir el fondo del cauce, en lento proceso de incisión, como veremos), con relación a la boya. No se puede dar en esta estación el caudal circulante ya que no existe estructura. A principios de los años 90 se construyó la estación de Can Simó, como alternativa a la anterior y a poca distancia, en la coordenada 14800 m. Las cuencas de una y otra estación son 790 km² y 802 km², es decir sólo difieren en un 1,5%. Can Simó tiene una estructura hidráulica consistente en una solera con cuatro niveles distintos (fig.5). Su ecuación de desagüe, para transformar los niveles en caudales, se ha obtenido a partir de los conocimientos existentes sobre estructuras de medida del caudal (Ackers et al, 1978) (la estructura es un vertedero rectangular de pared gruesa a cuatro niveles). Desde 1994 los datos de nivel en la estación se registran automáticamente.

Los datos de las estaciones de Can Simó y Can Serra se han revisado con el objetivo de identificar los sucesos de crecida más importantes desde 1994 hasta hoy. Las mayores crecidas, expresadas en altura de agua máxima y en caudal, en Can Simó y en Can Serra se exponen en la tabla 1:

Tabla 1. Avenidas más importantes desde 1994 en las dos estaciones de aforo relevantes para el estudio de la erosión del lecho.

Fecha	Altura medida en Can Simó (m)	Caudal calculado en Can Simó (m ³ /s)	Altura medida en Can Serra (m)
10-X-1994	1,54	175	3,20
30-I-1996	1,94	308	4,35
8-XII-1996	1,52	171	2,68
16-I-2001	1,64	206	3,35
8-V-2002	1,48	158	2,49

El dato de caudal máximo de las crecidas se relacionará con la erosión máxima observada con los testigos de carbón. Con ello se sigue la noción de que a mayor caudal circulante mayor erosión. Asimismo se debe cumplir que tras la avenida los niveles medios del fondo no hayan cambiado, aunque se puedan encontrar en la sección transversal puntos de erosión y otros de sedimentación. Si esto se cumple, el nivel de fondo "básico" desde el que comienza la erosión transitoria es invariante. Por tanto, otras avenidas menores en el periodo estudiado probablemente no hayan alcanzado erosiones de la magnitud de la mayor del periodo.

Con ello la parte de columna de carbón perdida es efecto de la mayor crecida del periodo.

Con respecto a los testigos de carbón, entre junio de 1997 (instalación) y junio de 1999 (1ª campaña) el máximo nivel y el máximo caudal circulante por Can Simó fueron solamente 1,13 m y 77 m³/s el 18 de diciembre de 1997. En cuanto a la segunda campaña, es de destacar que ha ocurrido un suceso más importante, el del 16 de enero de 2001. En ambos casos estos caudales se deberán relacionar con las erosiones observadas en los testigos. Véase en la tabla 1 cómo los sucesos se clasifican de mayor a menor en el mismo orden en una y otra estación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización granulométrica

En la tabla 2 se recogen los datos más significativos de la composición granulométrica de los tramos medio y bajo del río Tordera: tamaño característico (D_{50}) y desviación típica ($\sigma = \sqrt{(D_{84}/D_{16})}$). Es de destacar el cambio tan notable que se observa entre el quinto y el sexto punto de muestreo (coordenada 18160 m, Hostalric, fig.1): de grava acorazada se pasa a una mezcla de arena y grava sin acorazar (de ahí que no haya muestra superficial diferenciada a partir del sexto punto de muestreo). Este cambio vendría anunciado por el material sub-superficial de parecido tamaño en el quinto punto. El cambio debe estar relacionado con la aportación de los dos afluentes más importantes del Tordera, ambos por la margen izquierda y suministradores de grandes cantidades de arena: Arbúcies en la coordenada 20790 m (con $D_{50}=2,2$ mm) (Batalla, 1997; Batalla y Martín-Vide, 2001) y Santa Coloma en la coordenada 16260 m. La transformación coincide bien con la desembocadura del primero, aunque viene anunciada antes, concretamente desde la desembocadura de las rieras de Gualba y Breda.

Tabla 2. Datos granulométricos de los tramos medio y bajo del río Tordera. La coordenada es la distancia al mar por el eje del río (ver figura 1). "sup" significa muestra de material superficial y "sub" muestra de material bajo la superficie.

Sección	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Coordenada (m)	34825	30770	27432	25585	22357	18160	14800	8580	2650
D_{50} sup (mm)	41,4	27,6	34,2	34,5	24,3				
D_{50} sub (mm)	6,2	8,1	6,7	7,8	2,2	1,2	3,2	2,2	1,6
$D_{50}^{sup}/D_{50}^{sub}(-)$	6,7	3,4	5,1	4,4	11,3				
σ , sup (-)	1,8	1,9	2,1	1,8	1,8				
σ , sub (-)	6,2	5,6	5,7	8,1	2,9	3,8	3,9	4,2	4,3

En cuanto a la dispersión granulométrica, la coraza es francamente uniforme. Las arenas gruesas del tramo bajo son menos uniformes, pero un poco más que las gravas finas que hay debajo de la coraza en el tramo superior. El cociente $D_{50}^{superf}/D_{50}^{sub}$ es una medida del grado de acorazamiento del lecho, que es máximo en el 5º punto de muestreo (coordenada 22357 m). Probablemente, a continuación la incorporación del material de la riera de Arbúcies cambiaría de tal manera las proporciones entre uno y otro tipo de material (a favor del último) que desaparecería la continuidad de la coraza.

