

FRANCISCA SEGURA BELTRAN*
CARLES SANCHIS IBOR**

EFFECTOS DE UNA CRECIDA EN UN CAUCE ANTROPORIZADO. LA RIADA DEL PALÀNCIA DE OCTUBRE DE 2000

RESUMEN

El río Palància experimentó, en octubre de 2000, una importante crecida que modificó sustancialmente la morfología del cauce. Esta transformación tuvo lugar sobre un lecho que previamente había sido arrasado por diversas obras de limpieza y regularización de la sección fluvial. La crecida restauró parcialmente la morfología *braided* del río, construyendo diversas barras y canales. Además, acentuó los procesos de incisión fluvial en el cauce, singularmente intensos en las inmediaciones de los puentes que cruzan el río. Este proceso denota un déficit sedimentario provocado por los cambios de usos del suelo, la extracción de áridos y la retención de sedimentos en los embalses de la cuenca. El presente trabajo, describe estos procesos de cambio y analiza sus implicaciones morfosedimentarias, a partir de la fotointerpretación de imágenes anteriores, simultáneas y posteriores a la crecida.

PALABRAS CLAVE: Morfología fluvial, dinámica sedimentaria, ríos *braided*, SIG, cauces efímeros.

ABSTRACT

FLOOD EFFECTS ON A HUMAN-MODIFIED CHANNEL: THE PALANCIA RIVER FLOOD OF OCTOBER OF 2000

In October of 2000, the Palància River underwent a major flood, which substantially modified the morphology of the river channel. These changes took place on a river bed previously modified by public works aimed at cleaning and simplifying the river section. The flood partially restored the braided morphology, reconstructing bars and channels. Moreover, river incision processes increased, particularly downstream the Palància bridges. This process reveals a sedimentary deficit caused by reservoirs; land use changes and gravel mining. The aim of this work is to describe these processes of change and to analyze the morphosedimentary consequences, through the interpretation of aerial photographs previous, simultaneous and subsequent to the flood.

KEY WORDS: Fluvial morphology, sedimentary dynamics, braided rivers, GIS, ephemeral rivers.

* Departament de Geografia, Universitat de València.

** Centro Valenciano de Estudios del Riego, Universitat Politècnica de València.

Fecha de recepción: 21 de mayo de 2012. Fecha de aceptación: 18 de julio de 2012.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, los ríos efímeros mediterráneos históricamente han sido objeto de importantes cambios de origen antrópico, que han afectado de manera acusada a su morfología y a su dinámica sedimentaria (HOOKE, 2006). Los cambios en los usos del suelo, la extracción de áridos en los lechos fluviales y la construcción de embalses han sido reiteradamente señalados como algunas de las principales actividades humanas que han modificado los balances sedimentarios fluviales, provocando importantes ajustes en perfil y planta (LIÉBAULT y PIÉGAY, 2002; SURIAN y RINALDI, 2003; ZANONI *et al.*, 2008; SURIAN *et al.*, 2009; RINALDI *et al.* 2005; WISHART *et al.*, 2008). Por su parte, los cauces han sido alterados por la construcción de puentes y azudes, con frecuencia su anchura se ha reducido por la presión agrícola (BEGUERÍA *et al.*, 2006; GARCÍA-RUIZ y LÓPEZ-BERMÚDEZ, 2009; GARCÍA-RUIZ, 2010) y muchas márgenes han sido fosilizadas mediante diques de defensa, singularmente en ámbitos urbanos. La actividad humana sobre barrancos, ríos secos y ramblas ha adquirido, en consecuencia, formas e impactos muy diversos (BOIX-FAYOS, 2007), con efectos a veces solapados o incluso contradictorios. El análisis de la dinámica sedimentaria y la evolución de la morfología fluvial alcanzan en consecuencia una complejidad extrema, toda vez que la acción antrópica acontece en paralelo a procesos y pulsaciones hidroclimáticas de escala secular (BARRIENDOS y MARTÍN-VIDE, 1998; LÓPEZ-BERMÚDEZ *et al.* 2002; BARRIENDOS y RODRIGO, 2006; BENITO *et al.*, 2008), dificultando la identificación de vínculos causa-efecto y la ponderación de la incidencia de cada fenómeno (RINALDI *et al.*, 2005; SURIAN *et al.*, 2009)

Ocasionalmente, la extrema antropización de determinados ámbitos fluviales puede proporcionar oportunidades singulares para alcanzar una mejor comprensión del desarrollo de los procesos y formas fluviales. En el caso que nos ocupa, referido al río Palància, la artificialización del cauce llevada a cabo durante la década de los noventa del pasado siglo, mediante trabajos de regularización y “limpieza” del lecho fluvial, ofrecen la posibilidad de observar con cierta nitidez la acción de la naturaleza en la reconstrucción de un patrón de cauce *braided*.

La génesis de cauces trenzados ha requerido la atención de numerosos investigadores. Los trabajos pioneros de Leopold y Wolman (1957) y los trabajos posteriores de Ashmore (1991 a y b) y Ferguson (1993) mostraron los diversos mecanismos para la formación de cauces *braided*. Establecieron además que, para un tamaño dado de partícula, la intensidad del trenzado aumenta de forma proporcional al caudal y a la energía. Asimismo, encontraron una relación estrecha entre la anchura activa de los canales – sección por donde se transportan los sedimentos– y la profundidad, equivalente a las relaciones de geometría hidráulica clásicas (ASHMORE, 1991 a).

El objetivo del presente trabajo es analizar la regeneración del curso *braided* del Palància durante la crecida de octubre del 2000, después de haber sido nivelado en la década de los 90. Las precipitaciones registradas durante los días 22 y 23 de octubre generaron una importante crecida fluvial, que restauró parcialmente la morfología *braided* del río, construyendo diversas barras y canales sobre el lecho artificialmente regularizado. Además, acentuó los procesos de incisión fluvial en el cauce, singularmente intensos en las inmediaciones de los puentes. El presente trabajo, a partir de la fotointerpretación de imágenes anteriores, simultáneas y posteriores a la crecida, realiza las siguientes aportaciones concretas: a) delimita y cuantifica las zonas de erosión y de sedimentación; b) define los procesos de formación del cauce trenzado (*braiding*).



Figura 1. El río Palància, a la altura de Canet d'En Berenguer, presentaba en 1946 una clara morfología braided (Fuente: CECAF).

ÀREA DE ESTUDIO

El río Palància es un curso bien conocido y estudiado por diferentes autores (GUTIÉRREZ, 1958; PÉREZ CUEVA, 1988; SEGURA, 1990; MARTÍNEZ, 1991). Tiene una longitud de 85 km y drena una cuenca de 910 km², delimitada por las sierras Calderona y Espadà. Estos relieves presentan una orientación netamente ibérica (NW-SE), con predominio de litologías calcáreas a poniente e importantes afloramientos de areniscas triásicas de facies Bundsandstein hacia levante. El Palància atraviesa un conjunto de pequeñas fosas rellenas de materiales margosos terciarios y depósitos detríticos cuaternarios y construye un amplio abanico aluvial sobre la llanura litoral. Es un río regulado desde 1959, mediante el embalse del Regajo (6'6 hm³), al que se añadió en el año 2000 la presa de Algar (6'3 hm³). Presenta un módulo fluvial modesto, de apenas 1'3 m³/s en El Regajo, y su lecho queda habitualmente en seco en sus últimos 25 km, aguas abajo de l'Assut de la Sèquia Major de Sagunt, debido tanto a las derivaciones efectuadas para el riego, como a la permeabilidad de un lecho en el que predomina la fracción gruesa.

