

ESTUDIO DE LA DINÁMICA MORFOLÓGICA DEL RÍO FLUVIÀ. ALCANCES Y MÉTODOS FRENTE A LA ESCASEZ DE DATOS

• Juan Pedro Martín-Vide •

Universidad Politècnica de Catalunya, España

• Eduard Rodríguez-Máñez •

Universidad Politècnica de Catalunya y ABM Serveis d'Enginyeria i Consulting, S.L., España

• Carles Ferrer-Boix • Francisco Núñez-González •

Universidad Politècnica de Catalunya, España

• David Maruny-Vilalta •

ABM Serveis d'Enginyeria i Consulting, S.L., España

Resumen

La dinámica de las formas fluviales (morfodinámica) tiene cada vez más presencia en la planificación de los ríos, pero sus objetivos, alcance y métodos no están consolidados. El río Fluvià en Cataluña (NE de la península Ibérica) tiene una notable movilidad y en él se planea la restauración de meandros cortados por canalizaciones. Este artículo explica en qué consistió el estudio morfodinámico de dicho río, teniendo en cuenta los escasos recursos que se pudieron emplear. Con granulometría y análisis de formas fluviales en el campo, con cartografía y fotografía aérea, y con unas pocas batimetrías, se ha analizado el perfil longitudinal del río, el papel de algunas presas derivadoras en la dinámica fluvial, la disponibilidad de gravas en las barras aluviales del cauce, el movimiento de los meandros y la capacidad de transporte sólido de fondo. También se ha analizado un episodio singular de corte de meandros y cuáles son los riesgos morfodinámicos de una restauración.

Palabras clave: morfodinámica fluvial, río Fluvià, restauración de ríos, transporte sólido, transporte de fondo, sedimento, meandro, corte de meandros.

Introducción

La planificación de los espacios fluviales por las administraciones hidráulicas de la península Ibérica incorpora, cada vez con más frecuencia, el estudio de la dinámica de las formas fluviales o “morfodinámica”, entendiendo por tal el análisis de los cambios que experimentan las formas y dimensiones del río, en planta, sección y perfil. Este capítulo de morfodinámica aplicado a las fases de diagnóstico, pronóstico y propuestas de actuación en los ríos no está asentado en

la práctica profesional de la ingeniería y la ordenación del territorio, como sí lo está el capítulo hidrológico (hidrogramas...), hidráulico (áreas inundables...) y ecológico. Por otro lado, es más específico y tiene un carácter más cuantitativo que un capítulo de geomorfología.

El conocimiento en morfodinámica se aplica en muchas cuestiones prácticas, como en el análisis del riesgo de fallo de infraestructuras (puentes, conducciones enterradas...); el riesgo de erosión en curvas y orillas (como en Alvarado-Ancieta y Ettmer, 2008), con la consiguiente

pérdida de terreno; la erosión general a largo plazo (incisión); la estabilidad fluvial en planta, perfil o sección; la sedimentación de embalses; el crecimiento de deltas; la calidad del hábitat para las especies que viven en el río; la restauración de ríos; la delimitación del espacio fluvial, etcétera. Como contexto de la materia de la que estamos hablando e ilustración de casos de estudio, sirve la publicación de Klingeman *et al.* (1998).

El río Fluvià, situado en el norte de Cataluña (NE de la península Ibérica), tiene una cuenca de 1 125 km² que carece prácticamente de regulación hidrológica. La presión antrópica es baja, en comparación con otras cuencas. Tiene instalados numerosos saltos hidroeléctricos pequeños, de principios del siglo XX, en los tramos alto y medio, pero lo más destacado es que en los últimos 45 km de longitud (tramo bajo) hasta su desembocadura en el mar, el cauce tiene una gran movilidad. Unos pequeños incidentes han puesto de manifiesto esta movilidad en los últimos años: en 2002 se abrió un nuevo brazo que dejó fuera de servicio la presa derivadora de un salto hidroeléctrico y en 2006 cayó una torre eléctrica de alta tensión por erosión de orilla. La figura 1 ilustra los efectos de esta movilidad. En 2008, la administración hidráulica (la

Agencia Catalana del Agua) lanzó los trabajos de planificación del río Fluvià, que cuentan con un capítulo de morfodinámica. En la motivación para este capítulo, la Agencia consideraba al Fluvià como un río apto para la recuperación de procesos de morfodinámica y para la restauración fluvial, fijándose en especial en los meandros cortados por obras de canalización realizadas en 1971, a unos 4 km del mar, y en 1987, a unos 8 km del mar.

Estas expectativas sobre el río (su movilidad, la voluntad de restaurar...), la extensión de su red hidrográfica y los recursos económicos disponibles, necesariamente limitados, hicieron de este trabajo un desafío intelectual: entender los procesos morfodinámicos a lo largo de muchos kilómetros de río y varios afluentes mayores, contando con poca información. Este artículo trata de los objetivos formulados, los métodos, los resultados obtenidos y su discusión, esperando que este ejercicio sea útil para estudios del mismo tipo en otros ríos.

Objetivo y métodos

El propósito de entender la dinámica fluvial del río se ha dividido en dos objetivos más específicos:



Figura 1. Signos de la dinámica fluvial en el bajo Fluvià. A la izquierda, una gran barra formada en 2002 en un nuevo brazo, que dejó fuera de servicio una pequeña presa derivadora (azud). A la derecha, la orilla opuesta y erosionada en material fino (fotos tomadas el 29 de enero de 2009).

1. Un diagnóstico y pronóstico del transporte sólido grueso del río, es decir, el originado en los cauces y depósitos aluviales, distinguiendo el papel que pueden desempeñar en él los embalses de los pequeños saltos hidroeléctricos. El material fino con origen en la cuenca no se estudia, porque no tiene repercusión en las formas fluviales, a diferencia del grueso. Este primer objetivo se formula a pesar de que no existen estaciones hidrométricas con medidas de este tipo ni dato alguno de transporte sólido.
2. El pronóstico de cómo evolucionaría la restauración de los meandros canalizados.

En cuanto a metodología, en el primer objetivo (transporte sólido), una notable colección de fotografías aéreas (1957, 1971, 1987, 1996, 2002 y 2008) ha permitido identificar y evaluar las fuentes de sedimento grueso, especialmente las barras en los cauces activos. Los depósitos aluviales sin vegetación, que se distinguen por su color claro en contraste con el más oscuro de la vegetación, son los que han participado en el transporte sólido en la época de cada foto. Su superficie sirve, por tanto, de medida de la actividad de transporte sólido en potencia en cada época. En cuanto a los pequeños embalses, sólo se dispone de dos batimetrías de poco detalle de las dos mayores presas derivadoras.

Para el segundo objetivo (restauración) se ha explorado la información de archivo sobre el río antes y después de las obras de canalización de 1971 y 1987, cuyo objetivo fue luchar contra las frecuentes inundaciones, así como suprimir la movilidad en planta del cauce. Por eso, el análisis de la movilidad del cauce desde una cartografía de 1945 hasta hoy —mediante las fotografías aéreas citadas antes— a lo largo de los 45 km del tramo bajo del río, volcando y georreferenciando toda la información en un Sistema de Información Geográfica (SIG), ha sido central en el trabajo. La zona donde se produjeron los incidentes de 2002 y 2006 mencionados se ha estudiado con más detalle.

A estos trabajos de gabinete se suma el trabajo de campo posible en el plazo y con los recursos del proyecto: el análisis granulométrico del lecho y la caracterización de las formas fluviales visibles (barras). En los siguientes apartados se verá cómo se utilizan estas informaciones de campo, junto con las geográficas, batimétricas, morfológicas, hidrológicas, sobre la vegetación y sobre el transporte sólido, para componer el cuadro del comportamiento morfodinámico del río Fluvìà.

Granulometría y perfil longitudinal

El primer resultado del trabajo, el más básico, es precisamente la granulometría del lecho. Se ha seguido el criterio de averiguar la granulometría de los afluentes más importantes cerca de su desembocadura en el río y, para el propio río, conocerla en puntos más o menos equidistantes. Las catas se abren cerca del cauce ocupado por el agua, con retroexcavadora. La profundidad de muestreo típica es de 1.5 m. El peso mínimo de la muestra es de cien veces el peso de la partícula más grande encontrada en la cata, pero las partículas mayores de 125 mm se miden y pesan *in situ*. La magnitud del trabajo se puede cifrar en la suma de pesos de muestra: 5.4 toneladas, y en el número de grandes partículas medidas *in situ*: 388. En la figura 2 se representan los 15 puntos de muestreo. En los puntos de mayor movilidad (3, 4 y 4bis) hay en realidad seis catas en total, como veremos. Los resultados en cuanto a la media de la distribución granulométrica D_{50} y a una medida representativa de la parte gruesa, concretamente el percentil 90% (D_{90}), se muestran en el cuadro 1.

El perfil longitudinal del río Fluvìà, elaborado con un modelo digital del terreno de 2003 de resolución 1 x 1 m, se presenta en la figura 3. Una colada basáltica atravesada por el río explica la pendiente tan elevada en el tramo comprendido entre el km 70 y el km 80, contando desde el mar, y la escasa pendiente en el tramo superior siguiente. En el otro extremo, en los últimos kilómetros, el fondo está bajo el

Cuadro 1. Resultados granulométricos.

