

# EROSIÓN, SEDIMENTACIÓN Y RESTAURACIÓN DE RÍOS. EJEMPLOS DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN

• Juan Pedro Martín-Vide •  
*Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (España)*

## Resumen

Este artículo presenta algunos ejemplos de estudio de ingeniería fluvial en que el sedimento desempeña un papel relevante, dominio llamado a veces *hidromorfología* fluvial, *fluviomorfología* o también *morfodinámica* fluvial. Trata más del perfil longitudinal y las secciones transversales del río que de la movilidad en planta. Los ejemplos de ingeniería proceden de Latinoamérica, de la erosión en los ríos de la costa norte del Perú durante El Niño de 1998 y de la sedimentación en el cauce del río Pilcomayo, que comparten Bolivia, Argentina y Paraguay, en ambos casos como fruto de la experiencia en misiones europeas. Por su magnitud, esta clase de problemas interesan a la geomorfología fluvial. Los ejemplos de restauración proceden de Europa, en particular del río Besòs cerca de Barcelona, y de países europeos más avanzados. Se trata siempre de la restauración de ríos de gravas pequeños. Al final se tocan de forma breve temas de investigación en ríos torrenciales de pendiente alta y protecciones de escollera (enrocado), desarrollados en la UPC por el autor y sus colaboradores. El artículo fue la conferencia inaugural del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica celebrado en San José de Costa Rica del 9 al 12 de septiembre de 2012.

**Palabras clave:** erosión, sedimentación, restauración, morfodinámica, río Piura, río Pilcomayo, río Besòs, umbral de fondo.

## Introducción

Lo que se puede decir sobre cómo discurre el agua en el cauce de un río (y también fuera de él cuando el río desborda) es lo que se llama hidrodinámica. Este nombre necesita el adjetivo fluvial, pues también existe una hidrodinámica marítima, por ejemplo, que tiene que ver con el oleaje, las mareas o las corrientes en el mar. Lo más olvidado de los ríos, sin embargo, es que también el cauce se mueve y se transforma, aunque sea de forma más lenta. Para la disciplina que explica cómo ocurre este movimiento se ha acuñado el término todavía provisional de *morfodinámica*. También se le ha de añadir "fluvial", pues el estudio de las transformaciones de las playas en la costa es un ejemplo pertinente de morfodinámica, en este caso, marítima. Otros nombres de la morfodinámica fluvial

son fluviomorfología e hidromorfología. Es frecuente la incompreensión de los ingenieros civiles (incluso hidráulicos) hacia este asunto. Habitados a la geometría, bien formados en proyecto y cálculo de obras, se encuentran incómodos cuando el lugar de implantación de una obra está sujeto a incertidumbres, que son los interrogantes a los que se enfrenta la dinámica fluvial. En efecto, la inestabilidad fluvial puede dar al traste con obras geométricamente óptimas, muy bien concebidas y calculadas, como se verá en el primer ejemplo.

Los cambios en los cauces de interés en morfodinámica ocurren en tiempos comparables a la vida humana y tienen lugar en los ríos aluviales, cuyos contornos laterales y de fondo están formados por partículas traídas por el río. El río transporta una materia mucho menos interesante que el agua como recurso, pero

decisiva para su constitución, ya que cualquier cambio fluvial tiene que ver con los sólidos transportados. A efectos prácticos, los sólidos van en un solo sentido, el de la gravedad, y no vuelven nunca a las cabeceras de las cuencas o a las partes superiores de los cauces, a diferencia del agua. Es un movimiento mucho menos cuantioso, pero tan incesante como el del agua y en un solo sentido. El segundo ejemplo será elocuente al respecto. La clave de la morfodinámica fluvial se agazapa ahí: en esa materia llamada "sedimento" (aunque "sedimento" debería significar el fruto de la sedimentación, se extiende a todos los sólidos del río). Un río es como una cinta transportadora (figura 1). La goma de la cinta es el cauce del río y la velocidad de la cinta, el caudal de agua. La cinta no se para nunca, está siempre en movimiento, como el ciclo hidrológico; de manera incesante arrastra en su movimiento a los sólidos recogidos arriba, volviendo de vacío al origen. La diferencia de la cinta con el río es que el cauce del río suelta o captura sólidos, además de conducirlos, cambiando así sus propiedades (anchura, profundidad, pendiente, sinuosidad). Es como si, mientras la cinta se moviera, la goma se estirase, encogiese, ensanchase, estrechase, torciese o enderezase...