El tramo objeto de estudio es el más próximo a su desembocadura. Ocupa los últimos seis kilómetros del río, entre el puente de la CN-340 en la ciudad de Sagunt y el mar Mediterráneo. En este sector el río presentaba históricamente una morfología típicamente braided. Las imágenes aéreas de 1946 y 1957 muestran la presencia de numerosas barras e islas fluviales, canales trenzados y chute channels (figura 1).

A partir de los años sesenta diversas actuaciones antrópicas, principalmente extracciones de gravas y ocupaciones del cauce por cultivos y construcciones, fueron alterando progresivamente la morfología fluvial. Las afecciones más graves se produjeron en los años ochenta y noventa, momento en el que se sucedieron diversas obras de encauzamiento, que arrasaron definitivamente los canales trenzados y las barras fluviales, confiriendo al río un aspecto homogéneo y una topografía regular. Estas intervenciones perseguían incrementar la capacidad de evacuación del cauce sin ensanchar su sección transversal, aumentando puntualmente su profundidad y reduciendo su rugosidad. Eran el resultado de ciertas demandas sociales de limpieza de los cauces, perseguían

consolidar las tierras ganadas al río y respondían a unos criterios ingenieriles de defensa frente a las inundaciones basados en una concepción domesticadora de la naturaleza.

METODOLOGÍA

Con la finalidad de obtener una caracterización del cauce y de los cambios morfológicos observados en el río Palància en octubre de 2000, se ha efectuado un seguimiento a partir de tres series de fotografías aéreas. Para cartografiar la situación precedente a la riada se consultaron ortoimágenes correspondientes al verano del año 2000. Para el estado posterior a la crecida se empleó, por un lado, un grupo de fotografías oblicuas tomadas desde una avioneta en fechas inmediatamente posteriores a la crecida, a principios de noviembre del año 2000 y, además, ortoimágenes correspondientes al invierno de 2004, en las que los canales de aguas bajas estaban activos por unas lluvias recientes.

Las fotografías oblicuas fueron rectificadas mediante el programa ArcGIS TM versión 9.3 (ESRI, Redlands, California, 2009). Se utilizaron entre 10 y 12 puntos de control seleccionados en las inmediaciones del río. Se asumió que la distorsión era parabólica y por ello se efectuó un ajuste polinómico de segundo orden. Posteriormente, mediante el mismo software, se procedió a la digitalización de las formas identificadas para la situación anterior y posterior a la crecida.

Para el caso de la situación previa a la riada, se aplicó una primera clasificación en 13 categorías texturales. Cinco de ellas correspondían a zonas transformadas o claramente antropizadas: caminos, escombreras, cultivos, diques y superficies asfaltadas. Otras tres distinguían acumulaciones de sedimentos de diferentes calibres, entre bloques y gravas, especificándose su posición dentro o fuera del canal de aguas bajas y la presencia de herbáceas. Además, se identificaron aquellas zonas donde afloraba la roca madre, bien en forma de conglomerados con costras calcáreas o como argilitas rojas finopleistocenas. Por último, se consideraron aquellos pequeños sectores ocupados por vegetación arbustiva o arbórea.

Sobre las fotos oblicuas posteriores a la riada, se digitalizaron las texturas identificadas, empleándose como elemento de apoyo la ortoimagen del año 2004. Con posterioridad, se efectuó un reconocimiento sobre el terreno de los depósitos que no habían experimentado modificaciones, con el fin de contrastar la correcta identificación de las diferentes texturas. Gracias a estos trabajos y a la calidad de las imágenes oblicuas, se pudo obtener una clasificación más detallada de los depósitos que la obtenida para el año 2000. En este caso, además de las categorías descritas en la clasificación de la situación previa a la crecida, se pudo distinguir entre los depósitos de bloques, cantos, gravas y arenas, en función del predominio de los distintos calibres de clastos.

Estas capas sirvieron para identificar las formas fluviales anteriores y posteriores a la crecida del Palància y proceder a su análisis. Seguidamente, todas las categorías distinguidas en ambos momentos se reclasificaron en tres –formas antrópicas, erosivas y deposicionales– con objeto de establecer un balance de los procesos predominantes en la crecida y cuantificar los cambios acaecidos. Para ello fue necesario intersectar las capas mediante el citado SIG y generar un mapa de cambios con el cruce de valores resultantes.

Por otra parte se ha utilizado un MDE derivado de datos LIDAR obtenidos en 2003, sobre el que se han realizado diversos cortes transversales para obtener la morfología de las diversas formas erosivas y de sedimentación del cauce posteriores a la crecida de 2000, dado que entre ambas fechas no se han producido crecidas.

GÉNESIS Y DESARROLLO DE LA CRECIDA DEL 24 DE OCTUBRE DE 2000

Entre el 20 y el 26 de octubre de 2000 se produjo un episodio de baja fría que afectó principalmente a la parte septentrional y central del territorio valenciano. La situación sinóptica dominante se caracterizó por la presencia de una depresión aislada en niveles altos (DANA) y un persistente flujo cálido y húmedo del este en los niveles bajos, apuntando hacia la zona mediterránea española. La situación sinóptica fue muy estacionaria, se prolongó entre 4 y 5 días, produciendo un aporte continuo de humedad y generación de inestabilidad convectiva en la zona.

El 22 de Octubre de 2000, una DANA fría que se había desprendido de la circulación general del oeste, se dispuso al sur de la península Ibérica. En niveles bajos la situación estaba dominada por dos intensos anticiclones sobre el Atlántico y Europa, que bloqueaban los flujos de salida del Mediterráneo. Una baja, situada sobre Argelia impulsaba un flujo de largo recorrido marítimo, desde el litoral de Libia hasta las costas orientales españolas. Esta configuración se mantuvo casi estacionaria durante aproximadamente 90 horas, aportando de manera persistente aire cálido y húmedo hacia el levante peninsular. Como consecuencia de esta situación, se registraron precipitaciones muy cuantiosas durante los días 23 y 24 (Homar *et al.*, 2002).

Los registros de precipitación del Instituto Nacional de Meteorología (INM) y la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) muestran como el posicionamiento de la DANA al sur de la península Ibérica provocó un disparo de las precipitaciones, que habían sido moderadas durante los días 20 y 21 de octubre (Tablas 1 y 2). Mediado el día 22, como se infiere de la comparación de los datos de ambas fuentes, comenzó a incrementarse la intensidad de la lluvia, coincidiendo con la llegada de la DANA a la cordillera del Rif. Las precipitaciones alcanzaron una mayor torrencialidad a lo largo del día 23 y durante la madrugada del 24, para perder progresivamente intensidad tras el amanecer.

Los registros del área afectada por el evento en la cuenca del Palància son bastante homogéneos. Los valores máximos, según el INM, aparecen tanto en la cuenca baja (443'7 en Sagunt) como en la parte alta (439 en Gaibiel), mientras que los mínimos no bajan de los 317 tomados en Gilet, justo en la margen más meridional de la cuenca¹. Tampoco se aprecian diferencias significativas entre los observatorios situados en la Sierra Calderona y Espadà, probablemente como consecuencia de que la orientación sureste del flujo coincide con la del valle del Palància.