Erosión general e incisión del cauce

A través de los cambios del perfil longitudinal se presenta un análisis de la incisión ocurrida en el río Tordera. En la fig.3 se representan los 21 datos de 1910, 1915 y 1924 contra el perfil de 1996 (en línea continua), señalando también con líneas verticales los puentes y otras referencias. Los datos de 1996 se consideran a este respecto como datos recientes de calidad. La figura sirve como constatación del descenso del cauce del río Tordera en la parte baja durante el siglo XX. No se hace distinción entre las tres fechas de los datos usados en la figura, suponiendo por tanto un estado de equilibrio en aquellas décadas de 1910-1930. Por otro lado, en líneas generales, el perfil actual del río (y también el de equilibrio de 1910-24 a juzgar por los tres datos de la parte alta) cambia de pendiente de forma bastante clara alrededor del km 25 o 26. Sin embargo el de 1910-1924 sería aproximadamente una recta desde el mar hasta ese punto, mientras en 1996 el perfil en este sector es ligeramente cóncavo. Por ello las máximas diferencias entre el perfil de equilibrio (1910-24) y el actual se dan en el centro del tramo, entre el puente de la N-II (km 7) y el de la A7 (km 16), donde alcanzan unos 3 m.

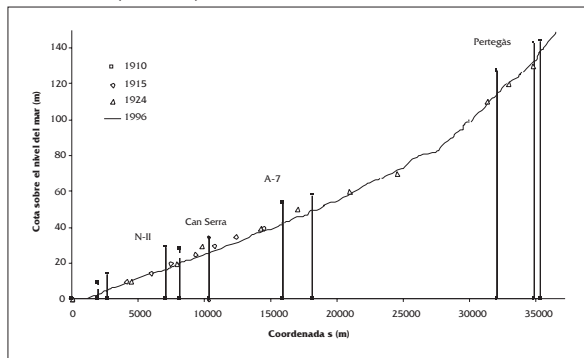


Figura 3. Perfil longitudinal del río. Datos de la primera mitad de siglo XX (1910 a 1924) en comparación con el perfil más reciente. Las líneas verticales son puentes y estructuras existentes en la actualidad.

En el gráfico de la fig.4 se representan los restantes datos "antiguos" desde 1973, contra el perfil de 1996 (en línea continua), usado de nuevo como referencia. Los datos del proyecto de 1987 se sitúan por encima de la línea de 1996 en el tramo medio y bajo (y por debajo del perfil de equilibrio de 1910-24). Esto indicaría que el proceso de erosión ha sido activo en el periodo 1987-1996. Los datos de 1973 se señalan con cuadrados en la fig.4 coincidiendo con las líneas verticales de los puentes: es interesante notar los descensos en el periodo 1973-87 registrados en los puentes.

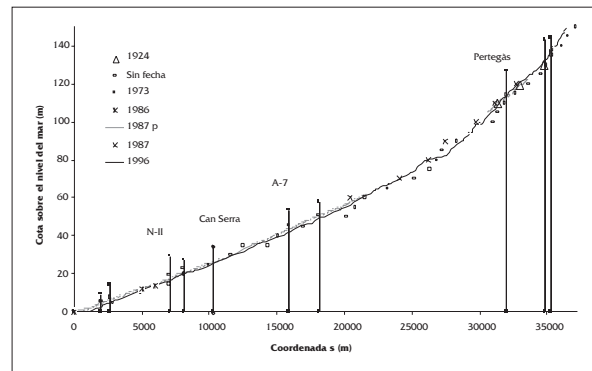


Figura 4. Perfil longitudinal del río. Datos desde 1973 a 1996. Las líneas verticales son puentes y estructuras existentes en la actualidad.

Para cuantificar este análisis, se ofrece la tabla 3. Para elaborarla, se traza la recta de menor error cuadrático de los datos de la fig.3, que representaría una estimación del fondo de equilibrio en los años 1910-1930 (para abreviar diremos 1920). Con esta recta se deducen los descensos totales habidos hasta 2002 en cuatro puntos principales: puente de la carretera N-II, puente de Tordera, estación de Can Serra y puente de la autopista A7 (primera columna de la tabla 3). A continuación se anotan los descensos en los puentes entre 1920 y 1973, entre 1973 y 1987 y los descensos en el periodo de 1987 a 2002. Cada uno de estos últimos periodos es de 15 años. El puente de la carretera N-II data de hacia 1930 y el de la autopista A7 data de 1971.