La morfodinámica es una ciencia imperfecta. No se ocupa de objetos o procesos creados por el hombre sino de elementos de la naturaleza, que son todos distintos. Existe un

conocimiento antiguo, empírico y *ad hoc* sobre los ríos. La dinámica de un río despierta en todos la intuición. En el otro extremo, la ciencia de la mecánica de fluidos se ha esforzado por desentrañar el movimiento del agua y del cauce, pero simplificando e idealizando los problemas, para poder usar la experimentación y las matemáticas, alejándose con ello de la complejidad real.

Es importante no perder de vista que el río es fruto de su cuenca, que le proporciona agua y partículas sólidas: de su geología, topografía, edafología,... y de la planificación territorial (usos del suelo). Esto tiene particular importancia cuando se planea la restauración fluvial de un río, como se verá en el tercer ejemplo. Además del agua y los sólidos, la esfera biológica (la vegetación) es un factor importante en la morfodinámica de los ríos, además de ser el núcleo de su valor ambiental.

### Primer ejemplo de ingeniería en Latinoamérica

El río Piura drena unos 8 000 km<sup>2</sup> de la región semidesértica de la costa norte del Perú. En el curso bajo ha tenido cambios en planta grandes e incesantes, en especial por causa de fenómenos de El Niño. Su lecho es arena muy fina ( $D_{50} = 0.15$  mm). Para la ciudad de Piura fue dramática la pérdida de dos puentes durante El Niño de 1998, pero el río no desbordó como

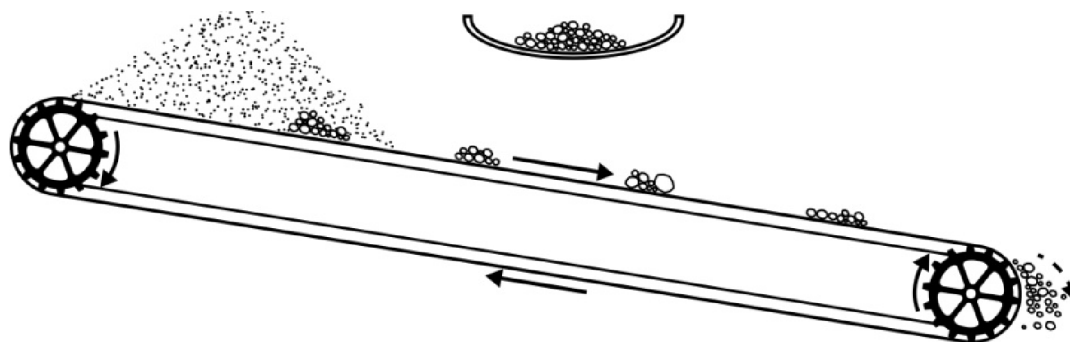


Figura 1. Una cinta transportadora como analogía de un río.

en el fenómeno anterior ocurrido en 1983. Los datos sobre el río y sus puentes plantean algunas preguntas interesantes sobre la erosión del fondo.

Veamos un puente que resistió (figura 2), en el que se registraron los niveles de fondo durante el paso de El Niño (instantes A, B, C y el final D, en junio de 1998). El fondo descendió al aumentar el caudal y el nivel (de A a C), y se recuperó al disminuir el caudal (de C a D). Esta fluctuación conocida en ríos aluviales (Leopold *et al.*, 1964) quedó sin embargo muy descompensada, porque entre la posición original y final del fondo mediaron unos 2 m. Esto fue evidente para la población que vivió aquel Niño: el fondo del río quedó más bajo tras

seis meses de crecida. ¿Por qué? Tras la crecida de 1983, el río fue canalizado en este tramo urbano, aunque sin reducción de la anchura, es decir, sin motivo para la incisión. Respecto a uno de los puentes que cayó pese a tener una cimentación profunda (figura 2), es interesante indicar que el fallo ocurrió el 16 de marzo, cuatro días después del paso del caudal punta de la crecida ( $4\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ). Esto nos interroga sobre la importancia de la persistencia, es decir de la duración, en las acciones de erosión local (y quién sabe si de erosión general también), que pueden dar al traste con los puentes.