Los suelos de la cuenca fueron saturándose durante los cuatro primeros días del evento y en las primeras horas del día 24 se produjo un notable incremento de la escorrentía, provocando la crecida de los principales tributarios del Palància. Los aportes en la cabecera de la cuenca generaron un hidrograma con una punta de 362,8 m³/s en el Regajo a las 6:30 del día 24 (figura 2). Cuatro horas más tarde, en el embalse de Algar² se estimó un caudal punta de 753 m³/s (figura 3). La velocidad de transmisión de la punta de la crecida debió estar en torno a los 6 km/h. Durante este período de tiempo el caudal se duplicó. La laminación producida por el embalse de Algar, produjo un caudal punta de unos 288 m³/s.

¹ El valor de 316 registrado por el INM en la Cueva Santa (Altura) se debe a la falta de datos de los días 20 y 21.

² Como se observa en los datos del SAIH del mismo lugar (tabla 2), la precipitación debió alcanzar los 376 mm. En octubre de 2000 el embalse de Algar se llenó por primera vez de forma brusca, y llegó a verter por el aliviadero, lo que generó una gran preocupación en la Confederación Hidrográfica del Júcar. El ingeniero encargado del embalse, Enrique Cifres, se desplazó a la presa y realizó una estimación *in situ* de los caudales, que se plasmaron en el hidrograma de la figura 3. Es por ello que la precisión del hidrograma no es comparable con el obtenido en el Regajo (figura 2).

Tabla 1. Precipitaciones (mm) registradas en los observatorios de la cuenca del Palància entre el 20 y el 25 de octubre (Fuente: Instituto Nacional de Meteorología). Las líneas separan los observatorios situados aguas arriba del embalse del Regajo, entre éste y el de Algar, y aguas abajo de este último.

DÍAS	20	21	22	23	24	25	TOTAL
GABIEL	4,0	30,6	80,2	205,8	118,6	0	439,2
EMBALSE DEL REGAJO	3,2	24,9	65,2	212,5	127,5	0	433,4
ESLIDA PUNTAL DEL ALJIBE			130,7	176,0	114,0	0	420,7
SONEJA	6,4	28,6	66,5	187,0	115,0	0	403,4
SEGORBE	3,6	27,8	73,0	217,0	112,0	0	433,5
SEGORBE I.F.P.	3,3	25,5	67,0	199,0	104,5	0	399,4
SEGORBE MASÍA CRUZ	4,4	25,1	62,0	190,0	95,0	0	376,6
SEGORBE MASÍA HOYA	4,3	24,3	60,0	160,0	95,0	0	343,6
ALTURA AYUNTAMIENTO			60,5	172,0	108,0	0	340,5
ALTURA CUEVA SANTA			70,8	166,8	69,2	0	306,8
SAGUNT HE	6,7	30,3	70,4	199,0	137,3	0	443,7
SAGUNT PONTAZGO	4,9	26,5	64,0	169,0	127,0	0	391,4
GILET STO. ESPÍRITU	0,0	22,3	54,5	150,0	90,4	0	317,2
ESTIVELLA	5,9	26,7	62,0	198,0	131,0	0	423,6

Tabla 2. Precipitaciones (mm) registradas por el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar en la cuenca del Palància entre el 20 y el 25 de octubre. Registros de pluviógrafos cinco-minutales de 08:05 a 08:00 horas.

	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	TOTALES
EMBALSE DEL REGAJO	3,6	27,6	72,4	235,8	118,4	0	457,8
CUEVA SANTA	0,0	43,8	116,2	137,2	79,2	0	376,4
SOT DE FERRER	5,6	25,2	58,6	164,8	117,4	0	371,6

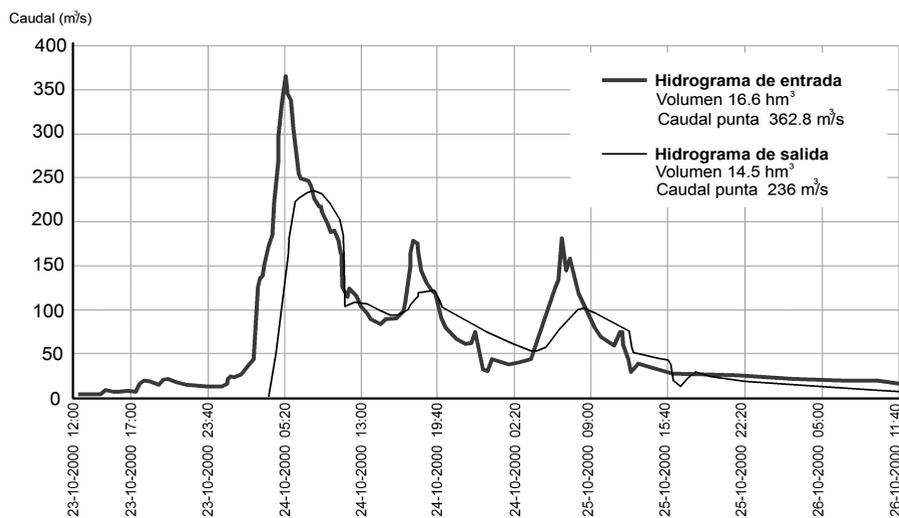


Figura 2. Caudales de entrada y salida del embalse del Regajo en la avenida de octubre de 2000 (Fuente: CHJ, 2000).

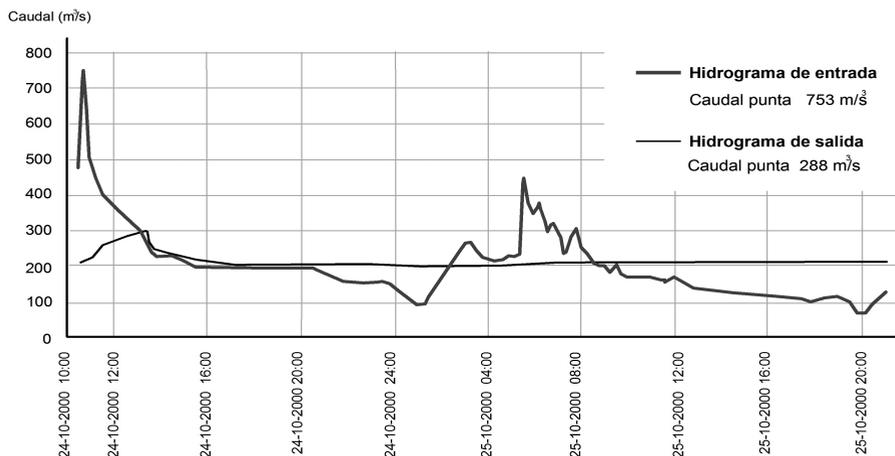


Figura 3. Caudales de entrada y salida del embalse de Algar en la avenida de octubre de 2000. Los datos de niveles fueron medidos por Enrique Cifres y su equipo y transmitidos al SAIH por vía telefónica y fax (Fuente: CHJ, 2000).

CAMBIOS GENERADOS POR LA CRECIDA EN LAS FORMAS FLUVIALES

En el año 2000, el cauce del río Palància había sido aplanado con maquinaria pesada, quedando sólo en resalte algunos sectores de litologías duras. En el centro del cauce se habían alzado dos pequeñas motas compuestas de gravas y bloques que delimitaban un canal rectilíneo de 22 metros de anchura, levemente excavado, destinado a vehicular las aguas pluviales y las crecidas de menor magnitud.

Los afloramientos de roca madre, apenas ocupaban 2'1 ha, de las cuales 0'9 corresponden a conglomerados pleistocenos, que se emplazan en un resalte situado a poco más de dos kilómetros aguas abajo del puente del ferrocarril. Inmediatamente después de este punto comenzaban a aparecer pequeños afloramientos dispersos de argilitas, el último de los cuales se situaba 400 aguas arriba del puente de la CV-320.