Núm.	1	2	3	4	4bis	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
D_{50} (mm)	14	37	21	22	35	48	35	22	22	37	27	67	36	39	40
D_{90} (mm)	55	98	91	113	185	207	95	122	142	136	164	206	217	253	135
i (%)	0.19	0.19	0.25	0.25	0.27	0.46	0.40	0.41	0.57	0.64	0.79	1.85	0.74	0.49	

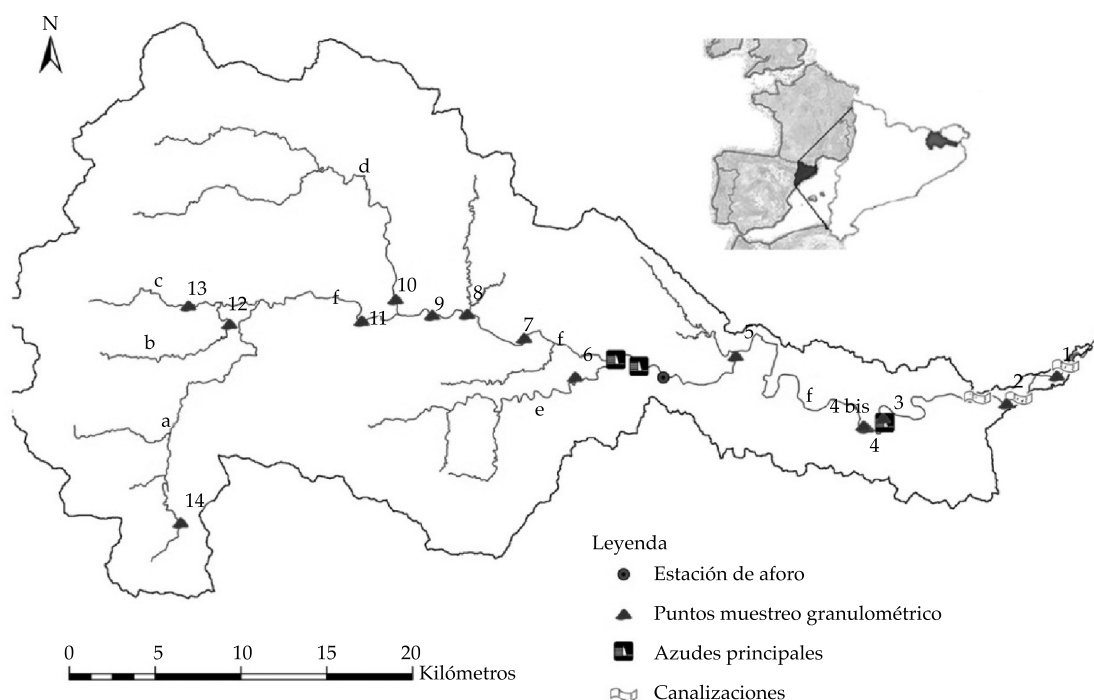


Figura 2. Puntos de muestreo, numerados del 1 al 14, del material aluvial en el río Fluvià y sus principales afluentes sobre la planta de la cuenca. Se señalan también otros lugares mencionados en el texto. Para la toponimia (a, b,...), ver la Nota final.

nivel del mar por la excavación realizada en las canalizaciones. Entre el km 5 y el km 35, el perfil es casi recto (pendiente constante de $\approx 0.25\%$). Se distinguen en todas partes muchos pequeños saltos, pero sobre todo en el km 45 uno de 8.3 m construido en 1925, y en el km 47 uno de 6.9 m de 1929, que son las dos mayores presas hidroeléctricas con batimetría de sus embalses.

En la figura 3 se representan también D_{50} y D_{90} (datos del cuadro 1). Además de la relación entre afluentes y río principal,

lo más destacable es el cambio de valores, de menor a mayor, una vez pasadas las dos presas derivadoras más grandes. Esto podría ser indicativo de un proceso de erosión aguas abajo de las presas, compensado por un acorazamiento del lecho (Maza-Álvarez, 1997). En segundo lugar, se distingue un suave decrecimiento, más visible en D_{90} que en D_{50} , en cada uno de los grupos de datos (aguas arriba y abajo de las dos presas más grandes). El cociente entre la pendiente (i , cuadro 1) y el tamaño D es un índice de la sensibilidad

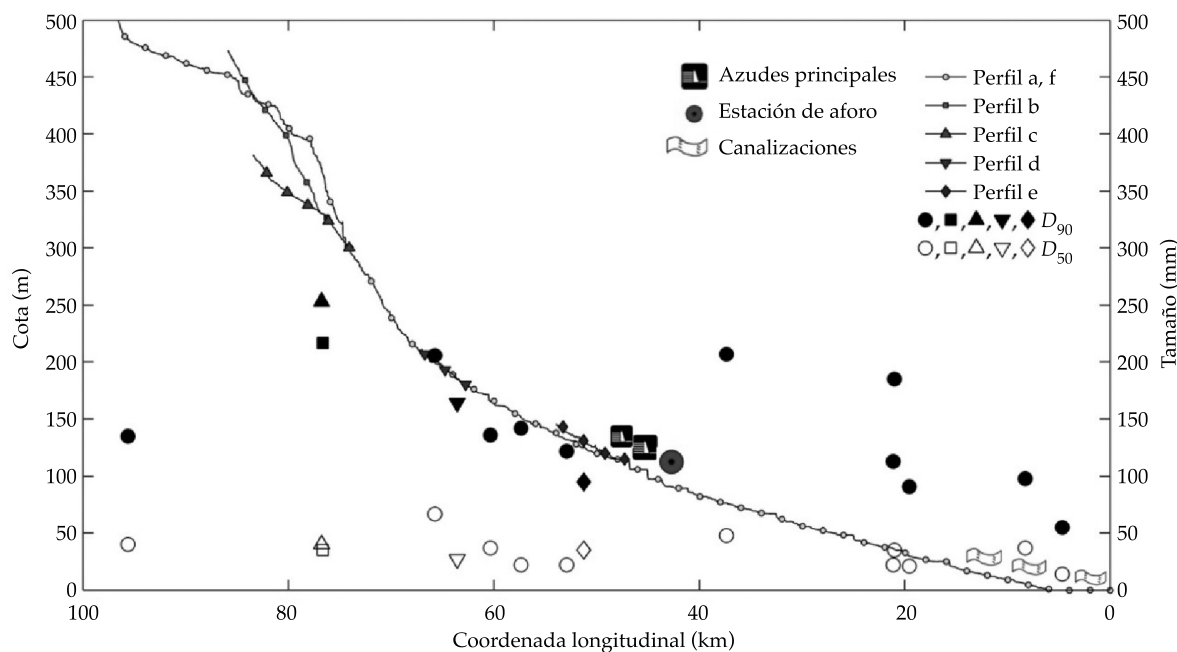


Figura 3. Perfil longitudinal del río Fluvià. Cota sobre el nivel del mar (m, ordenada) contra distancia al mar por el eje del río (m, abscisa). El eje derecho está graduado en mm para D_{50} y D_{90} . El símbolo de cada punto granulométrico remite al símbolo del perfil del río correspondiente.

del río a los cambios, o sea un índice de su dinámica fluvial. Esta noción proviene, por ejemplo, de la analogía de la balanza de Lane, en la que i es la graduación del brazo derecho de la balanza y D la del brazo izquierdo. El cociente $i(-)/D_{50}(m)$ aguas abajo del km 45-47 es en promedio 0.08 y aguas arriba 0.17; es decir, el río es más sensible aguas arriba de estas pequeñas presas que aguas abajo. Dicho de otro modo: aguas abajo, el material aluvial parece demasiado grueso para la pendiente relativamente suave del río; al contrario, aguas arriba parece demasiado fino para la pendiente más fuerte. Puede decirse igualmente que la capacidad de transporte es mayor arriba que abajo. Por otra parte, el cociente inverso $D_{50}(m)/i(-)$ tiene un valor de 6 aguas arriba y 12.5 aguas abajo, calificándose como faldas de montaña y alta montaña, respectivamente, según el criterio de Lojtin (Gracia-Sánchez y Maza-Álvarez, 1997).