En cuanto a la parte superior del río, la cota de 1973 es prácticamente la misma que la de 1987. Asimismo, se han representado los tres puntos de 1924 en esta zona (fig.4) para evidenciar que también la cota es la misma. Se concluye que en la zona alta no habría habido erosión hasta 1987 por lo menos. En cuanto a la parte inferior del río, los datos de la tabla 3 se pueden comparar con las siguientes observaciones de campo:

INCISIÓN, EROSIÓN TRANSITORIA Y FORMAS DE FONDO EN LOS TRAMOS MEDIO Y BAJO DEL RÍO TORDERA

a) La estación de aforos de Can Simó, construida a principios de los años 90, se encuentra hoy elevada 1,60 m sobre el cauce de aguas abajo, debido a la erosión general. Esta erosión general aguas abajo ha aumentado la altura del salto de agua en la estación, lo que ha contribuido a aumentar la erosión local al pie de la estructura (fig.5).



Figura 5. Foto de la estación de aforos de Can Simó el año 2002. Obsérvese la gran erosión local debida al salto de agua, inducido por la erosión general

b) La estación de Can Serra se asienta en una construcción antigua de 1898, cuya cimentación original se encuentra hoy a unos 3 m por encima del cauce. En el mismo lugar, la administración de aguas estimó un descenso del cauce del orden de 1 m a lo largo de los años 70. Asimismo, analizando los datos entre 1986 y 2002 se deduce un descenso medio del cauce de 0,57 m.

c) El puente de la carretera N-II (construido no más tarde de 1934) ofrece la evidencia más clara de la incisión del río porque la distancia desde la pila del puente propiamente dicha (distinta de su cimentación) hasta el cauce aluvial es de unos 2,5m (fig.6).



Figura 6. Erosión general del cauce aluvial en una de las pilas del puente de la carretera N-II entre los núcleos de Malgrat de Mar y de Blanes (2002).

Las incisiones totales observadas en el campo en el puente N-II y en Can Serra concuerdan bastante bien con las obtenidas independientemente a partir de información topográfica en la tabla 3. Las incisiones parciales en Can Serra en las últimas décadas (1.0 m y 0.57 m) podrían completar coherentemente la línea que falta en dicha tabla.

Localización	1920 - 2002	1920 - 1973	1973 - 1987	1987 - 2002
Puente N-II	2,5	0,4	1,7	0,4
Puente Tordera	3,1	0,3	1,8	1,0
Can Serra	2,9	-	-	-
Puente A-7	3,2	0,0	1,5	1,7

Tabla 3. Descensos en el río Tordera (en metros) a lo largo del siglo XX en 4 puntos característicos. Se indican las diferencias de cota al cabo de distintos periodos, en puentes y estaciones de aforo, obtenidas a partir de datos topográficos.

Causas de la incisión

Son diversas las causas que permiten explicar el proceso de erosión general e incisión del tramo bajo del río Tordera. A continuación se identifican y discuten las principales. En orden cronológico los sucesos más importantes de la segunda mitad del s.XX son (Gutiérrez, 1997; Pedraza 1998):

- 1958: comienzan las extracciones de áridos (pequeños volúmenes porque la maquinaria es rudimentaria y la demanda pequeña).
- 1960-68: grandes extracciones de áridos, especialmente hacia el final del periodo.
- 1962 (11 y 12-X): avenida que inunda Tordera, la primera importante desde 1943.
- 1965 (7 al 9-X): avenida con el máximo caudal registrado en Sant Celoni: 213 m³/s.
- 1968: la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental prohíbe toda extracción de áridos en el cauce y cerca de él.
- 1968: comienzo de la construcción de la autopista Barcelona-La Jonquera (A7).
- 1969: avenidas en abril (mayor) y octubre (menor).
- 1970-71: proyectos y obras numerosos de reparación y reposición de defensas, suscitados por las avenidas de 1969; entre ellos se estrecha el cauce aguas abajo del puente de la N-II.
- 1971 (20 y 21-IX): la mayor avenida que se recuerda en el río (ca 300 m³/s en Sant Celoni); entre otros se pierde el puente de la autopista A7.
- 1971: para financiar los proyectos de reparación de defensas, se vuelve a dar permisos de extracción de áridos, muy a menudo a cambio de colocación de escollera en las márgenes.