La regularización artificial ejecutada por la CHJ había comportado la eliminación de los antiguos canales naturales, que habían sido rellenados con el material de las barras fluviales. En consecuencia, la mayor parte del cauce estaba ocupada por gravas, cantos y bloques, que se extendían sobre 80'2 ha, de las cuales 10 correspondían al canal artificial de aguas bajas. Estos depósitos estaban consolidados por vegetación de porte arbustivo o arbóreo en otras 6 ha. Las zonas ocupadas por caminos, cultivos y otros usos antrópicos se extendían sobre 26'4 has.

Tras la crecida, se produjeron cambios sustanciales en la disposición de los materiales depositados en el cauce. La riada permitió que el río recuperara una morfología típicamente *braided*. El canal artificial de aguas bajas desapareció y se abrió un nuevo canal sinuoso, con diversas bifurcaciones alrededor de las barras y *chute channels*. Estas formas ocupaban después de la avenida 21'2 ha, duplicando por tanto la extensión que había tenido el canal artificial abierto antes de la crecida.

La cartografía elaborada con la información posterior a la riada refleja además un notable incremento de los procesos erosivos en el cauce (figura 4). En esta ocasión, la superficie ocupada por afloramientos de roca madre superaba las 11'2 ha, un incremento

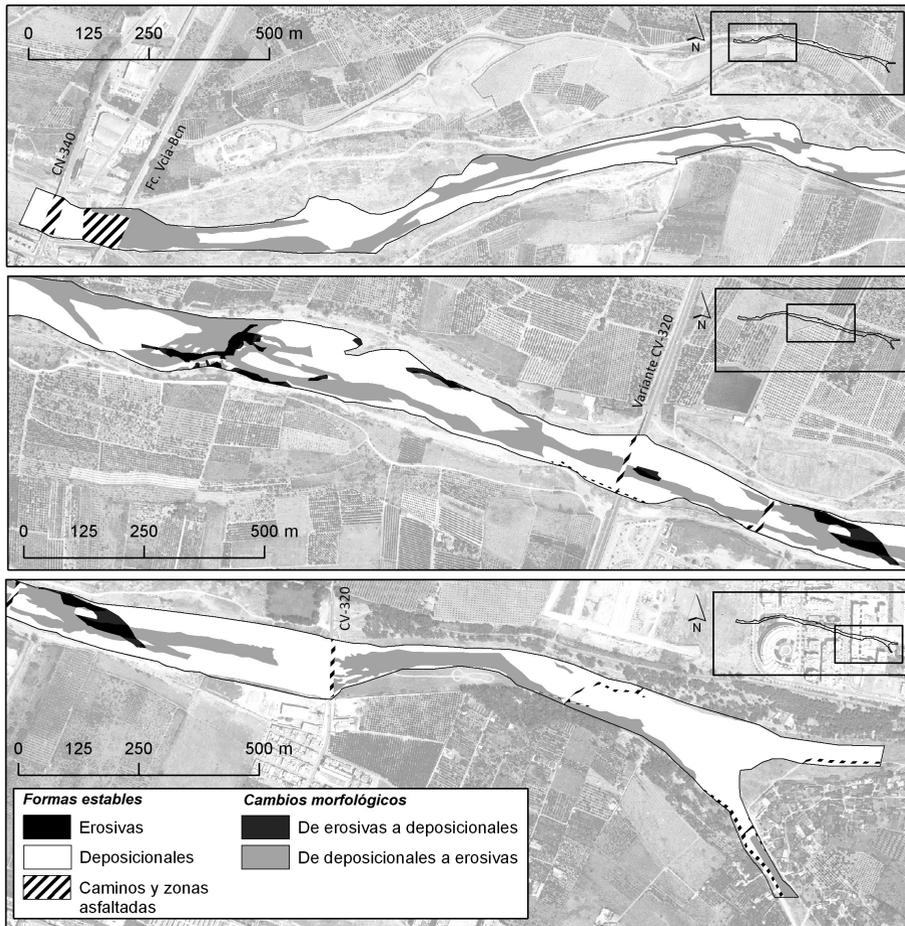


Figura 4. Cambios en las formas fluviales generados por la crecida.

que se debía fundamentalmente a las zonas ocupadas por las argilitas, que alcanzaban las 8,5 ha. Este avance se produjo principalmente aguas abajo del puente de la CV-320, donde se hicieron patentes los procesos de erosión basal.

La intersección de los mapas de los momentos previo y posterior, muestra que un 63'6% de la superficie del cauce se mantuvo estable, tanto en los sectores erosivos como en los deposicionales (figura 4). Sin embargo, el hecho más relevante es que un 29'8% pasó de formas deposicionales a erosivas, bien excavándose sobre antiguos depósitos o desmantelando éstos y haciendo aflorar la roca madre. Del resto de cambios posibles, sólo las formas que mantuvieron el carácter de erosivas en ambos periodos superaron el 2%.

El incremento de los procesos erosivos es un claro síntoma del déficit sedimentario que padece el río como consecuencia de la extracción de áridos (BATALLA, 2003; WISHART *et al.*

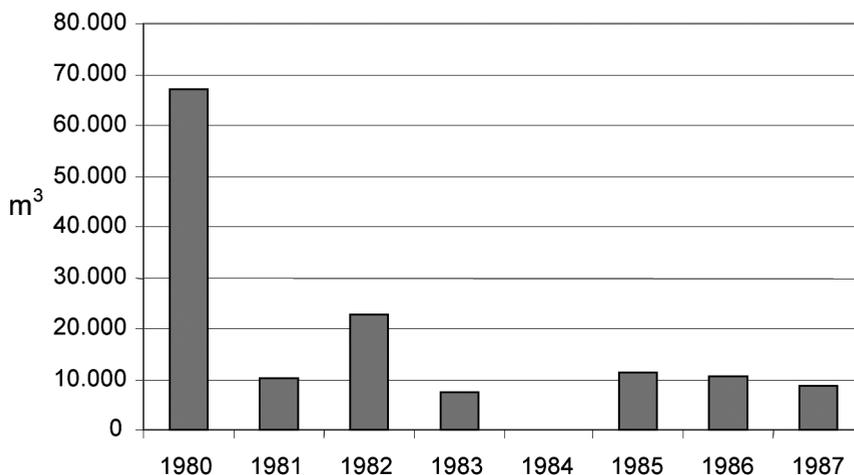


Figura 5. Extracción de áridos en el Palància entre 1980 y 1988 (Fuente: Pardo Pascual, 1991). Elaboración propia.

2008). Entre 1980 y 1988, la CHJ estimó en 137.925 m³ el sedimento extraído en el río (PARDO, 1991; SEGURA, 2004) (figura 5). Por otra parte, según datos aportados por Cobo (2008), la sedimentación acumulada en el embalse del Regajo desde su construcción en 1959 fue de 326.000 m³. Esta cifra³, sumada a la anterior, alcanza un total de 463.925 m³, que divididos por los 85 km del cauce principal dan una tasa de 5.458 m³/km. Además, a tenor de lo sucedido en áreas limítrofes (Pascual, 2004), los cambios de usos del suelo han debido ser importantes en la cuenca y seguramente han contribuido al déficit sedimentario.

LA GENERACIÓN DE UN PATRÓN SEDIMENTARIO *BRAIDED*

La crecida de octubre de 2000 generó un nuevo patrón de sedimentación de tipo *braided*. Aunque no se han podido realizar balances volumétricos, la observación en campo mostró que la lámina móvil depositada fue de unos pocos decímetros y se observaron zonas con un claro déficit sedimentario.