Embalses y barras

Los resultados del apartado anterior hacen resaltar el papel de estos dos embalses en el transporte sólido del río. Sus batimetrías, aunque de poco detalle (tres secciones transversales y un perfil longitudinal, figura 4), sirven sin embargo, con algunas hipótesis sobre el perfil del río antes de la construcción de los saltos, para evaluar aproximadamente el volumen de sedimento contenido en ellos. Resulta que la presa superior contiene unos 250 000 m³ de sedimento, que representa entre 2/3 y 3/4 de su volumen de embalse inicial, mientras la presa inferior contiene unos 100 000 m³ de sedimento, quizá 2/3 de su volumen inicial. Por otra parte, el depósito del embalse superior alcanza una buena altura en la cortina, tiene una pendiente parecida a la del río y deja como espejo de agua sólo los 600 m más cercanos a la presa (ver foto, figura 4). El

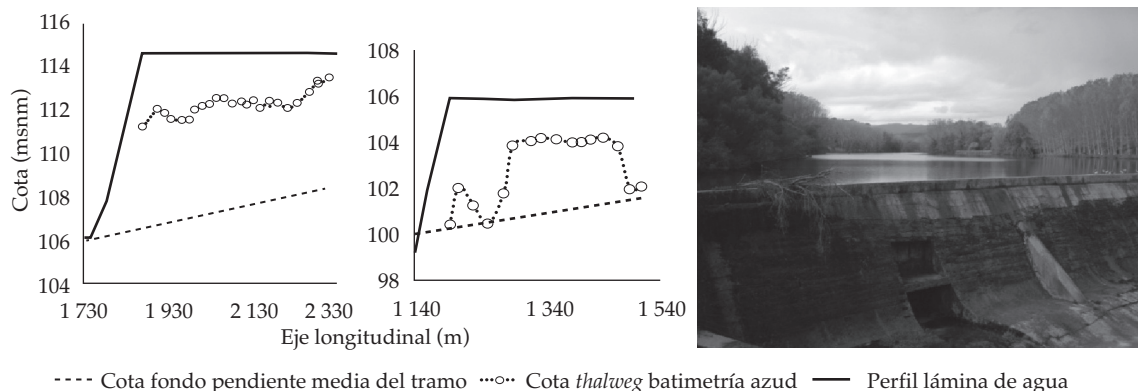


Figura 4. Embalses superior (izquierda y foto) e inferior (centro), con el perfil del fondo con sedimento, en comparación con la lámina de agua y el perfil original supuesto para el lecho.

del embalse inferior, en cambio, se parece a un delta paralelo a la superficie libre, con un frente de avance situado a sólo unos 100 m de la presa.

Los pequeños calados libres sobre las presas, el hecho de que la inferior también tenga mucho sedimento (pese a que las fechas de construcción de los dos fueran cercanas), el deterioro del hormigón en el paramento de la presa por abrasión, y otros indicios, hacen pensar que el material sólido puede pasar estas barreras. Por ejemplo, de la avenida extraordinaria que ocurrió en 1940, se conservan marcas de agua que prueban que ambas barreras estuvieron totalmente anegadas (sumergidas por los dos lados). Siendo esto así, en el deseo de revitalizar el transporte sólido y restaurar el río parece mejor dejar que estos pequeños embalses se llenen completamente, para que un día dejen de ser barrera al transporte de cualquier tamaño. Este tipo de pequeña presa derivadora recibe el nombre de “azud” en el castellano de los autores.

Por otro lado, se trata a continuación de la superficie de barras activas entre 1957 y 2008, determinada mediante SIG. Un ejemplo es la figura 5. Merece una mención especial este lugar de gran movilidad, con su centro a unos 20 km del mar, donde han ocurrido los recientes incidentes de la presa que quedó fuera

de servicio y de la torre eléctrica. Sobre el fondo del vuelo de 1957 se dibujan en la figura 5 las barras de las dos fechas (1957 y 2008). De todas formas, se observa que en 1957, la superficie de gravas desnudas de vegetación era bastante mayor que hoy. La representación gráfica de la evolución de la superficie de gravas con el tiempo se da en la figura 6. Es clara la tendencia a la reducción de los depósitos aluviales en los últimos 52 años, incluso después de descontar los depósitos perdidos por el dragado en las obras de canalización de los meandros próximos a la desembocadura en 1971-1987. El penúltimo dato se puede considerar como una activación circunstancial, ya que la avenida del 8 de mayo de 2002 ($269 \text{ m}^3/\text{s}$) ocurrió poco antes del vuelo de 2002. Quizá también es circunstancial la “desactivación” de 2008, por falta de crecidas importantes en los últimos años. Pero uno o dos meses antes del vuelo de 1957 ocurrió una avenida de $145 \text{ m}^3/\text{s}$ menor que la de 2002, pese a lo cual el área de gravas es casi el doble en 1957 (184 ha) que en 2002 (116 ha).

Si se distingue entre las barras aguas arriba y abajo de las dos presas derivadoras mayores, es interesante ver (figura 6) que el declive aguas arriba reproduce la tendencia general, mientras que aguas abajo la superficie es más constante, con el repunte de 2002 y el

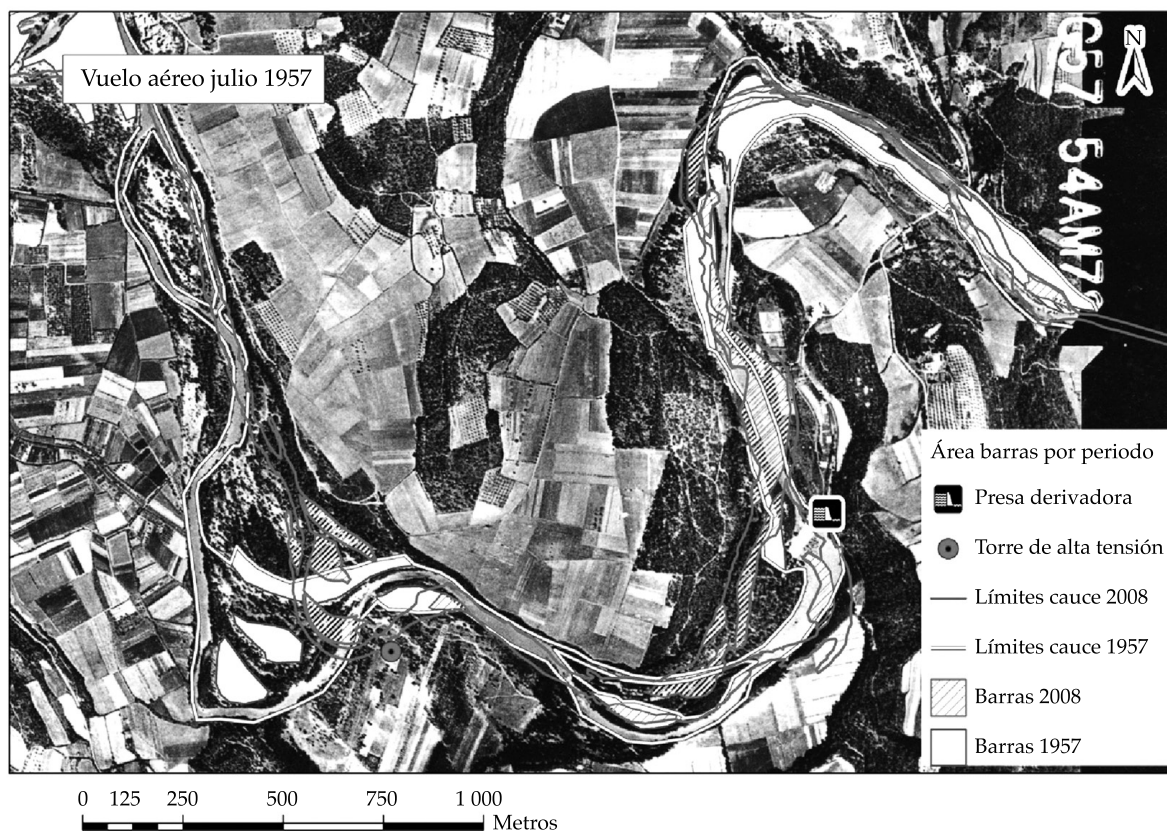


Figura 5. Barras del año 1957 y 2008 a unos 20 km del mar; lugar de las muestras 3 y 4 (ver figura 2). Se marcan la presa derivadora (azud) que quedó fuera de servicio y la torre eléctrica perdida.

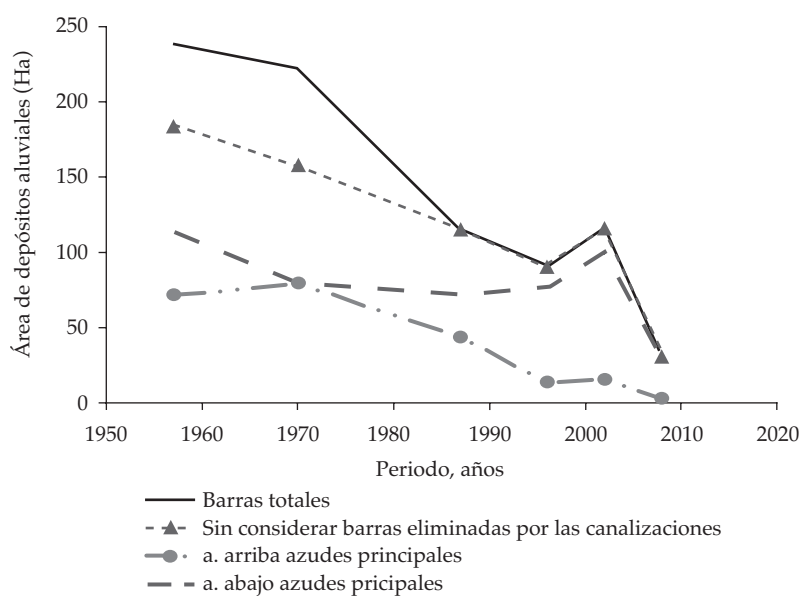


Figura 6. Evolución de la superficie de barras de grava sin vegetación a lo largo del tiempo.

declive quizá circunstancial más reciente. Aguas arriba el descenso es radical: de 71 ha en 1957 a sólo 3 ha hoy. Como todas las pequeñas presas hidroeléctricas de cabecera tenían ya al menos treinta años de antigüedad en 1957, parece que esta caída tan fuerte de actividad no se puede relacionar con ellas. Se hace esta conjetura sin saber si ya se había alcanzado un equilibrio en el río Fluvià a los treinta años de la construcción de dichas presas. Para una discusión de este punto cabe pensar que la activación de los depósitos aluviales por la avenida excepcional de 1940 podría tener aún un efecto apreciable en 1957. También, que los cambios mayores en los usos del suelo, como el abandono de la agricultura de montaña debido a grandes movimientos migratorios, han ocurrido desde los años 1950-60. Con respecto a la permanencia de las barras móviles aguas abajo de las presas, hay otros ejemplos de este fenómeno de actividad fluvial décadas después de construirse las presas (Jiongxin, 1997).