- 1972-75: extracción de áridos (hasta 104.000 m³) en el brazo izquierdo de la isla de Tordera.
- 1975-80: grandes extracciones de áridos.
- 1976: en este contexto, acondicionamiento y limpieza del brazo derecho de la isla de Tordera (>40.000 m³ de material extraído).
- 1979: comienzan las dos mayores extracciones de áridos, aguas abajo y aguas arriba del puente de la carretera NII, evaluadas al cabo de 9 años de explotación en unos 2 millones de m³.
- hacia 1979-81: obras de encauzamiento en la zona de la isla de Tordera.
- 1982 (15 a 17-II): la segunda avenida en importancia, seguida de otra en marzo y otra en noviembre.
- 1982-83: gran número de proyectos y obras de reparación.
- 1988: prohibición de las extracciones de áridos dentro y fuera del cauce.
- 1992: construcción de la estación de aforos de Can Simó.
- Años 90: protección de la cimentación del puente de la autopista A7.

Como causas del fuerte descenso del fondo del río Tordera en el periodo 1960-2000 pueden citarse al menos las siguientes: 1) los cambios en el uso del suelo de la cuenca, 2) las extracciones de áridos y 3) las obras de encauzamiento y las obras viarias que han ocupado parte del espacio fluvial. Todas ellas presentan el común denominador del desequilibrio sedimentario. Las avenidas en el mismo periodo podrían considerarse más bien como los agentes capaces de producir cambios en poco tiempo, pero señalemos igualmente que los cambios de perfil (y la incisión de un río) pueden estar más relacionados con su caudal dominante que con las avenidas.

Se ha calculado el caudal dominante por medio del concepto de caudal de cauce lleno, pese a las fuertes incertidumbres causadas por la intervención antrópica en el río. Para el cálculo se ha realizado la topografía de 26 secciones transversales del cauce principal actual para determinar el caudal que llena el cauce (Rovira, 2001). Por otro lado se usan los datos de caudal medio diario de una serie 60 años en Sant Celoni (fig.1) para obtener caudales de periodos de retorno pequeños, los cuales se extienden a lo largo del río admitiendo una proporción entre el caudal y el área contribuyente elevada a la potencia $\frac{3}{4}$ (Leopold et al. 1964). Es de destacar los distintos periodos de retorno que resultan para el caudal dominante (de cauce lleno): para el tramo medio 2,5 años y para el tramo bajo 1,5 años.

Volviendo a las causas de la incisión, los cambios de uso del suelo merecerían una investigación más profunda. Es posible que el abandono de tierras agrícolas y el avance de la superficie arbolada haya producido en las últimas décadas un déficit de material sólido en los ríos de la cuenca.

Las obras de encauzamiento y las obras viarias han tenido sin duda un efecto sobre el equilibrio del río. Recordemos que el estrechamiento de un cauce induce una erosión general en el tramo estrechado, que se propaga hacia aguas arriba en principio indefinidamente. Por ejemplo, como se ha indicado, en 1970-71, hacia la coordenada 6.000 (aguas abajo del puente de la N-II) una longitud de 2000 m de cauce vio reducida su anchura de 240 a 140 m. Si suponemos avenidas de 3 m de calado antes de las obras de estrechamiento, se predecirían erosiones del orden de 1.30 m usando una expresión de erosión de equilibrio en estrechamientos largos (Martín-Vide 2002). Estas erosiones son las de equilibrio si la acción es duradera. Los agentes en estos procesos de erosión son las avenidas que hubieran ocupado en condiciones normales la anchura completa y que se ven ahora constreñidas a circular por el cauce estrechado. Ahora bien, la duración real de estas avenidas no es indefinida como para considerar que se alcanza la erosión de equilibrio, aunque una serie de avenidas puede producir el mismo resultado por la acumulación de efectos; a este respecto es necesario recordar el gran número de avenidas en los años 60 (aunque se producen antes de las obras que hemos mencionado) y las grandes avenidas de 1971 y 1982.

Es interesante ver la evolución temporal del fenómeno de erosión general del río Tordera, resumido en los descensos en los puentes (tabla 3). En los 15 años de 1973 a 1987, época de enormes extracciones de áridos y cuando ya estaban ejecutadas las obras señaladas, se tienen los mayores descensos. Nótese que el orden de magnitud de los descensos es semejante al calculado más arriba como efecto de las obras de estrechamiento. En los siguientes 15 años, parece claro que el proceso sigue activo en la parte aguas arriba del tramo bajo (zona del puente de la autopista A7 y hasta la estación de Can Simó), pero parecería casi frenada aguas abajo (puente N-II). Incluso en la desembocadura parece haber indicios (informaciones verbales) de una subida de la cota del lecho.

La acción de extracción de material suelto (áridos) en el cauce del río causa un déficit de transporte sólido hacia aguas abajo y un descenso del nivel de base hacia aguas arriba. Por ello la erosión general que se produce se propaga, a diferencia del estrechamiento, en las dos direcciones: aguas arriba y aguas abajo. También a diferencia del estrechamiento, no es necesario pensar en las avenidas como agente exclusivo de estos cambios, sino que caudales menores pueden también ser importantes. En ocasiones, las extracciones en el río Tordera se han hecho restando en primer lugar un área al río, para luego excavar en ella, fuera del nuevo cauce estrechado. En este caso, las obras y las extracciones serían una misma acción.