Otro aspecto interesante atañe al perfil longitudinal desde la ciudad de Piura hacia la desembocadura (figura 3, la ciudad llega hasta

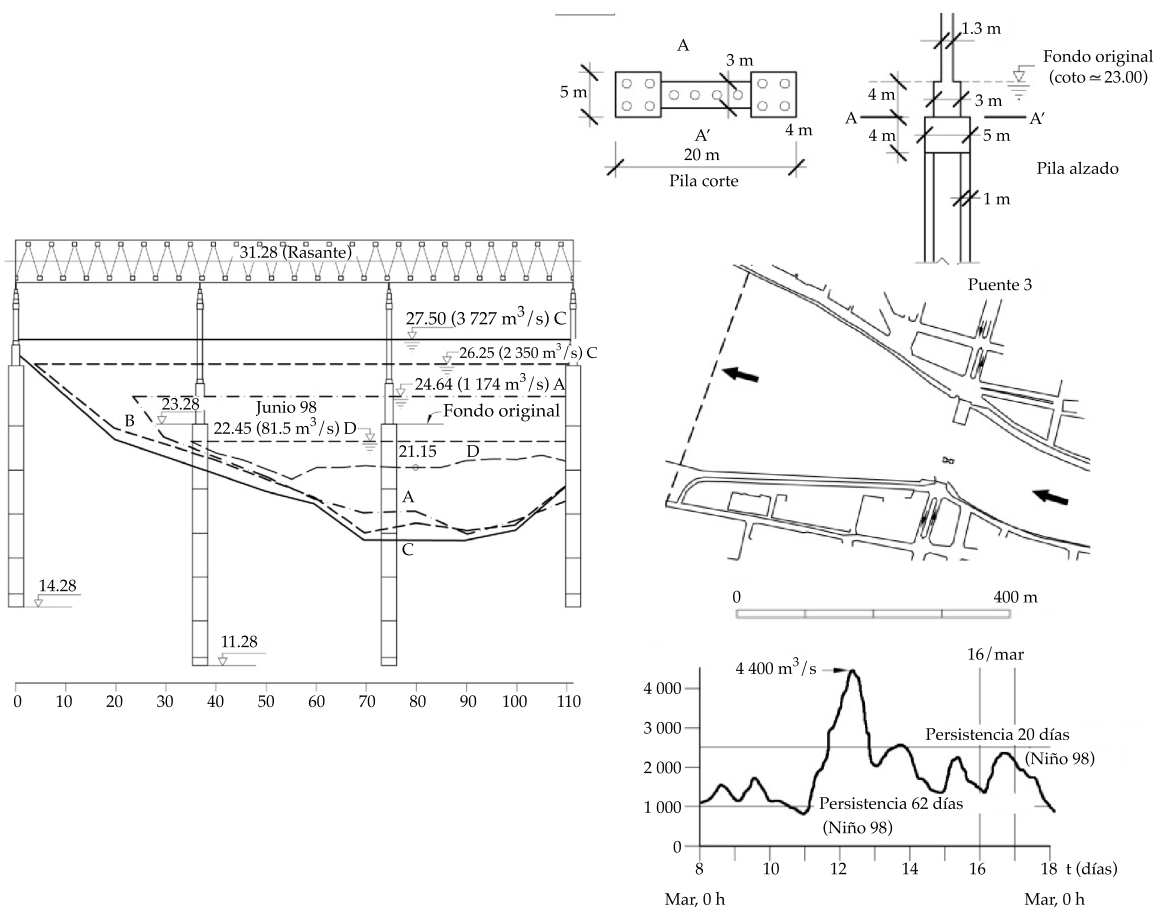


Figura 2. Izquierda: sección transversal del río por el puente de Piura, que resistió, con la evolución del fondo, durante El Niño de 1998 (cimentación de cajones). Derecha: planta y alzado de la pila con cimentación profunda de pilotes (arriba) y posición en planta del puente que no resistió (centro), e hidrograma de El Niño de 1998 (abajo).

el km 5). Los perfiles longitudinales del río por el *talweg* en 1979 y 2000 muestran la magnitud de la erosión del fondo (llamada incisión), y también un cambio de pendiente: de 0.038 a 0.024% entre esas dos fechas. Del km 5 al 30 existen sendos diques longitudinales (*motas*) construidos en 1986 y separados 600-800 m, pero de ahí en adelante el área inundable es mucho mayor (3 500 m de anchura), porque sólo hay un dique. La llanura en el interior está crecida por sedimentación (llamada *acreción*), en comparación con el exterior (hasta 2.6 m cuando son dos motas; 1.1 m cuando queda sólo una, figura 3) con material de tamaño medio 0.045 mm. El río Piura, por tanto, tiene su cauce colgado aguas abajo, pero al mismo tiempo se ha incidido (encajado) aguas arriba

al largo de muchos kilómetros. Las dos cosas parecen posibles viendo el *basculamiento* del perfil (cambio de pendiente). Hay que pensar que la construcción de los diques tuvo algo que ver en estos cambios. Se debe mencionar también que sólo en épocas de lluvia el río Piura desemboca en el océano, pues el resto del tiempo acaba en una laguna evaporítica.