Movilidad del bajo Fluvià

Todos los movimientos en planta del río observados en la serie de fotografías aéreas, menos uno, han ocurrido en los 45 km del bajo Fluvià, aguas abajo de las dos presas mayores. En general, se observa una progresión y profundización de las curvas fluviales, así como algunos cortes de curvas. El bajo Fluvià no es propiamente un río de meandros. La pendiente i relativamente elevada (0.20-0.25%, cuadro 1), el tamaño D_{50} grueso (25-35 mm, ídem), y el caudal dominante Q , deducido de la curva de frecuencia de caudales de la estación de aforos más próxima (cuya cuenca es de 804 km²), del orden de 190-220 m³/s, conducen a que el parámetro $i(-) \cdot Q^{0.46}$ (m³/s) / $D_{50}^{1.15}$ (m) (Chang, 1988) valga unas 2-4 veces más que el valor límite (0.56) entre ríos meandriformes, bajo el límite, y ríos trenzados, por encima de él.

Las grandes barras separadas por brazos (sobre todo en 1957) de la figura 5 confirman

que el río toma un cauce único y sinuoso en aguas normales, pero que es más bien trenzado en aguas altas. A pesar de ello, siempre se ha distinguido un *thalweg* del río en el SIG. Los movimientos de la mitad izquierda (aguas arriba) de la figura 5 se representan con más detalle en la figura 7, dibujando el cauce principal en cada fecha, así como el eje (punto medio) de dicho cauce. Con el eje se trazan los segmentos que unen puntos homólogos para medir los desplazamientos de cada periodo. En lugares como éste, se ha estudiado también la edad de los árboles (dendrocronología) y la distribución detallada de D_{50} (figura 8). Por otra parte, las envolventes de todos los movimientos, es decir, el área barrida por el río en el medio siglo que se analiza, es interesante como evaluación del riesgo de erosión lateral y como primera delimitación del espacio fluvial (figura 8).

La medida de los segmentos en los movimientos de profundización (maduración) del bajo Fluvià se da en el cuadro 2. En total suman 1.73 km de corrimiento de orillas perpendicularmente al flujo del agua en 64 años desde 1945. Destaca el periodo 1957-71 también por el número de sitios con movilidad (9) y el movimiento total por año (42.4 m/año). Además no constan en el cuadro otros 662 m de movimiento de progresión de curvas (corrimiento de orilla en la misma dirección del valle, acompañando al de maduración), ni tampoco los movimientos bruscos por corte natural o estrangulamiento de meandros.

La actividad de los sitios canalizados (las cinco primeras columnas) cesó desde las obras de canalización (desde 1971 hasta 1987). Pero aún así, contando sólo las restantes columnas, se advierte un declive de la actividad. Esta movilidad decreciente del eje del río y la superficie de gravas (también en declive, figura 6) tienen relación. La media de los 24 movimientos del cuadro 2 es de 6.5 m/año por movimiento. La cifra más alta (138 m) corresponde al incidente de 2002 que se estudia en detalle más tarde. Se ha intentado

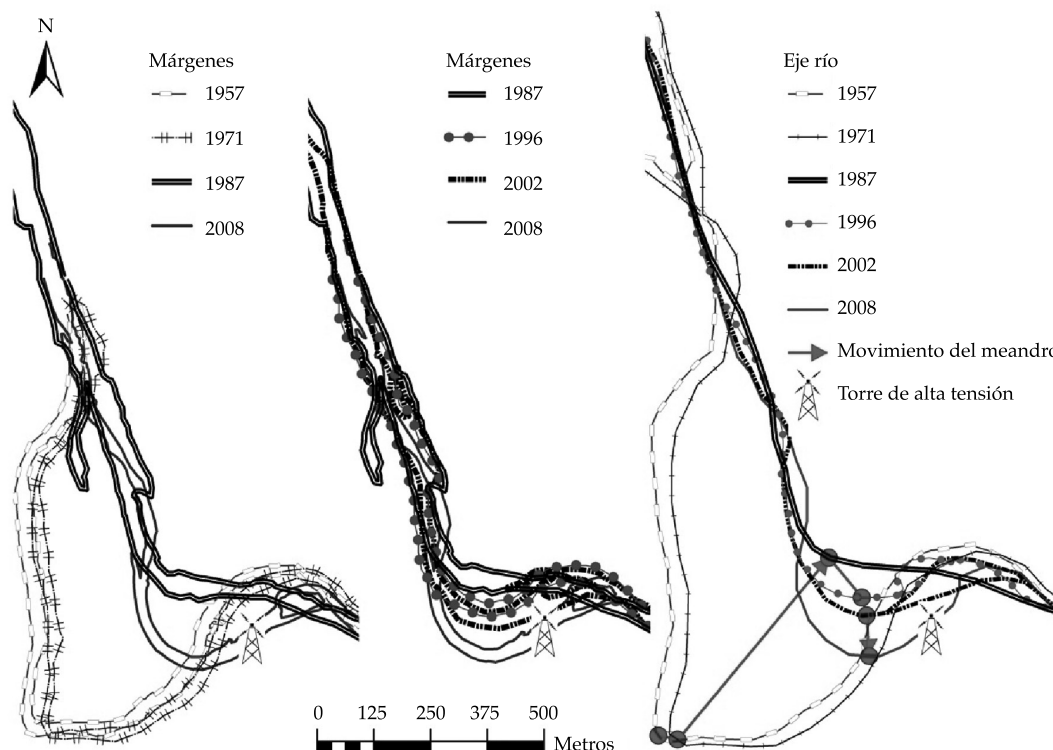


Figura 7. Comparación de los cauces a 21.2 km del mar (mitad izquierda de la figura 5). A la derecha: ejes sucesivos y desplazamiento de puntos homólogos.

sin éxito correlacionar las medidas del cuadro 2 con la pendiente del lecho (i), el tamaño del material aluvial (D_{50}) y el caudal dominante (Q), cuyas variaciones son pequeñas a lo largo del bajo Fluvià. Tampoco hay correlación con la actividad hidrológica de cada periodo, esto es, con un caudal dominante mayor en las décadas húmedas ($\approx 300 \text{ m}^3/\text{s}$) que en las secas ($\approx 140 \text{ m}^3/\text{s}$), ni con las crecidas en cada década, por ejemplo, máximos de $1\,600 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo 1957-71 pero sólo $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo 1971-87. Esto no significa que las crecidas y los caudales altos de cada año no produzcan los movimientos, sino que la agregación temporal en periodos del orden de una década, obligatoria por las fechas de las fotos aéreas, es demasiado grosera para distinguir la relación entre el movimiento y el caudal que lo produce. Además, la resistencia variable a la erosión de orillas determina el

porqué se mueve el cauce en un lugar y en cambio es inmóvil en otro. La gran movilidad del bajo Fluvià, pese a tener una sensibilidad (i/D_{50}) menor, se debe a la erosionabilidad de las orillas. En los tramos superiores, de sensibilidad mayor, esta movilidad en cambio es baja, quizá porque los depósitos aluviales son de poca extensión o incluso porque aflora roca.

El caso del *by-pass* de un azud (presa derivadora)

La mitad derecha de la figura 5 es el lugar que ha tenido la mayor movilidad reciente (138 m, cuadro 2). La otra mitad es la ya representada en las figuras 7 y 8. En ellas se apreciaba la dinámica típica de un meandro: progresión hacia aguas abajo y profundización a través de la llanura, con un estrangulamiento para volver