En los ríos *braided* se suceden una serie de secciones anchas con otras estrechas. En las primeras se produce divergencia del flujo y depósito de barras; en las segundas, en cambio, se concentra el flujo en un único canal. En el Palància se produjo también dicha configuración, con una ubicación que coincide a grandes rasgos con la que se observa en fotografías anteriores al arrasamiento del lecho. La distancia entre las secciones más anchas permanece más o menos constante, con un valor promedio de unos 650 m.

La causa fundamental de la formación de los ríos *braided* es la misma en todos los procesos: agradación local por el depósito de *sheets* de carga de fondo y pérdida de competencia en una expansión lateral del flujo (ASHMORE, 1991 b). Los mecanismos

³ La cifra aportada por Cobo en 2008, a pesar de ser posterior a la riada, rebaja a la mitad otros datos facilitados por la CHJ, publicados previamente por Pardo Pascual (1991) y reproducidos por Segura (2004), que estiman la retención en 780.000 m³. Es difícil pronunciarse sobre la bondad de unos u otros datos, ya que no consta que se hayan realizado nuevas batimetrías del embalse.

de formación de canales divergentes se han asociado a cuatro diferentes procesos: dos de tipo deposicional –depósito de barras mediales y transformación de barras transversales– y dos de tipo erosivo –procesos de *chute cutoff* y disección de lóbulos (ROBERT, 2003).

La formación de barras mediales, identificado por Leopold y Wolman (1957), consiste en la deposición de un núcleo de material más grueso cuando la corriente pierde competencia de transporte. Ashmore (1991 b) asimiló dicho proceso a un leve exceso del esfuerzo de cizalla ($\tau - \tau_0$), lo que hace que pequeñas diferencias de profundidad o de tamaño de grano pueden producir grandes cambios de competencia. La transformación de barras transversales comienza con una acumulación simétrica que se forma al final de un *pool*, donde se produce erosión local (*scour*) que suministra el material para la acumulación aguas abajo, cuando el flujo diverge. Ashmore (1991 b) asocia la aparición de este tipo de procesos a un elevado exceso de esfuerzo de cizalla.

Los procesos de *chute cutoff* implican incisión remontante por parte del flujo, que sigue una trayectoria más corta sobre una barra alterna o un *point bar*. El flujo circula sobre la barra, originando un canal que captura progresivamente mayores volúmenes de caudal y se alarga hacia aguas arriba formando un *cutoff channel*. La barra original se convierte así en una barra medial. Este proceso a menudo se inicia con el agrupamiento de pequeños tálvegs relacionados con la llegada de pulsos de carga de fondo (KNIGHTON, 1998). La disección de barras múltiples ocurre en cauces muy anchos donde el flujo se concentra en múltiples canales que al circular sobre una barra depositada en fases anteriores, la diseccionan formando muchas barras pequeñas.

Procesos de sedimentación y formación de un cauce trenzado con lámina móvil de sedimentos

Como se ha señalado anteriormente, los procesos de sedimentación predominaron en buena parte del cauce. Aunque en la naturaleza es difícil identificar los mecanismos de formación de un cauce trenzado obtenidos en laboratorio, se han seleccionado tres sectores donde se ha observado dos tipos de procesos: la transformación de barras transversales y la disección por *chute cutoff*.

El primer sector se localiza aguas abajo del puente del ferrocarril Valencia-Barcelona. A la salida del puente, el flujo discurre concentrado formando un *pool* y a continuación, se produce la separación del flujo y la consiguiente deposición (figura 6). Como consecuencia, aguas abajo del *pool* (figura 7, cortes transversales 1 a 3) se forma un lóbulo, cuya sección abombada se aprecia en los cortes 4 a 6. A partir del corte 7 y hasta el 9 se observa el final de la acumulación y la formación de un nuevo *pool* en el canal. El perfil longitudinal muestra un lóbulo abombado en la parte distal. En las imágenes se observa además la disección de este lóbulo en numerosos canales secundarios. Ambos datos aportan información sobre la génesis de este depósito: se trata de una barra transversal depositada por la falta de competencia del flujo al expandirse lateralmente. Es posible que esta barra pueda evolucionar en el futuro y quede diseccionada en barras múltiples. De hecho sobre la misma se observa la formación de un *chute channel* que podría ayudar a la disección futura de la barra (figura 6).

El segundo sector con unos procesos similares se sitúa aguas arriba del puente de Canet d'En Berenguer al Port de Sagunt (CV-320). En este caso, se ha depositado también una barra transversal de menor envergadura que en el caso anterior, pero con una disposición de las formas semejante. La erosión en el canal aguas arriba del depósito (*pool*) es muy clara en este sector (figura 8).