Cuando la acción es la extracción de áridos, es posible que a medio o largo plazo el proceso se frene o incluso se invierta, si el río aporta suficiente material sólido. A este respecto el tramo bajo del Tordera puede considerarse como un almacén del material arenoso de dos afluentes principales: Arbúcies y Santa Coloma (Batalla et al, 1995). Nótese también que el descenso de cotas de fondo en el río induce un aumento de pendiente en los afluentes (por descenso de su nivel de base en su desembocadura), descenso comprobado por ejemplo en los puentes de la riera de Arbúcies. Este aumento de pendiente incrementa la capacidad de transporte de los afluentes, es decir es como si, hipotéticamente, la red de drenaje reaccionara intentando aportar más material sólido al río principal que sufre el descenso.

La acción conjunta de las obras y de las extracciones de áridos no permite distinguir sus efectos en el proceso de erosión general por separado. La opinión general indica que son las extracciones de áridos la causa principal de la erosión en el río, quizá porque su efecto parece obvio. Si ésta es la causa principal podemos tener una mayor esperanza en la recuperación del río.

Análisis de la erosión transitoria

El caudal máximo en el periodo entre junio-97 y junio-99, de 77 m³/s, y el máximo del periodo de junio-99 a julio-02, de 206 m³/s, se utilizan para deducir la erosión transitoria por distintos métodos y poderla comparar con la medida en campo. Los métodos consisten en comparar la velocidad media del flujo con una velocidad de equilibrio del fondo en presencia de transporte sólido. Si la primera es mayor que la segunda, el fondo descendiendo tanto como sea necesario para igualarlas,

ya que el significado de "equilibrio" es el de un flujo que mantiene el fondo en una posición fija (es decir es incapaz de seguir causando erosión del fondo). El método de Lischtvan-Lebediev puede resumirse en la siguiente expresión (Schreider et al, 2001):

$$y' = 0.333 q^{0.710} D^{-0.199} \quad (1)$$

donde y' es el calado erosionado (en m), q el caudal unitario (velocidad por calado, o bien caudal total dividido por anchura, en m²/s) y D el tamaño de grano característico, en m (aquí usamos D_{50}). La erosión es el calado erosionado menos el calado inicial, $e = y' - y$. También usamos un segundo método, llamado "de velocidad crítica y agua clara" (Martín-Vide, 2002), más apropiado en principio para cauces de gravas, que consiste en suponer que la velocidad de equilibrio es igual a la velocidad de principio del movimiento, como si no hubiera transporte sólido. El principio del movimiento es también llamado condición crítica del fondo y el hecho de suponer que no hay transporte sólido se conoce como hipótesis de agua clara; de ahí el nombre del método. Este método se puede resumir en la fórmula siguiente para la velocidad crítica (en m/s):

$$v_{cr} = 21 (R_h/D_{84})^{1/6} (0.0924 D_{84})^{1/2} \quad (2)$$

donde R_h es el radio hidráulico (en m) y D_{84} es el diámetro (en m) tal que el 84% del material de la muestra es más fino.

Después del reconocimiento de campo de 1999 de los testigos de carbón, sólo la primera sección (sección A, fig.1) había tenido una erosión transitoria apreciable, de 69, 67, 40 y 72 cm en sus 4 testigos. Después de la segunda campaña de 2002, en la misma sección es donde se han encontrado las erosiones transitorias más importantes de 103, 106, 78 y 18 cm. En la fig. 7 se representa esta sección, en la que se dibujan los perfiles topográficos de 1997, 1999 y 2002 y la altura de columna de carbón que ha desaparecido en cada uno de los dos periodos (las cifras anteriores). Puede observarse que el nivel medio del fondo antes y después de las crecidas (o al principio y fin de los periodos) es semejante, a pesar de las irregularidades. Esta condición está favorecida en el caso de la sección A por la solera de hormigón de la estación de Can Simó, situada a unos 200 m aguas abajo. Obsérvese también la asimetría de la sección debido a estar en una curva (el lado exterior, margen izquierda, es más hondo). Los resultados de la aplicación de los métodos de cálculo de la erosión general transitoria, en comparación con estos datos de campo se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación entre erosiones transitorias medidas y calculadas en el tramo bajo del río Tordera entre 1999 y 2002.