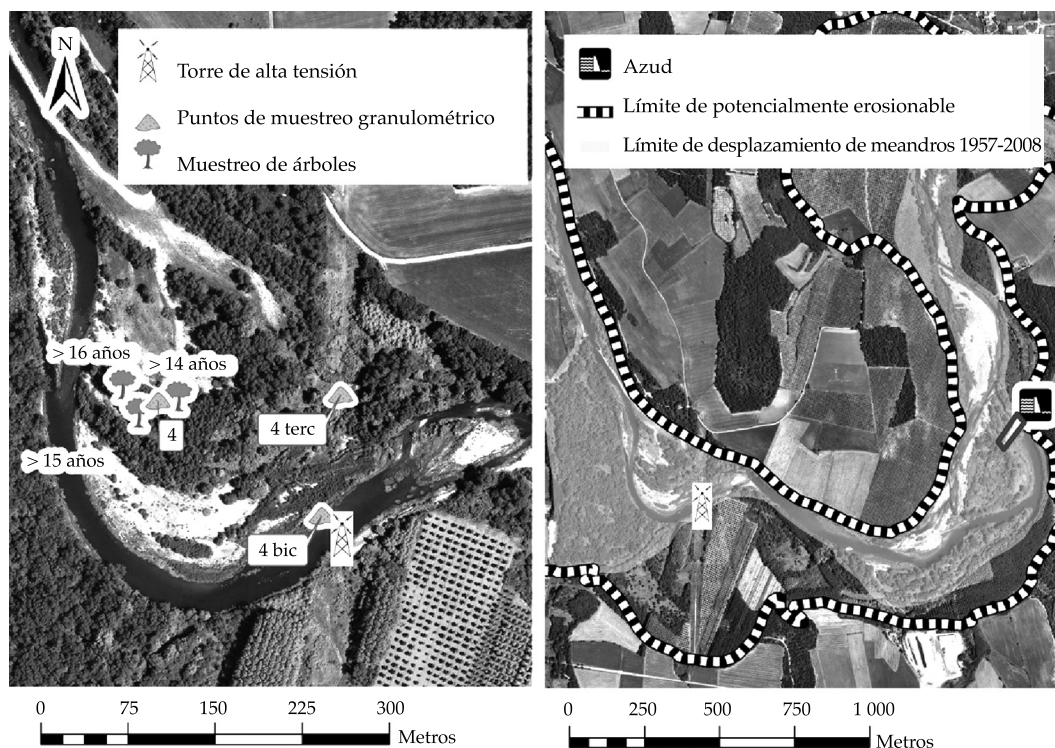


Figura 8. Izquierda: catas granulométricas en el mismo lugar de la figura 7; 4: $D_{50} = 22$ mm; 4bis: 35 mm (cuadro 1); 4terc: 43 mm (bajo 60 cm de arena fina), que son prueba de que el cauce principal del río discurrió por esos puntos. La edad de los árboles es coherente, confirma que en 1987 el río discurría por el lugar de los árboles muestreados, que dan en el trabajo de campo en 2009 una edad mayor de 15 años como media. Derecha: envolvente de todos los movimientos del río Fluvià en las fotografías aéreas de medio siglo y límite geomorfológico de las terrazas erosionables (gentileza de Geoservei).

Cuadro 2. Movimientos de maduración de meandros del Fluvià en metros. La columna en negritas es el lugar de la figura 7 (sin el corte brusco) y la anterior el lugar de las figuras 9, 10 y 11.

Periodo	Distancia al mar (km)													Total (m)
	2.2	4.3	6	8	8.1	19.6	21.2	24	36.6	37	37.3	38.4	62.3	
1945-1957	104	172		91										367
1957-1971	54		65	70	129		35	37	41		43	120		594
1971-1987	26			41				48	50	72			116	353
1987-1996	34						92	51						177
1996-2002							33							33
2002-2008						138	72							210

a un curso más recto en algún momento del periodo 1971-87. La dinámica posterior causó la caída de la torre eléctrica. Es interesante

señalar que las dos mitades están separadas por un tramo rectilíneo de 250 m, cuya alineación se ha mantenido inalterada desde 1957. Esto es

un ejemplo de cómo la resistencia a la erosión de orillas determina la movilidad fluvial (la inmovilidad en este caso).

La pequeña presa de la figura 5 (derecha) de unos 2 m de altura data de 1923. En mayo de 2002 se formó un nuevo cauce por la parte interior de la curva, que la dejó prácticamente abandonada (figura 9). Este curso no había sido nunca el del río Fluvià, al menos desde 1957; esa zona fue un espeso bosque de ribera, que se había talado casi por completo, excepto sus contornos, como se aprecia en la foto de 1998. En la imagen de 2002, poco después del corte, se ha recuperado el bosque que queda ahora en la margen derecha del río. En 2008, el agua se dirige de nuevo a la presa debido a la intervención del propietario del salto hidroeléctrico. La gran diferencia entre 2002 y 2008 es aguas abajo de la obra: un corrimiento de la orilla derecha de 138 m y la formación de un gran depósito aluvial. Las fotos de la figura 1 son precisamente de ese lugar.

La causa del corte fue sin duda la tala del bosque. El desbordamiento por la margen izquierda no encontró el freno de la vegetación. Además, la pendiente por este curso es mucho mayor, no sólo por ser más recto, sino porque incorpora el desnivel concentrado en la presa. Es como una captura del río por las ventajas de una pendiente mayor y un terreno aluvial sin vegetación. Gracias a dos topografías (Modelos Digitales del Terreno o MDT) de 2003 y 2007, se puede conocer mejor el comportamiento reciente del gran depósito aluvial. En el perfil longitudinal (figura 10) está ocurriendo una rápida acreción (subida de fondo aguas abajo del azud). En 2003, la pendiente del nuevo brazo era más del triple (0.68%) que la de los tramos contiguos no afectados todavía por el corte ($\approx 0.20\%$). De 2003 a 2007 hay una basculación del perfil (de 0.68 a 0.44%). Este proceso no se ha acabado, seguirá con acreción abajo y erosión remontante hacia arriba hasta un equilibrio futuro con una pendiente más uniforme. En una sección transversal por el centro del gran depósito aluvial (figura 10) se ve cómo la acreción crea el gran depósito, al mismo tiempo

que la orilla derecha retrocede. La acreción es de 1.1 m en la cota del *thalweg*, el cual ha saltado del lado izquierdo al lado derecho de la barra. La orilla seguirá erosionándose en el futuro.

El gran depósito presenta formas de fondo de varias dimensiones y tamaños de grano, a veces superpuestas, prueba de la gran actividad sedimentaria reciente. Las más grandes son las barras, sobre las que se identifican láminas (*bedload sheets*), dunas e incluso antidunas (figura 11). Las láminas se crean por el transporte de material fino cuando el flujo no es capaz de mover todos los tamaños, por ejemplo durante el descenso de la crecida que formó las barras. Las dunas, poco comunes en ríos de grava como el Fluvià, aparecen aisladas, a veces rodeando a la vegetación, son de gran altura y constituidas por grava gruesa sin arena (figura 11). También son raras en ríos de grava las antidunas y aún más raro que se conserven tras la crecida, como el tren de unas ocho ondas de $\frac{1}{2}$ m de altura de la figura 11. Pudieron formarse en el descenso de la crecida por el desagüe rápido, en régimen supercrítico, de la parte alta del cauce hacia el *thalweg* más hondo (ver figura 10). Finalmente, las barras son las formas de mayores dimensiones (macroformas), de frente semejante a las dunas (mesoformas), pero guardando relación con la anchura del cauce, no con el calado, y son precursoras de la formación de meandros. Las conforman flujos elevados, mientras en aguas bajas se convierten en islas o depósitos de interior de curva (*point bar*). En el lugar de estudio se observaban varias barras con frentes de onda bien diferenciados.

Las formas de fondo descritas clasifican el material por tamaños. Las tres catas adicionales para el análisis granulométrico del gran depósito (figura 11) confirmaron que en el exterior de la suave curva (3: $D_{50} = 21$ mm, valor en el cuadro 1) y en las partes altas del depósito (3bis: $D_{50} = 45.5$ mm), el material aluvial es algo más grueso que en el interior de la curva (3terc: 16.5 mm). El contenido de arena es del 10-23% solamente, por lo que la

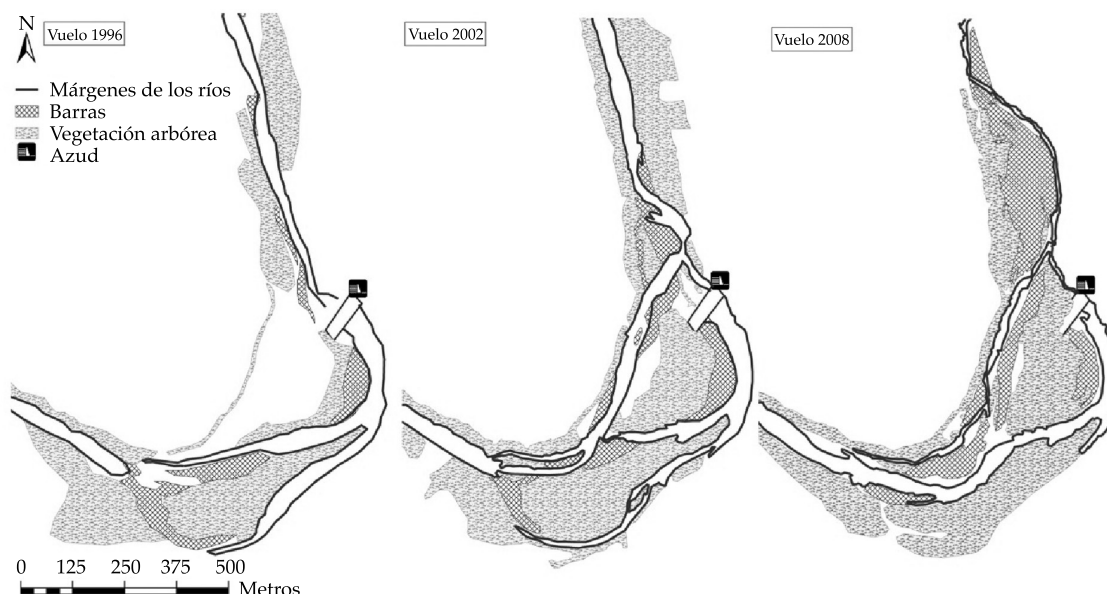


Figura 9. Evolución del meandro junto a la presa derivadora (azud) (mitad derecha de la figura 5, a 19.6 km del mar), en 1998, 2002 y 2008. Se señalan el bosque de ribera y las barras.