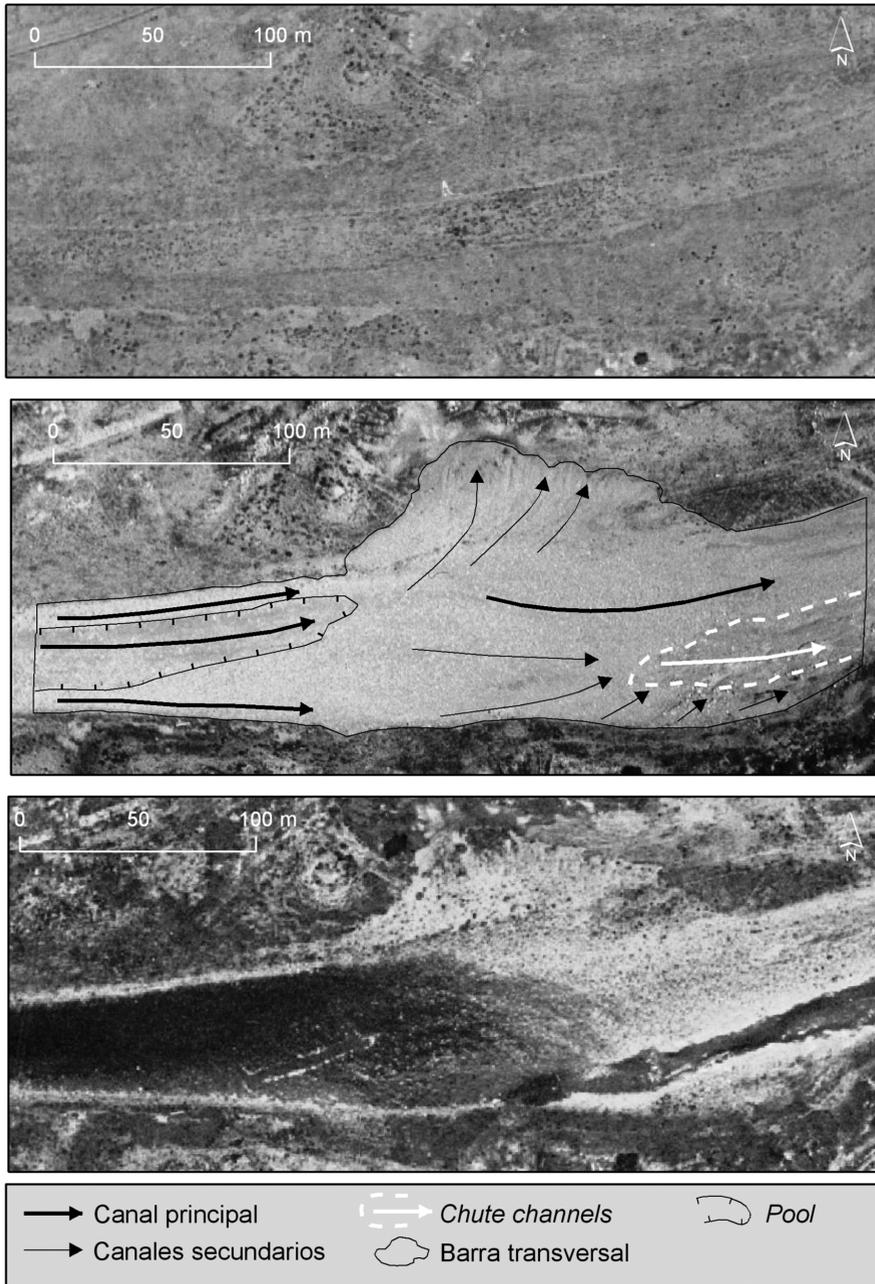


Figura 6. Barra transversal formada aguas abajo del puente del ferrocarril. Arriba en el año 2000, antes de la crecida; en el centro, en noviembre de 2000, tras la crecida; abajo en el año 2004.

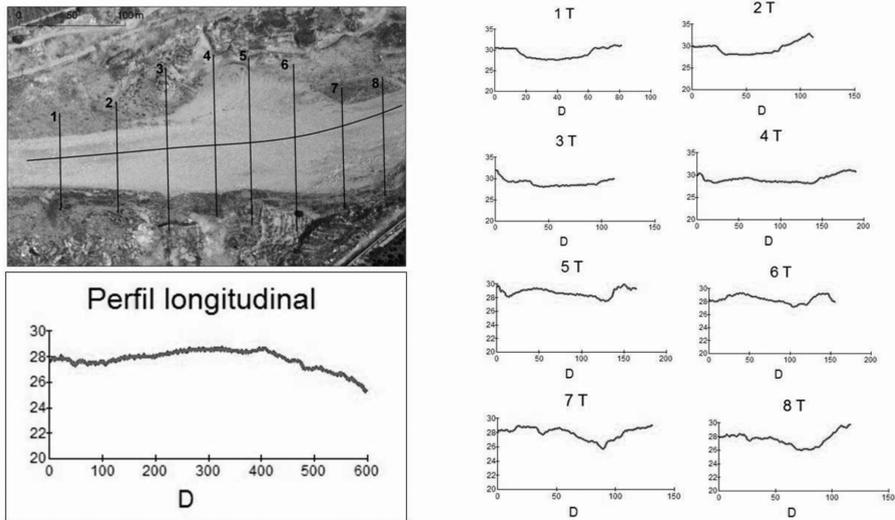


Figura 7. Perfil longitudinal y cortes transversales de la barra situada aguas abajo del puente del ferrocarril realizados a partir del MDE LIDAR de 2003.

Un de los procesos más repetidos fue la formación de brazos o canales secundarios mediante el proceso de *chute cutoff*, como se observa con claridad, en el tercer sector, justo antes de la bifurcación de la isla fluvial que se forma en la desembocadura. Aguas abajo de la zona de erosión provocada por el puente se forma una gran acumulación de sedimentos de grueso calibre. Se trata de un depósito en forma de barra lateral que se inicia después de un *pool*. Al inicio de este sector el flujo discurre concentrado en un canal lateral por la margen derecha, mientras que en la parte distal, el canal se desdibuja y el flujo diverge sobre una gran barra formando caras de avalancha. Por otra parte, la formación de un *chute channel* disecciona parcialmente la barra. Probablemente, en sucesivas crecidas estas barras queden completamente diseccionadas y formen un conjunto de barras mediales complejas (figura 9).

Procesos de erosión y formación de un cauce trenzado por erosión en roca madre

Los procesos de erosión se localizaron por todo el cauce, aunque se concentraron aguas abajo de los puentes y se manifiestan por la desaparición de la lámina móvil y la consiguiente incisión del lecho, que disecciona afloramientos de conglomerados o de argilitas. En todos los casos se trata de facies del abanico aluvial perteneciente al Pleistoceno inferior (SEGURA, 1990). La dureza de los conglomerados y las dificultades para erosionar partículas finas cohesionadas en el caso de las argilitas, hace que queden en resaltes pequeños afloramientos de dichos materiales.

En los puentes, el incremento de la potencia fluvial, generado por el estrechamiento de la sección transversal al atravesar el puente, produjo la zapa basal de las pilas. En el puente del ferrocarril la incisión se concentró en el segundo ojo más próximo a la margen izquierda, ya que, a diferencia de los otros, estaba desprovisto de refuerzos. El elevado caudal que pasó por la sección facilitó que la erosión se concentrara en este vano, donde



Figura 8. Barra transversal y lóbulo aguas arriba del puente de la CV-320. Arriba en el año 2000, antes de la crecida; en el centro, en noviembre de 2000, tras la crecida; abajo en el año 2004.

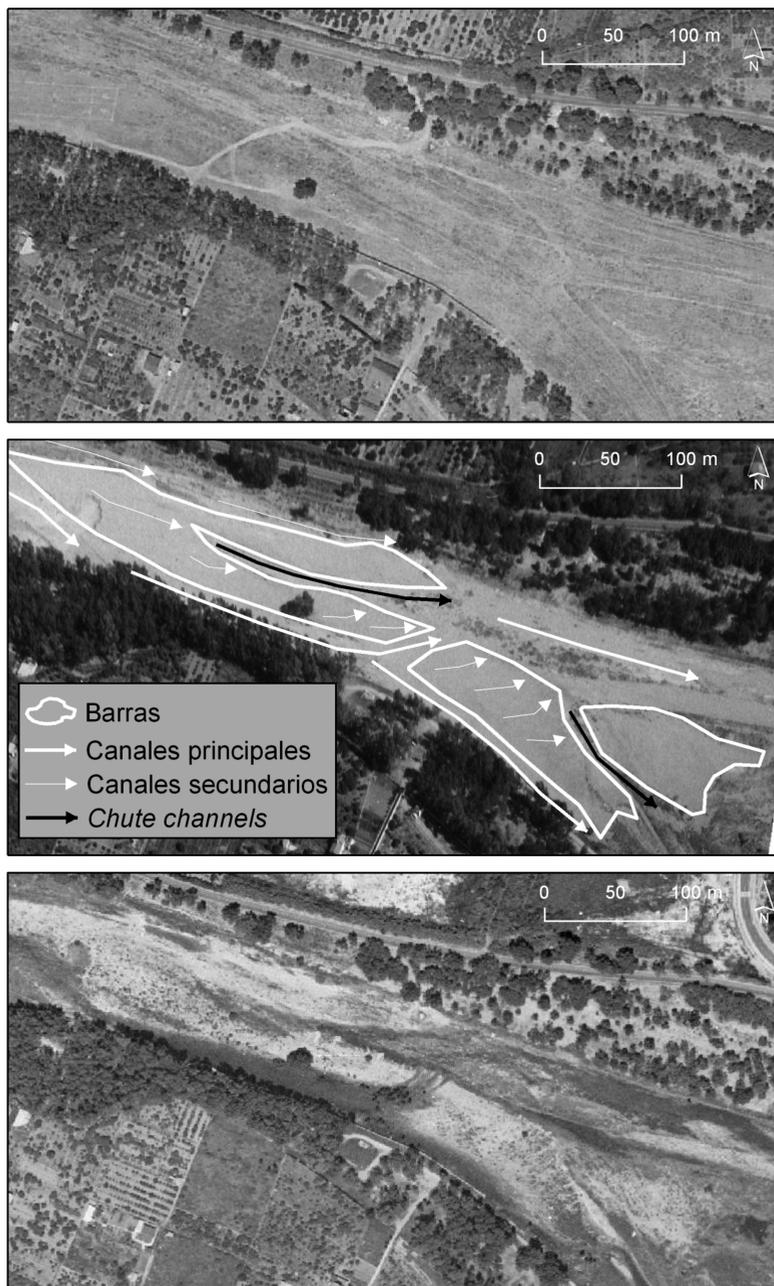


Figura 9. Barra lateral y *chute canal* aguas arriba de la bifurcación de la desembocadura. Arriba en el año 2000, antes de la crecida; en el centro, en noviembre de 2000, tras la crecida; abajo en el año 2004.