Lugar		Erosión por	Lischtvan-	vel.cr.y	Erosión por	Lischtvan-	vel.cr.y
sección	punto	carbón 97-99 (m)	Lebediev (m)	agua clara (m)	carbón 99-02 (m)	Lebediev (m)	agua clara (m)
1	1	0,69	0,19	0	1,03	0,58	0
	2	0,67			1,06		
	3	0,40			0,78		
	4	0,72			0,18		

En la tabla hay un solo valor calculado para todos los puntos de una sección, cada uno de los cuales es una columna de carbón, porque no tenemos datos de campo de la distribución transversal del caudal unitario (o de la distribución de las velocidades) en las crecidas, sino sólo del caudal total. Para el cálculo se ha supuesto un régimen uniforme, con los coeficientes de Manning consistentes con el resto del trabajo. Obsérvese que las erosiones medidas en el segundo periodo son mayores que las del primero. Salvando la contribución de la curvatura del emplazamiento en la erosión, puede considerarse que el método de Lischtvan-Lebediev ofrece pronósticos de erosión general transitoria bastante correctos. No obstante, los resultados son inferiores a las observaciones, lo que concuerda con Schreider et al (2001) quienes señalan que el método subestima la erosión general con transporte de sedimentos cuando el calado es inferior a 5 m. El método de velocidad crítica y agua clara, por su parte, daría siempre resultado nulo. Por tanto, este método queda por debajo de la realidad y no sería aplicable a un río como el Tordera en su tramo bajo, caracterizado por un tamaño medio del orden de 2-3 mm.

Análisis de las formas de fondo

Se presenta en este apartado un análisis de sucesos de avenida, de los que se desprende la constatación del efecto de las formas de fondo sobre la resistencia al flujo. El análisis se basa en la hipótesis de que el caudal medido en Can Simó es el mismo que el que circula poco más tarde por Can Serra. Por tanto se supone que: 1) no hay aportaciones intermedias entre una y otra estación; 2) no hay laminación apreciable entre una y otra estación, distantes 3.5 km, es decir no hay capacidad de almacenamiento entre ellas (ya que no hay desbordamiento sobre la llanura de inundación en los sucesos analizados, porque el río está encauzado con un cauce de gran capacidad) y 3) no hay infiltración apreciable en el cauce entre una y otra estación. Esta última hipótesis es la más difícil de admitir atendiendo al carácter permeable del lecho aluvial del tramo bajo de la Tordera. Se admite,

pues, que el hidrograma de Can Simó es el mismo de Can Serra con la debida traslación temporal.

Al conocer el caudal y el calado a lo largo de una crecida en Can Serra (hidrograma y limnigrama), se deduce por cálculo el valor del coeficiente de rugosidad de Manning, que llamaremos “observado”, a lo largo del tiempo. En este cálculo se emplea la fórmula de Manning y un valor invariable de la pendiente (0,24%). Como referencia, el valor del coeficiente de rugosidad debida al grano es $n_0=0,019$, según la fórmula de Strickler a partir del D_{50} en la sección de Can Serra. Si el calado en Can Serra fuera menor que el explicable por la fórmula de Manning con $n_0=0,019$, sería necesario suponer que simultáneamente existiría un descenso del fondo (erosión general transitoria) que contribuye a dar más área de flujo; este hecho se manifestaría en valores “observados” de n bajos, menores que n_0 . Si, por el contrario, el calado en Can Serra fuera mayor que el explicable por la fórmula con $n_0=0,019$, sería necesario suponer la presencia de formas de fondo que incrementan la rugosidad; esto se manifestaría en valores “observados” de n altos, mayores que n_0 .

El suceso del 16-I-2001 se considera el más preciso porque se conoce bien el cero de los niveles. Además es un suceso muy conveniente porque la forma de los limnigramas es muy aguda. La traslación temporal se efectúa simplemente llevando a coincidir los picos del hidrograma y el limnigrama. La fig. 8 es el resultado del cálculo: se representan en una sola figura temporal los limnigramas en Can Simó y Can Serra, que son ambas medidas de campo en dichas estaciones de aforo, y el valor deducido del coeficiente de rugosidad de Manning (n), comparado con el valor de la rugosidad debida al grano ($n_0=0,019$). El limnigrama de Can Simó se dibuja antes de la traslación temporal. Obsérvese que el diagrama del coeficiente n de Manning está en sincronía con el limnigrama en Can Serra. La rugosidad n se encuentra siempre muy por encima de 0,019, con valor promedio de 0,042 y máximo de 0,055. Se observa también una correspondencia entre las fases de la crecida y las fases de la variación de n : subida rápida y descenso suave.

La conclusión global es que las formas de fondo son muy importantes en el río Tordera. A propósito de esta conclusión, se ha aplicado el método de Alam y Kennedy (Garde y Ranga Raju, 1977) de estimación de la rugosidad combinada de grano y formas de fondo en lechos aluviales.

INCISIÓN, EROSIÓN TRANSITORIA Y FORMAS DE FONDO EN LOS TRAMOS MEDIO Y BAJO DEL RÍO TORDERA

Para el suceso del 16-I-2001 resultaría un coeficiente 0,042 al principio de la crecida, 0,046 en el pico y 0,044 al final de la crecida, sólo ligeramente menor que los coeficientes observados (cuya media era 0,042).