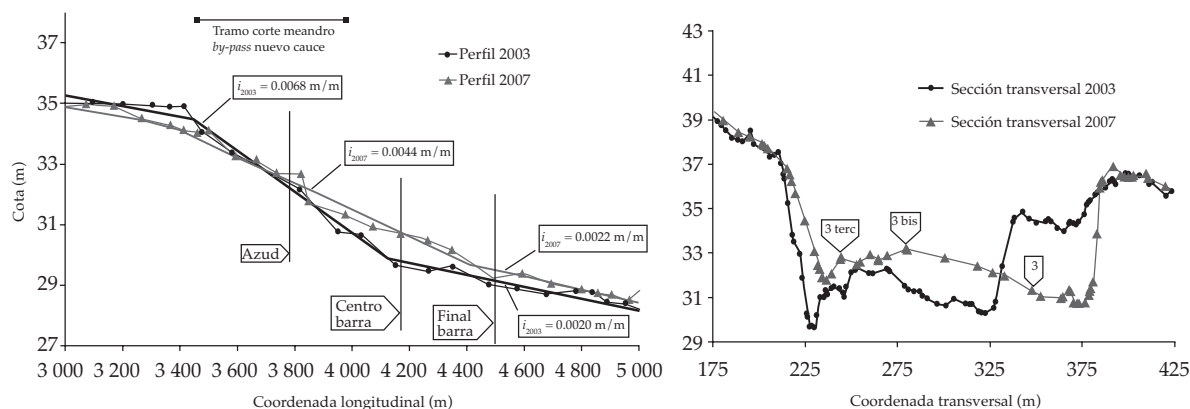


Figura 10. Perfil longitudinal con rectas de regresión (izquierda) y secciones transversales (derecha) en el centro de la zona del gran depósito ("barra"), en 2003 y 2007, señalando tres catas realizadas.

grava es la que da estructura al lecho, mientras la arena ocupa parcialmente los huecos. Esto es especialmente cierto en las áreas de acreción más reciente. También se tomaron cuatro muestras superficiales de cien partículas cada

una, por el método de pasos (o de Wolman), resultando $D_m = 36, 43, 36$ y 43 mm (figura 11). Pese a que, juzgando por la vista, el gran depósito del Fluvià parece estar acorazado, la comparación rigurosa entre las muestras

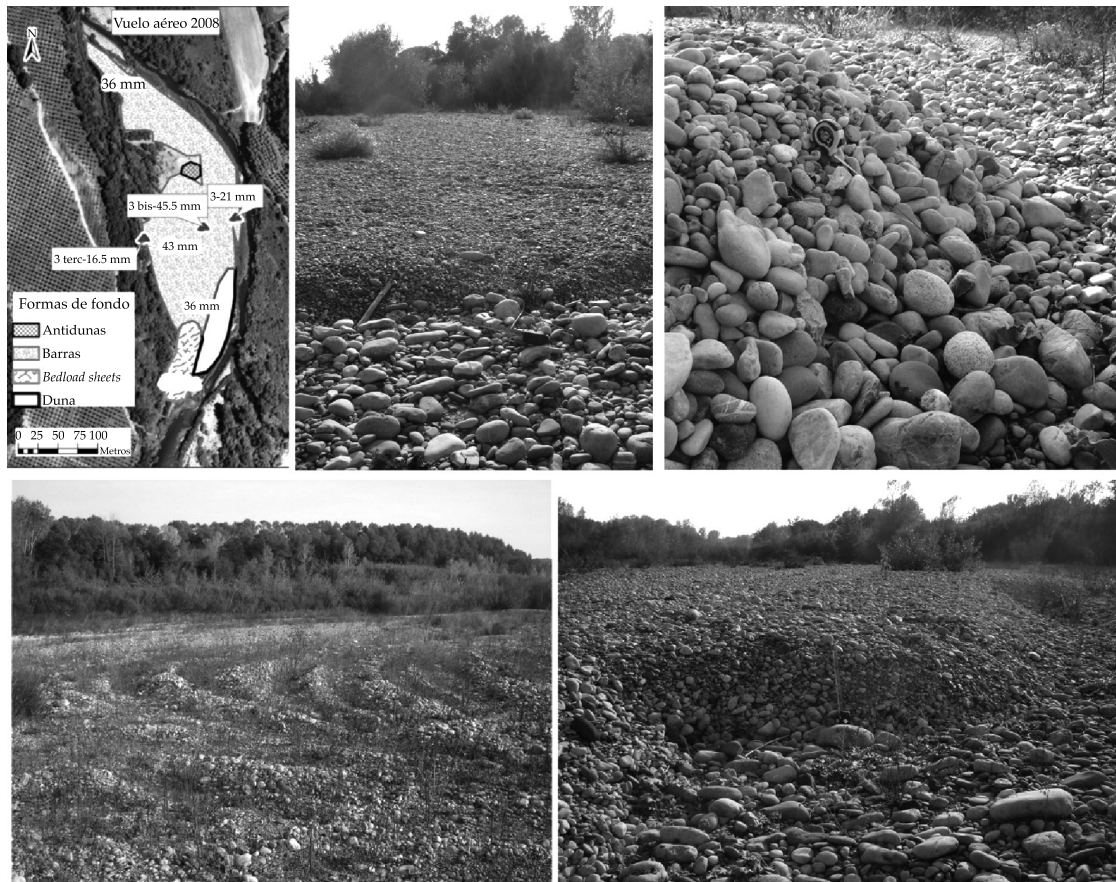


Figura 11. Fotos, en orden de izquierda a derecha, y de arriba a abajo: láminas de material fino sobre una barra; frente de una duna de grava sin arena, cuyo talud es el ángulo de reposo; tren de antidunas y frente de una barra (fotos tomadas el 29 de octubre de 2009). En el plano de planta se sitúan las formas, las tres catas con sus resultados (3, 3bis, 3terc) y los valores D_{50} de las muestras superficiales.

superficiales y las de las catas prueba que no hay acorazamiento.

Estimación del transporte sólido

La capacidad de transporte sólido se puede evaluar por medio de fórmulas de transporte. El gran depósito es apropiado para esta evaluación porque es un área muy activa. Se toma la zona del centro del gran depósito, en donde la granulometría es conocida con detalle, simplificando la sección transversal correspondiente a 2007 (figura 10), porque nos conformamos con evaluar el orden de magnitud de esta capacidad. En el mismo sentido, se utiliza régimen uniforme con rugosidad en

función del tamaño D_{90} del promedio de las granulometrías. De las innumerables fórmulas de transporte, de resultados dispares entre sí, elegimos la de Wilcock y Crowe (Parker, 2008), que calcula el transporte por fracciones, teniendo en cuenta el efecto de exposición-ocultamiento, propio de lechos con grano muy variado, y el efecto del contenido de arena. Por otro lado, se elabora la curva de frecuencia de caudales de un año y medio, a partir de los datos de la estación de aforos más próxima. Para los siete primeros días del año y para tamaños entre 1 y 200 mm, el transporte sólido en m^3/s se representa en la figura 12. La suma resulta en lo que se muestra en el cuadro 3 y la figura 12.

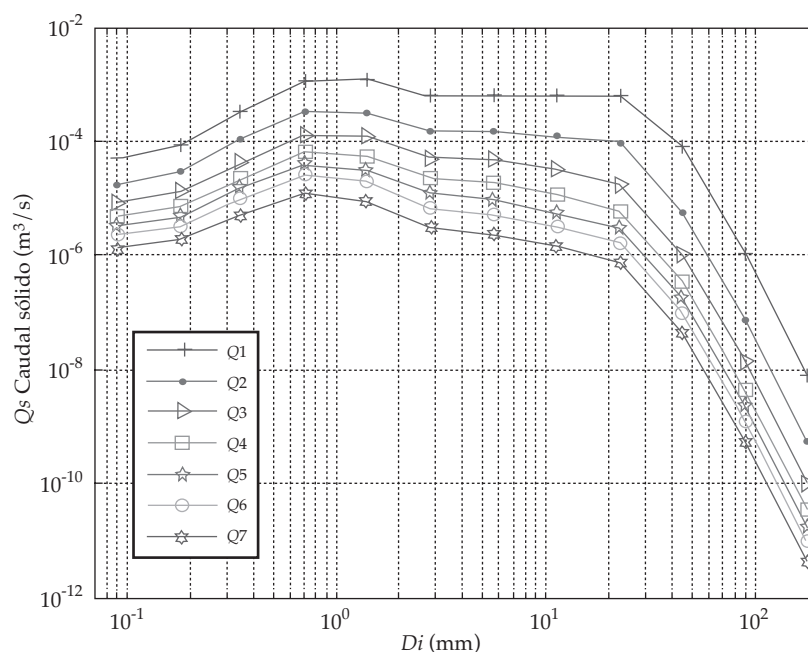


Figura 12. Caudal sólido (m^3/s), ordenada en escala logarítmica en función de D (mm), también en escala logarítmica para los siete primeros caudales característicos $Q_1...Q_7$, según la fórmula de Wilcock y Crowe.

Cuadro 3. Caudales sólidos en $\text{m}^3/\text{día}$ para el caudal $Q_1...Q_7$, los siete primeros de la curva de frecuencia de caudales, calculados mediante la expresión de Wilcock y Crowe.