Podría conjeturarse entonces que los diques aguas abajo de la ciudad, construidos más que nada para defender la agricultura de las inundaciones, trajeron como consecuencia el descenso medio del fondo en la ciudad. Esto se manifestó en la descompensación de la recuperación del fondo al final de la crecida (figura 2), pues no hay otra manera de acomodar lo variable de una crecida con

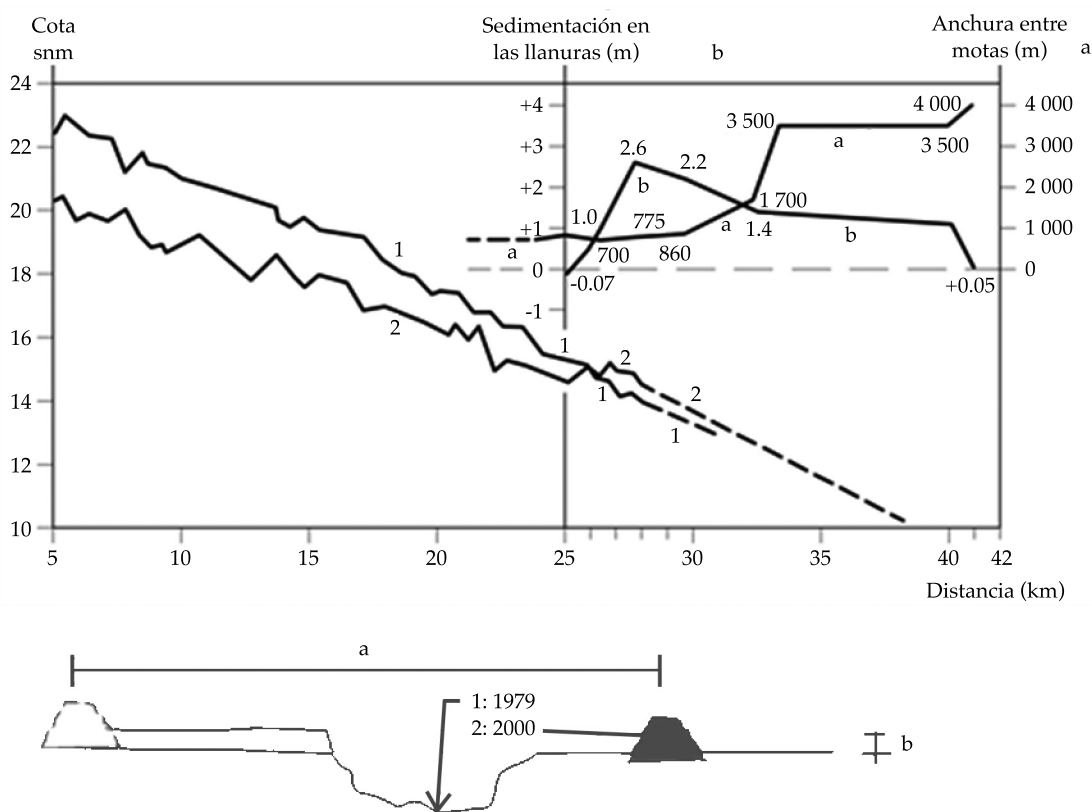


Figura 3. Arriba: perfil longitudinal en 1979 (1) y 2000 (2) a partir de la ciudad de Piura. En el recuadro superior: gráficas de la anchura entre diques (a) y la altura de la sedimentación en el interior del encauzamiento (b), cada una con su propio eje de ordenadas, pero sólo uno de abscisas, según la explicación del croquis de abajo, en el que el cauce está exagerado en anchura (unos 60-80 m) y en profundidad.

una tendencia latente a largo plazo (años y décadas). Así, el río no desbordó como en 1983, pero, en cambio, la ciudad perdió dos puentes. Queda sin embargo el cabo suelto de cuál sería el papel de la persistencia de la acción sobre el fallo de los puentes.