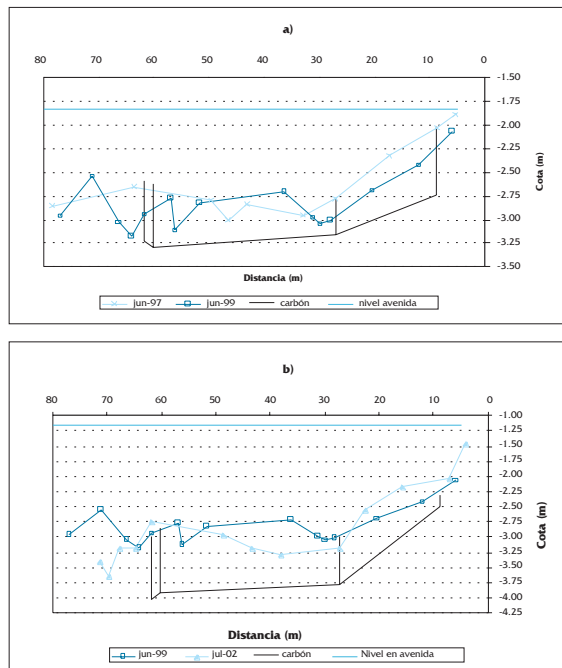


Figura 7. Perfiles transversales de la sección A al inicio y final del periodo (a) Junio de 1997-Junio de 1999 (arriba) y (b) Junio de 1999-Julio de 2002 (abajo). Entre el inicio y el final hay zonas de erosión y otras de sedimentación. En trazo grueso vertical se señalan las columnas de carbón desaparecidas y repuestas (erosión transitoria). Se dibuja la superficie libre del agua calculada aproximadamente desde la condición de contorno de la estación de aforos de Can Simó, que se encuentra a unos 200 m aguas abajo, para la máxima avenida de cada periodo. Las cotas son relativas al punto de estacionamiento topográfico. La margen derecha se dibuja a la derecha del gráfico.

El valor medio del coeficiente de rugosidad de este suceso, $n = 0,042$, se ha usado en el apartado anterior para el análisis de los datos de los testigos de carbón. Obsérvese por otra parte que en el análisis de este apartado se ha supuesto que el fondo no se erosiona. Si se hubiese rebajado el fondo según el método de Lischtvan-Lebediev, los coeficientes de rugosidad necesarios para explicar los niveles de agua en Can Serra habrían resultado todavía más elevados. Entonces se produce la paradoja de que con tales coeficientes el método de Lischtvan-Lebediev habría dado erosión menor o incluso nula. Esto nos haría dudar de la erosión transitoria, pero en la fig. 7 observamos que la pérdida de partes de la columna de carbón

no puede explicarse por ejemplo por los cambios accidentales de posición del cauce principal del río, sino por un fenómeno diferente que hizo descender el fondo en toda la sección de una manera general y que asociamos con el suceso máximo en el periodo (16-I-2001).

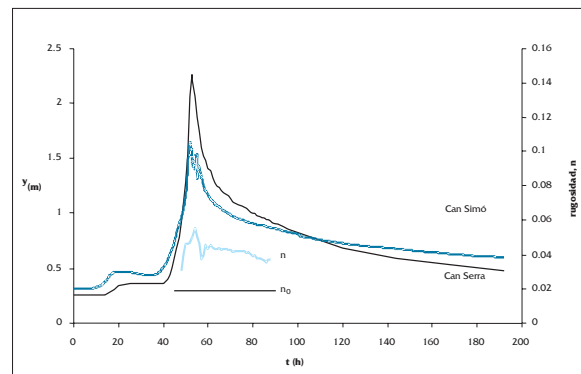


Figura 8. Niveles de lámina de agua (y) y valores del coeficiente de rugosidad (n) en la crecida del 16-I-2001 en la estación de aforos de Can Simó. El cero temporal son las cero horas del 14 de enero de 2001.

Teniendo en cuenta que la erosión general transitoria es real, pero que también son reales los valores máximos de n y que éstos indican la presencia de “grandes” formas de fondo, la paradoja se puede resolver si la erosión del fondo es el producto del movimiento de las formas de fondo. El movimiento hacia aguas abajo de las dunas causaría, al pasar el valle de la duna por los puntos de medida (columnas de carbón), una erosión igual a la altura de duna con respecto al plano de las crestas, o igual a la mitad de la altura de duna con respecto al plano medio del fondo. En la fig.9 se muestra un esquema para ilustrar la idea. Estos descensos del fondo serían sin embargo escasos comparados con los medidos. Por tanto habría que admitir que también el nivel medio del fondo descende (además de ondularse), es decir que existe una erosión general. Este hecho exigiría dunas un poco mayores para alcanzarse los valores de n necesarios según los niveles medidos. Con esta explicación se hace compatible la erosión general y las formas de fondo.