Figura 10. Cauce trenzado formado por procesos erosivos sobre conglomerados aguas abajo del puente del ferrocarril. La flecha indica la erosión de las pilas detallada en la figura 11.

se registró un descalzamiento de las zapatas de unos 2'5 m (Figuras 10 y 11). El efecto del puente se trasladó aguas abajo provocando una fuerte incisión en la roca madre. La erosión formó un modelo de cauce trenzado por disección numerosas microbarras sobre las facies de conglomerado que quedaron en resalte (figura 10).

El puente de Canet d'En Berenguer al Port de Sagunt (CV-320), debido a un diseño inadecuado, actuó como barrera al flujo. No sólo estaba mal dimensionado, sino que además queda parcialmente cegado en el sector central. Durante la crecida del 2000 el descalzamiento de las pilas afectó a una sección de unos 90 m, localizados entre la margen derecha y la zona ciega central. La incisión en todo este sector se estima en 1'5 m. Aguas abajo la erosión dejó un canal trenzado con barras en resalte y canales excavados en argilitas (figuras 12 y 14). Aguas abajo, el flujo se concentró nuevamente, para divergir y depositar la barra lateral de la figura 9.

Los procesos erosivos aguas abajo de los puentes fueron similares, ajustándose a lo descrito por Ashmore (1991 b) para la disección múltiple de barras. Estos procesos, válidos para cauces con lámina móvil, parecen repetirse sobre roca madre (figuras 12, 13 y 14), denominándose en la bibliografía específica como *grooves* y *furrows* (WOHL, 1998). Las observaciones en laboratorio sugieren que, al principio, el flujo se concentra en canales aislados y discontinuos por los que se transporta la carga de fondo, que en ocasiones se deposita al final de dichos canales. Alrededor de esos lóbulos se concentra el flujo y se organiza la red de pequeños canales (ROBERT, 2003). Al final de esta zona de erosión el flujo se expande de nuevo y se generan formas de acumulación como las comentadas anteriormente.



Figura 11. Zapatas descalzadas del puente del ferrocarril.

CONCLUSIONES

El cauce del río Palància ha experimentado cambios importantes que han afectado a su planta y sección. La incisión y el estrechamiento del canal han supuesto un cambio en las condiciones hidrodinámicas que han modificado las zonas de erosión y sedimentación.

En el año 2000 el cauce había sido allanado por la extracción de gravas y las intervenciones de encauzamiento ejecutadas por la Confederación Hidrográfica del Júcar. La riada del día 24 de octubre modificó significativamente la morfología fluvial. En el presente trabajo, se han identificado las siguientes tendencias:

- En primer lugar se produjeron cambios en la superficie afectada por procesos de erosión y sedimentación. Aunque el 63'6% de la superficie del cauce se mantuvo estable, ya que no fue afectado por la crecida, el hecho más relevante es que un 29'8% de la superficie pasó de formas deposicionales a erosivas, bien excavándose sobre la lámina móvil o haciendo aflorar la roca madre. Este hecho está relacionado con el déficit de sedimentos que padece el río debido a la extracción de áridos y la retención de sólidos en los embalses.
- Por otra parte, se ha producido una fuerte erosión en las pilas de los puentes –el del ferrocarril Valencia-Barcelona y el de la CV-320– que se ha transmitido aguas abajo de los mismos. En el primer caso, la erosión basal de uno de los vanos superó los 2 m de altura y se trasladó aguas abajo, erosionando el conglomerado subyacente; en el segundo, la incisión afectó a más de la mitad de los ojos del puente, dejando un conjunto de microformas talladas en la roca madre, erosionando las argilitas encostradas pleistocenas.

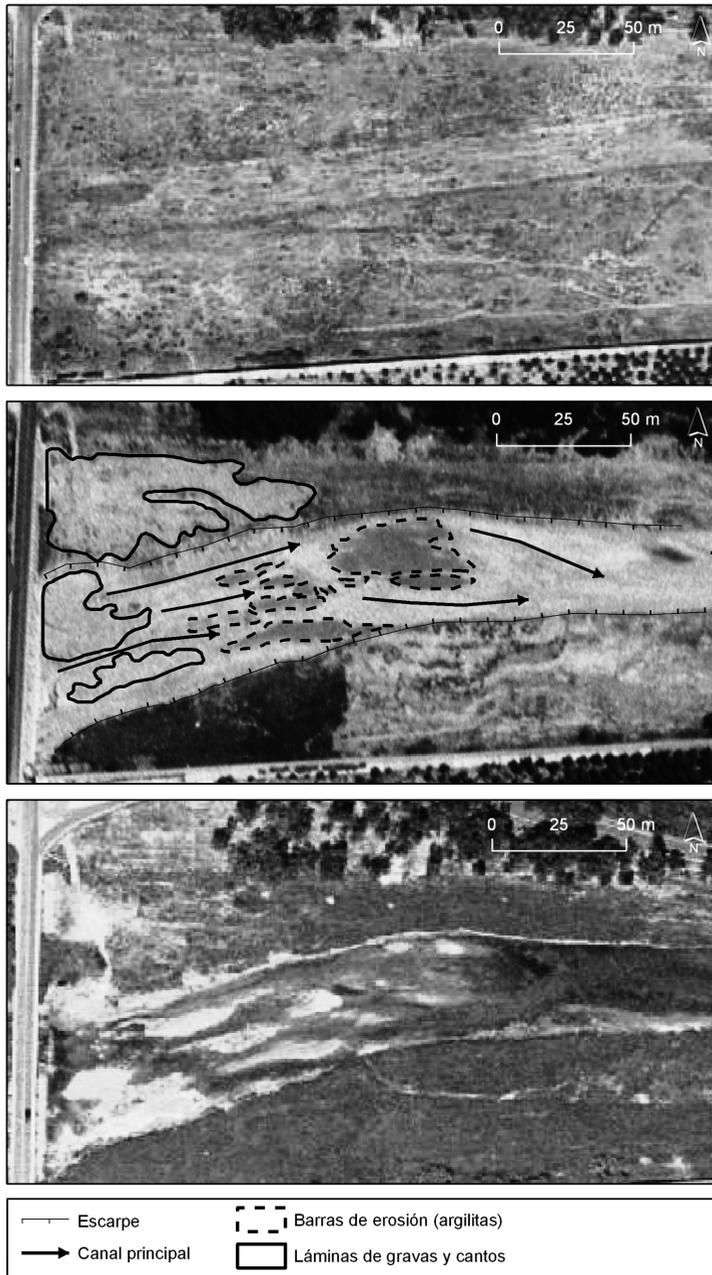


Figura 12. Canal trenzado con barras en resalte y canales excavados en argilitas aguas abajo del puente de la CV-320. Arriba en el año 2000, antes de la crecida; en el centro, en noviembre de 2000, tras la crecida; abajo en el año 2004.