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Total
Q (m^3/s)	213.3	102.2	74.1	56.5	47.7	42.1	36.5	
Q_s ($\text{m}^3/\text{día}$)	546	92.9	37.4	16.0	9.1	5.8	3.4	711 m^3

Para tener un intervalo de valores, se ha repetido el cálculo con la sección por el lugar de máxima pendiente del depósito (a la altura de la presa derivadora), resultando $8\,000\text{ m}^3$. El intervalo $700\text{--}8\,000\text{ m}^3/\text{año}$ es la estimación basada en el depósito más importante del bajo Fluvià (siendo la pendiente que da $8\,000\text{ m}^3$ local y excepcionalmente elevada). Esta cifra significa que si al tramo llega suficiente material grueso, saldrá una cifra de este orden de magnitud. El material fino en suspensión no entra en esta evaluación. La cifra es una media anual porque surge de la curva de frecuencia de caudales, es decir, no tiene en cuenta los eventos extraordinarios.

La movilidad del bajo Fluvià, en particular el lugar del corte del meandro, nos ofrece otra posibilidad de estimación del caudal sólido. Una curva en planta se mueve porque la orilla exterior cede (se erosiona) y al mismo tiempo la barra interior crece (figura 13). Si a la curva entra un caudal sólido Q_{s1} y de ella sale un caudal Q_{s2} , hay equilibrio si $Q_{s1} = Q_{s2}$. Si el fondo no sube ni baja, este equilibrio se sigue respetando aunque se mueva la planta, siempre que los volúmenes de erosión (V_2) y sedimentación (V_1) sean iguales. La carga Q_{s2} se nutre del volumen de erosión V_2 , además del transporte del río; análogamente, la carga Q_{s1} alimenta al volumen de acreción V_1 , además de

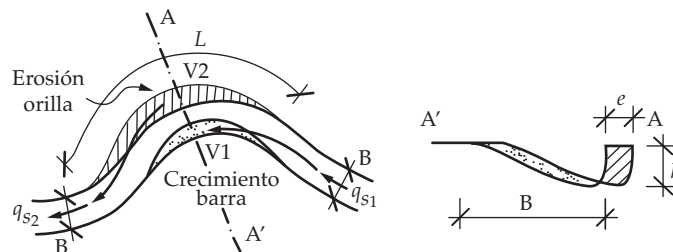


Figura 13. Croquis para relacionar el volumen perdido en orillas y ganado en barras con el transporte sólido de un río.

Tomado de Martín-Vide (2006).

contribuir a este transporte. El caso límite es si Q_{s1} se queda al 100% en la barra y Q_{s2} proviene al 100% de la orilla. Entonces $Q_{s1} = V_1$ y $Q_{s2} = V_2$ (dividiendo los volúmenes por el tiempo). En general, será $Q_{s1} > V_1$ y $Q_{s2} > V_2$ (ídem), o sea, una parte de lo que sale circula sin interactuar ni con la barra ni con la orilla. En conclusión, V_1 y V_2 son cotas inferiores del caudal sólido.

Se aplica este método al gran depósito mediante seis secciones transversales de las topografías de 2003 y 2007 (la cuarta de ellas es la figura 10, derecha). El resultado (véase cuadro 4) da sumas $V_1 = 15\,200\text{ m}^3$ de acreción y $V_2 = 14\,400\text{ m}^3$ de erosión, muy parecidas entre sí. Aceptando $V_1 = V_2 = 15\,000\text{ m}^3$ y dividiendo por los 51 meses transcurridos entre las dos topografías, resulta $Q_s > 3\,500\text{ m}^3/\text{año}$. Esta cifra, que se encuentra dentro del intervalo $700\text{--}8\,000\text{ m}^3$, puede compararse también con el volumen acumulado en los dos embalses mayores a lo largo de ochenta años, que resulta de $350\,000 / 80 = 4\,375\text{ m}^3/\text{año}$ (o $3\,125\text{ m}^3/\text{año}$ si se computa sólo el embalse superior), también dentro del mismo intervalo. Una diferencia de esta última estimación es que los embalses contienen sin duda material grueso traído por las crecidas de caudal mayor que Q_1 .

Restauración de un meandro canalizado

La figura 14 es el croquis del tramo del río Fluvià cercano a la desembocadura, lugar de las dos mayores canalizaciones con corte de meandros. La atención se centra en la de aguas arriba (de 1987) a 8 km del mar, cuya restauración es más viable. Antes de 1987, este meandro en forma de S (meandro 2) había tenido movimiento de maduración ($91 + 70 + 41\text{ m}$, cuadro 2) y un desplazamiento del conjunto hacia la izquierda. No tuvo en cambio movimiento de progresión, lo que se debe relacionar con el punto final de la S, fijo y de curvatura anormalmente elevada, señal de un material no erosionable. La canalización acortó en 810 m el curso mediante un arco de círculo de gran radio, descentrado con respecto a la S, de modo que se puede confundir con el corte de un solo lóbulo, grande, el izquierdo. El canal construido tiene 120 m de anchura y bordos revestidos de escollera. Se excavó el fondo del orden de 2 m. Parece ser que estas excavaciones se han repetido después para mantenimiento y extracción de áridos. Un nuevo puente sobre el Fluvià se ejecutó en combinación con la canalización. El cauce antiguo sólo se ha

Cuadro 4. Volúmenes de erosión y acreción en el gran depósito entre 2003 y 2007.

Sección	← Aguas abajo			Aguas arriba →		
Erosión (m³)	1 500	7 900	5 000			
Acreción (m³)				4 400	700	10 100

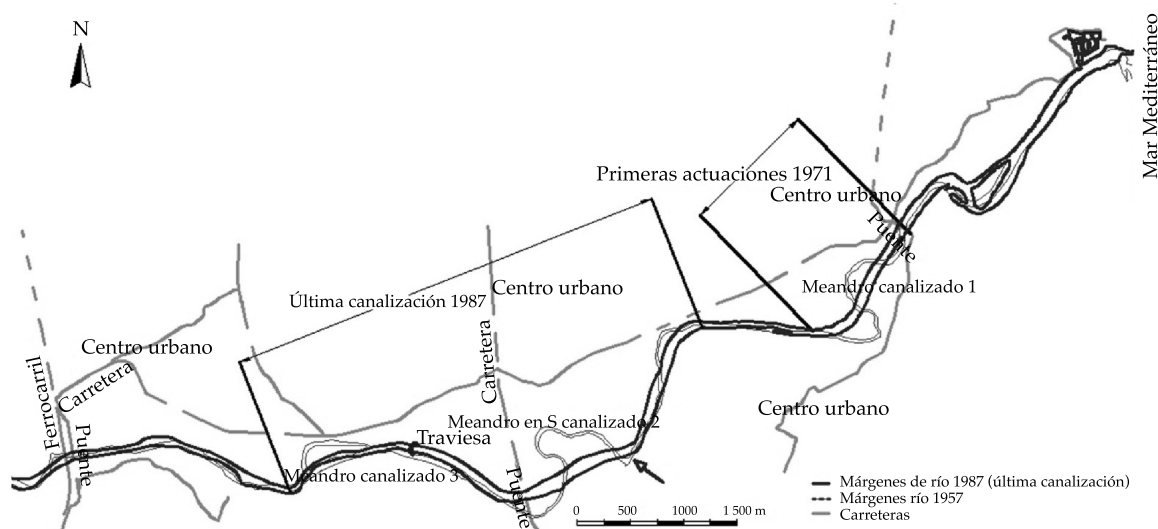


Figura 14. Croquis general del área de las dos canalizaciones de meandros. Para la toponimia (a, b,...), ver la Nota final.

rellenado en la intersección con los terraplenes de esta nueva vía, pero en el área de los antiguos meandros se extraen áridos. Completando el cuadro, fue necesario construir una traviesa para que el rebaje de 2 m de la canalización no se propagara aguas arriba.

La administración hidráulica se interesaba en dos acciones: recuperar el gran lóbulo (izquierdo) de la S y demoler la traviesa, obstáculo para la continuidad fluvial y para los peces. El lugar de esta restauración es comparable en dinámica fluvial al sitio del corte accidental a unos 20 km del mar (tal y como se ha visto en el apartado titulado “El caso del *by-pass* de un azud (presa derivadora)”), ya que ni la pendiente, ni el tamaño de grano ni el caudal dominante cambian apreciablemente en los 12 km que los separan. Dos observaciones morfodinámicas de aquel incidente de 2002 son útiles para analizar la restauración. Si un desnivel concentrado en el perfil (el azud) se libera, la dinámica fluvial se reactiva fuertemente. En segundo lugar, en estas condiciones, si la corriente lleva una dirección incidente sobre una orilla, incluso sólo ligeramente, produce una gran erosión. Las llanuras en el lugar de la restauración son por

cierto erosionables, excepto puntos singulares, como prueba la movilidad de los meandros desde 1957 hasta 1987.