¿Es correcto este “relato”? Si no lo fuera, al menos tendría la virtud de poner de relieve la interacción de los fenómenos de movilidad vertical del fondo (incisión y acreción) abrazando grandes distancias; de demostrar la sensibilidad del perfil a obras en apariencia inocuas, como dos diques, a 800 m de distancia, cuando el cauce normal tiene unos 60-80 m de anchura; y de enseñarnos que cuando se trata con lechos aluviales, el río ignora las demarcaciones del hombre, campo o ciudad, administración viaria (puentes), hidráulica (inundaciones), agrícola (riegos), etcétera. Si los actores humanos de estas demarcaciones no se comunican entre sí, el río sí comunicará sus movimientos verticales con total indiferencia de las consecuencias que tengan para el hombre. Las administraciones necesitan ingenieros que educadamente desoigan los límites estrictos de su competencia sectorial (puentes, riego, inundaciones, represas...), para tratar de entender el comportamiento del río en su conjunto.

¿Puede este “relato” ser confirmado o refutado por un modelo matemático? La información real de la que se han extraído las figuras 2 y 3 es ingente. Los problemas de ingeniería de ríos nunca están claros y bien formulados antes de poner manos a la obra. Es más difícil y requiere más criterio seleccionar la información y ver alguna cosa clara en ella que usar cualquier modelo. Pero refiriéndonos a los modelos, ¿están capacitados para pronósticos de los valores medios de las variables al cabo de décadas?, pues ese es el reto principal, no una instantánea del flujo o el transporte y, de ahí, ¿valen la pena sin un conocimiento detallado, en el tiempo y el espacio, que no existe en este caso, del caudal sólido que el río transporta en suspensión y que probablemente deja en las planicies?

## Segundo ejemplo de ingeniería en Latinoamérica

El río Pilcomayo corre en dirección SE desde los Andes hasta el río Paraguay a través de la llanura del Chaco (figura 4). En Bolivia tiene una pendiente media del 1% a lo largo de sus primeros 500 km, hasta la estación de aforos 1, donde el área de la cuenca es 82 000 km<sup>2</sup>. En los 1 000 km que faltan hasta Asunción, la pendiente es del 0.04%, sirviendo su curso de frontera entre Argentina y Paraguay. El régimen hidrológico es muy estacional, ya que a un trimestre húmedo (enero-marzo) suceden tres trimestres secos. En el primer periodo son normales picos de más de 1 500 m<sup>3</sup>/s, siendo el máximo registrado en 30 años 5 500 m<sup>3</sup>/s. El caudal medio anual es 240 m<sup>3</sup>/s en la estación 1, pero desciende a 225 m<sup>3</sup>/s en la 2 y 200 m<sup>3</sup>/s en la 3 (figura 4). Muy notable es la enorme carga sólida del río: con 30 años de datos en la estación 2 se obtiene una carga en suspensión de 140·10<sup>6</sup> toneladas/año, de la cual un 89% es de tamaño menor que 0.062 mm (carga de lavado) y un 11% es arena fina. La concentración media anual de sedimento en suspensión es 15 g/l, pero se han registrado picos de 60 g/l en la época húmeda. Probablemente, tras el río Amarillo, el Pilcomayo es el río del mundo que alcanza concentraciones de sedimento en suspensión más elevadas.

Los problemas de ingeniería son dos y están vinculados entre sí: la estabilidad del río y la toma equitativa de las aguas por los dos países de la que depende su desarrollo agropecuario (y, en menor medida, el abastecimiento). El primer problema es muy singular debido al fenómeno de colapso del río (Martín-Vide *et al.*, 2012a). Para entender este fenómeno, hay que conocer primero su contexto geomorfológico: el río Pilcomayo corre sobre un mega-abanico aluvial de 200 000 km<sup>2</sup> de área, el mayor de los formados en las vertientes orientales de los Andes. En foto de satélite se distingue con claridad la huella de otros cursos que arrancaron en el pasado del mismo vértice del abanico (alrededor del