Figura 13. Erosión basal sobre las argilitas pleistocenas en el puente de la CV-320.



Figura 14. Barras y canales labrados sobre argilitas rojas aguas abajo del puente de la CV-320.

- Además, se reconstruyó un patrón *braided*, mediante acumulación (barras transversales) y disección (*chute channels* y disección múltiple de barras). Por otra parte, cabe señalar que la localización de las barras coincide en la mayor parte de casos con los depósitos

precedentes al arrasamiento del lecho. Este hecho demuestra que la geometría hidráulica (anchura activa, profundidad y pendiente) permanece en equilibrio estable, aunque hayan cambiado las interrelaciones. De esta manera, el estrechamiento de la sección ha sido compensado con el encajamiento y quizás también con cambios de pendiente. Los procesos de formación de un patrón *braided* son de tipo deposicional (transformación de barras transversales), pero sobre todo responden a procesos de disección (*chute cutoff* y disección múltiple de barras), denotando un incremento importante de la erosión.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido financiado con fondos del proyecto del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, (CGL2009-14220-C02-02-BTE) y cuenta con fondos FEDER. Queremos agradecer también a la Confederación Hidrográfica del Júcar la cesión del informe sobre la riada del 2000 y los datos LIDAR y las series de lluvias del SAIH. Asimismo, mostramos nuestro agradecimiento a Miquel Ferriz Sanz, que ha colaborado en la georreferenciación de las fotografías oblicuas; a Txomin Hermosilla y Josep Pardo Pascual, del Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodèsia i Fotogrametria de la Universitat Politècnica de València, que han elaborado el MDE de 2003 derivado de datos LiDAR, y a Eduardo Albentosa, del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de Valencia, por facilitarnos los datos del Instituto Nacional de Meteorología.

BIBLIOGRAFÍA

- ASHMORE, P.E. (1991 a): Channel morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams, *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 37-52.
- ASHMORE, P.E. (1991 b): How do gravel-bed rivers braid?, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28, 3, 326-41.
- BARRIENDOS, M. AND MARTIN-VIDE, J. (1998): Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the spanish mediterranean coastal area (14th–19th Centuries), *Clim. Change*, 38, 4, 473-491.
- BARRIENDOS, M. AND RODRIGO, F. S. (2006): Study of historical flood events on spanish rivers using documentary data, *Hydrological sciences journal*, 51, 5, 765-783.
- BATALLA VILLANUEVA, R.J. (2003): Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining: a review with examples from NE Spain, *Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*, 17, 3, 79-91.
- BEGUERÍA, S., LOPEZ-MORENO, J.I., GOMEZ-VILLAR, A., RUBIO, V., LANA-RENAULT, N. AND GARCIA-RUIZ, J.M. (2006): Fluvial adjustments to soil erosion and plant cover changes in the Central Spanish Pyrenees RID A-7269-2010, *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, 88A, 3, 177-186.
- BENITO, G., THORNDYCRAFT, V.R., RICO, M., SANCHEZ-MOYA, Y. AND SOPENA, A. (2008): Palaeoflood and floodplain records from Spain: evidence for long-term climate variability and environmental changes, *Geomorphology*, 101, 1-2, 68-77.
- BOIX-FAYOS, C., BARBERA, G.G., LOPEZ-BERMEDEZ, F. AND CASTILLO, V.M. (2007): Effects of

- check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain), *Geomorphology*, 91, 1-2, 103-123.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR (CHJ) (2000): *Episodio de gota fría en el ámbito territorial de la C.H.J. de los días 20 al 26 de octubre de 2000*. Documento inédito.
- COBO, R. (2008): Los sedimentos de los embalses españoles, *Ingeniería del agua*, 15, 4, 231-241.
- FERGUSON, R. (1993): Understanding braiding processes in gravel-bed rivers: progress and unsolved problems, *Geological Society, London, Special Publications*, 75, 1, 73-87.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. Y LÓPEZ-BERMÚDEZ, F. (2009). La erosión del suelo en España, *Sociedad Española de Geomorfología*, Zaragoza, 441.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. (2010): The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review, *Catena*, 81, 1, 1-11.
- GUTIÉRREZ, J. (1958): *Breve estudio geomorfológico del río Palancia: curso normal y avenidas*, Instituto Laboral, Segorbe, 16.
- HOMAR, V; ROMERO, R; RAMIS, R AND ALONSO, S. (2002). Numerical study of the October 2000 torrential precipitation event over eastern Spain: analysis of the synoptic scale stationarity. *Annales Geophysicae* 20, 2047-2066.
- HOOKE, J.M. (2006): Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region, *Geomorphology*, 79, 3-4, 311-335.
- KNIGHTON, D. A. (1998): *Fluvial forms and process: a new perspective*. Arnold, London, 383.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*, US Geological Survey Professional Paper, 282-B, 85.
- LIÉBAULT, F. AND PIÉGAY, H. (2002): Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France, *Earth Surf.Process.Landforms*, 27, 4, 425-444.
- MARTÍNEZ, J. (1991): El riu de Morvedre i la riuada de 1783, *Arse*, 26:93-112.
- PARDO PASCUAL, J.E. (1991): *La erosión antrópica en el litoral valenciano*, Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports, Generalitat Valenciana, Valencia, 240.
- PÉREZ CUEVA, A.J. (1988): *Geomorfología del sector Ibérico valenciano entre los ríos Mijares y Turia*, Universitat de València, 217.
- PASCUAL AGUILAR, J.A. (2004): Dinámica reciente de usos del suelo en el continuo metropolitano de Valencia, *Cuadernos de Geografía*, 76, 20-29.
- RINALDI, M., WYZGA, B. AND SURIAN, N. (2005): Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives, *River Research and Applications*, 21, 7, 805-828.
- ROBERT, A. (2003): *River processes: an introduction to fluvial dynamics*. Arnold, Hodder Headline Group, 214.
- SEGURA, F. (1990): *Las ramblas valencianas: algunos aspectos de hidrología, geomorfología y sedimentología*, Universitat de València, València, 229.
- SEGURA, F. (2004): Cambios hidrológicos en las ramblas y barrancos del Golfo de Valencia a lo largo del siglo XX. En: A. Gil Olcina (coord.): *Alteración de los regímenes fluviales peninsulares*. Fundación Caja Murcia, Murcia, cf. pp. 349-389.
- SURIAN, N. AND RINALDI, M. (2003): Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy, *Geomorphology*, 50, 4, 307-326.
- SURIAN, N., ZILIANI, L., COMITI, F., LENZI, M.A. AND MAO, L. (2009): Channel adjustments and alteration of sediment fluxes in gravel-bed rivers of North-Eastern Italy: potentials and limitations for channel recovery, *River Research and Applications*, 25, 5, 551-567.

- WISHART, D., WARBURTON, J. AND BRACKEN, L. (2008): gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bed river: the River Wear, Northern England, *Geomorphology*, 94, 1-2, 131-152.
- ZANONI, L., GURNELL, A., DRAKE, N. AND SURIAN, N. (2008): Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs, *River Research and Applications*, 24, 8, 1141-1159.
- WHOL, E. (1998): Bedrock channel morphology in relation to erosional processes. In K. J. Tinkler and E. E. Wohl (eds.): *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*, Amer. Geophysical Union, Geophysical Monograph series, 107, 133-153.