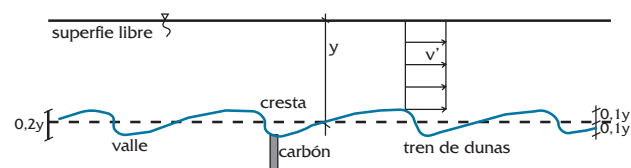


Figura 9. Esquema de forma del fondo y flujo en una duna, para explicar conjuntamente las interacciones entre el nivel, el caudal y la erosión del fondo en un lecho fluvial.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se derivan de este estudio son:

- se ha constatado la peculiar composición granulométrica del río, que pasa en pocos kilómetros de ser esencialmente un río de gravas gruesas (la coraza) y finas (el material bajo la superficie, de 7 mm) en el tramo medio, a ser uno de arenas gruesas (2 mm) en el tramo bajo.
- se ha probado que el cauce desde el puente de la autopista A7 hasta el mar ha descendido de 2,5 a 3,2 m en los últimos 40 años. Se trata de una erosión permanente o acumulada a lo largo de los años. Si bien no se puede afirmar que el proceso de descenso (incisión) haya terminado, sería lógico esperar que la prohibición de las extracciones de árido invierta la tendencia en el futuro, ya que ésta ha sido una de las causas probables (aunque no la única) de este fenómeno en los últimos 30 años.
- se ha probado que el cauce puede experimentar erosiones generales transitorias importantes en crecidas; de hecho con la avenida de enero de 2001 se ha encontrado una fluctuación del fondo superior a 1m en algunos puntos del cauce bajo. Estos datos permiten proponer ecuaciones de cálculo de la erosión transitoria, como la de Lischtván-Lebediev.
- los tramos arenosos del río desarrollan en crecida formas de fondo que pueden elevar su coeficiente de rugosidad de Manning por encima de 0,040.

Finalmente, sería de mucho interés observar la evolución futura del río Tordera en cuanto a la movilidad que ha sido nuestro objeto de estudio, en particular la evolución de la erosión general y la transitoria. Gracias a las instalaciones existentes y usadas en este estudio (columnas de carbón, estaciones de aforo), el río Tordera se podría constituir en un cauce de estudio de fenómenos de movilidad aluvial.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de los señores Lorenzo Correa, Lluís X. Godé y Enrique Velasco, de la Agencia Catalana de l'Aigua, y de Eduardo García, M^aCarmen Molina y Allen Bateman.

LISTA DE SÍMBOLOS

D_x	tamaño característico del material aluvial tal que el x% de la muestra es más fino
n	coeficiente de rugosidad de Manning
q	caudal unitario (por unidad de anchura)
R_b	radio hidráulico (área de flujo /perímetro mojado)
v_{cr}	velocidad crítica o de inicio del movimiento de un fondo aluvial
y	calado del flujo
y'	calado erosionado
σ	desviación típica granulométrica $(D_{84}/D_{16})^{1/2}$

REFERENCIAS

- Ackers, P., White, W.R., Perkins, J.A., Harrison, J.M. (1978) "Weirs and flumes for flow measurement". John Wiley and sons, Chichester.
- Batalla, R.J. (1997): "Evaluating bed-material transport equations using field measurements in a sandy gravel-bed stream (Arbúcies, NE Spain)". *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 2, 121-130
- Batalla, R.J. Martín-Vide, J.P. (2001) "Thresholds of particle entrainment in a poorly sorted sandy gravel-bed river". *Catena* 44, 223-243
- Batalla, R.J., Sala, M., Werrity, A. (1995): "Sediment budget focused on solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29, 2, 249-264
- Church, M.A., McLean, D.G. & Wolcott, J.F. (1987): "River bed gravels: sampling and analysis". A: Thorne, C.R., Barthurst, J.C. & Hey, R.D. (eds.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons, 43-88
- Garde, R.J., Ranga Raju, K.G (1977) "Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems". John Wiley and sons, New York 1977.
- Gutiérrez, C. (1999) "La Tordera. Perspectiva geograhicohistòrica d'un riu". Publicacions de la rectoria vella. Sant Celoni.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964) "Fluvial processes in geomorphology". Dover Publications, New York.
- Martín Vide, J.P. (2002) "Ingeniería fluvial". Edicions UPC, Barcelona 1997 e "Ingeniería de ríos", Edicions UPC, Barcelona 2002.
- Pedraza, P. (1998) "Estudio de la erosión general en el río Tordera". Tesina de especialidad, Escuela T.S. de Ing. de Caminos, UPC.
- Rovira, A. (2001) "Balanz de sediment i dinàmica fluvial en un riu de règim hidrològic transitori (tram final de la Tordera)". Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona.
- Sala, M. (1978) "La cuenca del Tordera. Estudio geomorfológico". Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- Schreider, M., Scacchi, G., Franco, F., Fuentes, R., Moreno, Ch. (2001) "Aplicación del método de Lischtván y Lebediev al cálculo de la erosión general". *Ingeniería hidráulica en México*, XVI,1, pp.15-25.
- Wolman, M.G. (1954) "A method of sampling coarse bed-material". *American Geophys. Union Trans.*, 35, 951-956.