Si se aspira a una restauración ideal (integral), el cauce debería recuperar esos 2 m de cota que perdió. Entonces, la demolición de la traviesa no tendría mucho sentido, ya que al final quedaría enterrada. No obstante, como obstáculo presente, hay que tener dos precauciones si se elimina: su desnivel concentrado de 2 m se incorporaría a la pendiente transitoria del fondo, activando la dinámica fluvial y exigiendo de las orillas, no bien alineadas con la corriente, una resistencia mayor (que sobra, seguramente, gracias al revestimiento de escollera); por otro lado, desaparecida la barrera, el descenso de 2 m del fondo se propagaría aguas arriba como incisión. Para amortiguar este problema con algo que no sea una nueva traviesa, es interesante recuperar otro brazo del río cortado más aguas arriba (meandro 3, figura 14), ya que dos cauces en vez de uno contrarrestan la incisión. Finalmente, no hay que temer una acreción, que se presentaría aguas abajo debido al volumen aluvial liberado al eliminar la traviesa, porque es poco volumen, y sin

embargo sí hay que prestar atención al efecto del rebaje de 2 m sobre los niveles freáticos.

El antiguo cauce del lóbulo izquierdo del meandro en S sigue hoy elevado ≈ 2 m con respecto al actual río canalizado. Además, la intersección del canal y el lóbulo izquierdo forma un ángulo que hay que evitar, según la conclusión sobre corrientes incidentes extraída del caso del *by-pass* (y no caer en obras para forzar ese cambio brusco de dirección) (figura 14). Estas dos dificultades apuntan, por suerte, al mismo problema: restaurando también el lóbulo derecho e iniciando la actuación lo bastante arriba, se consiguen salvar los 2 m de desnivel y trazar una entrada tangente. Por tanto, una restauración de toda la S original es también técnicamente lo mejor, además de ser lo recomendable ambientalmente. Si, pese a todo, persiste un desnivel en la toma del cauce restaurado, se puede estudiar un ensanchamiento para fomentar la subida natural del fondo, gracias al transporte sólido del Fluvià. Otras medidas imprescindibles para la restauración de la S son el desplazamiento del bordo actual para abrazar por fuera los viejos meandros, y la modificación o permeabilización del puente, sin duda al menos abriendo un vano en el terraplén derecho. También hay que señalar el valor de que el meandro volviera a tener cierta movilidad. El proyecto se puede refinar si además del cauce restaurado se mantiene el canal, a modo de aliviadero de crecidas, para dar más seguridad frente al riesgo de inundación. La S atravesada por el arco de círculo daría así la figura de un 8. Este esquema merece un estudio de detalle.

Conclusión

Se han distinguido algunos rasgos de la dinámica fluvial de un río de gravas (el Fluvià). Las fuentes de información han sido fotografía aérea, MDT, batimetría sumaria y granulometrías. Tres enfoques indirectos sobre el transporte de fondo (cálculo con una fórmula, erosión de orilla y sedimentación en embalses) apuntan a estimar el transporte sólido de fondo

en unos 5 000 m³/año. Por otro lado, la planta del cauce en el tramo bajo se ha movido en muchos sitios (hasta en nueve curvas, durante una década) con un desplazamiento medio de 6.5 m/año por curva. Sin embargo, a juzgar por la superficie de las barras aluviales, y también por la movilidad del tramo bajo, esta actividad dinámica está declinando en los últimos años. Es posible, no obstante, que una avenida fuerte “reavive” un poco el río, como ya se ha visto en el pasado. Parece que el declive no se puede atribuir a las numerosas presas pequeñas, porque todas fueron construidas antes de 1930, aunque no se sabe el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio correspondiente.

Las dos mayores presas, bastante llenas de sedimento, pueden ser sobrepasadas por el transporte sólido de fondo de una gran crecida (al menos sus tamaños menos gruesos). Además, estas barreras parecen haber causado una discontinuidad en la granulometría, ya que aguas abajo los tamaños aluviales son algo mayores. En cuanto a gestión del sedimento, quizá es mejor esperar a que los embalses se llenen del todo e influyan así lo mínimo antes que aplicar una política de evacuación del sedimento contenido en ellos. La movilidad de las curvas y los meandros del tramo abajo seguirá existiendo, controlada siempre por la erosionabilidad de las terrazas. Se piensa que la sensibilidad mayor del tramo superior (tamaño relativamente más fino) no se manifiesta en movilidad en planta debido a la misma causa (baja erosionabilidad).

La restauración fluvial deseada, cuya problemática se describe en el texto, puede sacar provecho de todas estas conclusiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen la fluida colaboración y el apoyo brindado por el equipo de planificación del río Fluvià, tanto de la Agencia Catalana del Agua como de la unión temporal de empresas ABM-Geoservei, adjudicataria de los trabajos, en particular a Marc Ribalta de ABM y al especialista en geomorfología Joan Solà de Geoservei.

Nota final. Toponimia en las figuras 2 y 3.

a: la Vall d'en Bas.

b: el Riudaura.

c: riera de Bianya.

d: el Llierca.

e: el Ser.

f: el riu Fluvià.

Azudes (presas derivadoras) principales:

Serinyà el superior y Martís el inferior. Azud más aguas abajo: Garrigàs.

Estación de aforos: Esponellà.

Canalizaciones en orden descendente a la desembocadura: Ventallò, Torroella de Fluvià y Sant Pere Pescador.

Recibido: 09/11/10

Aceptado: 30/03/12

Referencias

ALVARADO-ANCIETA, C. y ETTMER, B. Morfología fluvial y erosión en curvas abruptas del río Ucayali, Perú.

Ingeniería hidráulica en México. Vol. XXIII, núm. 4, octubre-diciembre de 2008, pp. 69-90.

CHANG, H.H. *Fluvial Processes in River Engineering*. New York: John Wiley and Sons, 1988.

GRACIA-SÁNCHEZ, J. y MAZA-ÁLVAREZ, J.A. Morfología de Ríos. Capítulo 11. *Manual de Ingeniería de Ríos*. Publicación 590. México, D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1997.

JIONGXIN, X. Evolution of mid-channel bars in a braided river and complex response to reservoir construction. An example from the middle Hanjiang river, China. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 22, 1997, pp. 953-965.

KLINGEMAN, P.C., BESCHTA, R.L., KOMAR, P.D., and BRADLEY, J.B. *Gravel-Bed Rivers in the Environment*. Littleton, USA: Water Resources Publications, 1998.

MARTÍN-VIDE, J.P. *Ingeniería de Ríos*. Barcelona: Ediciones UPC, 2006, 381 pp.

MAZA-ÁLVAREZ, J.A. Erosión en ríos y obras de protección. Capítulo 13. *Manual de Ingeniería de Ríos*. Publicación 590. México, D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1997.

PARKER, G. Transport of Gravel and Sediment Mixtures. Chapter 3. *Sedimentation Engineering. Processes, measurements, modeling and practice*. García, M.H. (editor). Reston, USA: ASCE, 2008.

Abstract

MARTÍN-VIDE, J.P., RODRÍGUEZ-MÁÑEZ, E., FERRER-BOIX, C., NÚÑEZ-GONZÁLEZ, F. & MARUNY-VILALTA, D. Morphodynamic study of the Fluvia River. Scope and methods in light of data scarcity. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 115-133.

Although the use of fluvial dynamics (morphodynamics) is increasingly used in the planning of rivers, the aims, scope and methods of morphodynamic studies have not been developed. The restoration of meanders cut by channels is planned for the Fluvia River in Catalonia (northeastern Iberian Peninsula), which is notably mobile. This paper explains what the morphodynamic study of this river involves, considering the scarcity of resources. This study analyzed the longitudinal profile of the river, the role of some of the diverter dams on the fluvial dynamics, the availability of gravel on the alluvial bars, the meander migration and the bedload transport capacity. A single occurrence of a meander cut-off was also analyzed as well as the morphodynamic risks of restoration.

Keywords: fluvial morphodynamics, Fluvia River, river restoration, sediment transport, bedload, sediment, meander, meander cut-off.

Dirección institucional de los autores

Dr. Juan Pedro Martín Vide

Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y
Ambiental
C. Jordi Girona 31
08034 Barcelona, ESPAÑA
Teléfono: +34 (93) 4016 476 y 4016 200
juan.pedro.martin@upc.edu; vide@grahi.upc.edu

Ing. Eduard Rodríguez Máñez

Universidad Politécnica de Cataluña y ABM Serveis
d'Enginyeria i Consulting, S.L.
Departamento de Ingeniería Hidráulica
Calle Jordi Girona 1-3, D1, 2ª planta, Av. Països Catalans 50
17457 Riudellots de la Selva, Girona, ESPAÑA
Teléfonos: +34 (66) 9061 917, (93) 4016 476 y 4054 155
erodriguez@abmJG.com
eduard.rodriguez.manez@upc.edu
edurodma@hotmail.com

Dr. Carles Ferrer Boix

Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y
Ambiental

C. Jordi Girona núm. 1-3
08034 Barcelona, ESPAÑA
Teléfono: +34 (93) 4016 476 y 4054 155
carles.ferrer@upc.edu

Dr. Francisco Núñez González

Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería Hidráulica- Marítima y
Ambiental
C. Jordi Girona núm. 1-3
08034 Barcelona, ESPAÑA
Teléfono: +34 (93) 4016 476 y 4054 155
fngon@yahoo.com

Ing. David Maruny Vilalta

ABM Serveis d'Enginyeria i Consulting, S.L.
Av. Països Catalans 50
17457 Riudellots de la Selva, Girona, ESPAÑA
Teléfono: +34 (97) 2477 718
Fax: +34 (97) 2478 014
dmaruny@abmgroun.net