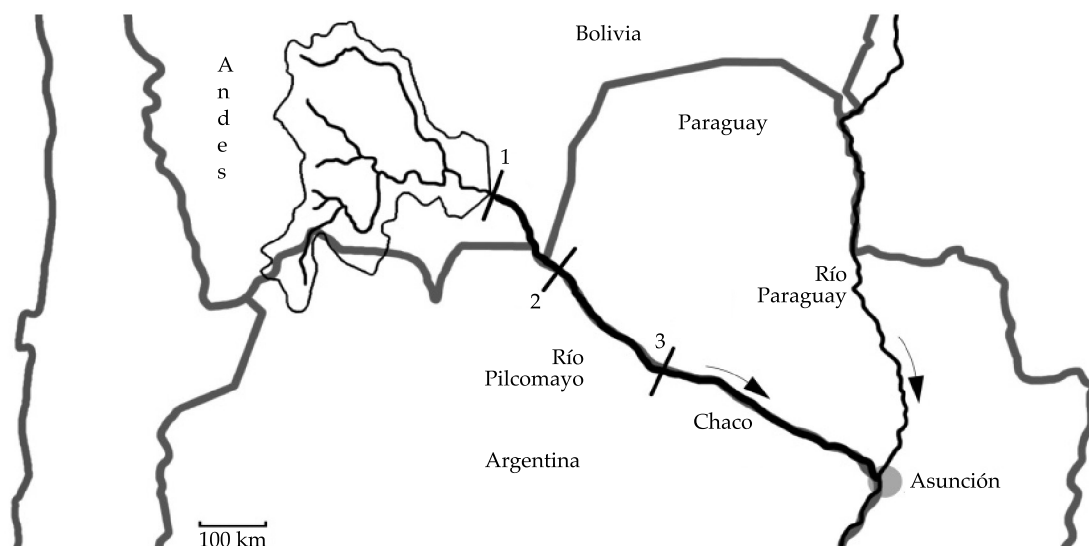


Figura 4. Mapa de situación del río Pilcomayo; 1, 2 y 3 son estaciones de aforo.

punto 1, figura 4). En su curso sobre el abanico, el río es primero trezado y muy ancho ( $\approx 3\ 000$  m) para poco a poco convertirse en un río de cauce único, alta sinuosidad, frecuente corte natural de meandros y anchura reducida a 150 m. A medida que esto ocurre, también el río se va encontrando colgado en lo más alto del abanico, propenso por tanto a cambios bruscos de curso. Más abajo, el cauce se encuentra bloqueado por un tapón de troncos y arena (el río “colapsa”, figura 5): el flujo rebosa sobre las llanuras; el agua, por una parte, alimenta un sistema complejo de humedales, lagunas (esteros, bañados) y flujo subterráneo; por otra, el sedimento forma depósitos en las llanuras como domos alrededor del punto de “colapso”. Estos domos tienen dimensiones del orden de 10 km de lado con  $\frac{1}{2}$  m de acreción cada año.

El problema de estabilidad tiene dos facetas: por un lado, debido a ser un cauce colgado y “colapsado”, hay un riesgo de cambio brusco de cauce hacia uno u otro lado, perdiendo el río uno de los dos países; por otro, el punto de colapso ha retrocedido mucho en el siglo XX, o sea se ha perdido longitud de cauce de río “vivo”. En 1947-76 se perdieron 150 km de río (22 km sólo en 1976) y otros 150 km hasta

1990 (45 km en 1984), siempre en relación con la magnitud de las crecidas durante el periodo húmedo. Por ejemplo, la estación de aforos 3 (figura 4) fue alcanzada y sepultada por el retroceso del río en 1967.

El alarmante retroceso del cauce y la esperanza de un reparto equitativo de las aguas llevó en 1991 a un acuerdo entre los dos países para excavar sendos canales (figura 6). Desde entonces, los dos canales no han funcionado de manera simultánea más de una temporada húmeda, sino que uno de ellos ha capturado todo el río mientras el otro ha quedado colmatado de sedimento. La captura es un “éxito” forzado, pues cada país draga su canal, en un costoso mantenimiento anual, para mantener el flujo hacia alguna región baja, que por cierto se va colmatando.

El retroceso del río Pilcomayo, o más bien el retroceso del canal sobreviviente del río Pilcomayo, se ha detenido desde 1991 gracias a este trabajo de mantenimiento, no a alguna razón inherente a la división del río en dos canales. Por el contrario, la captura del río por uno de los canales prueba una inestabilidad intrínseca del sistema. La distribución equitativa del agua es imposible en esta situación,

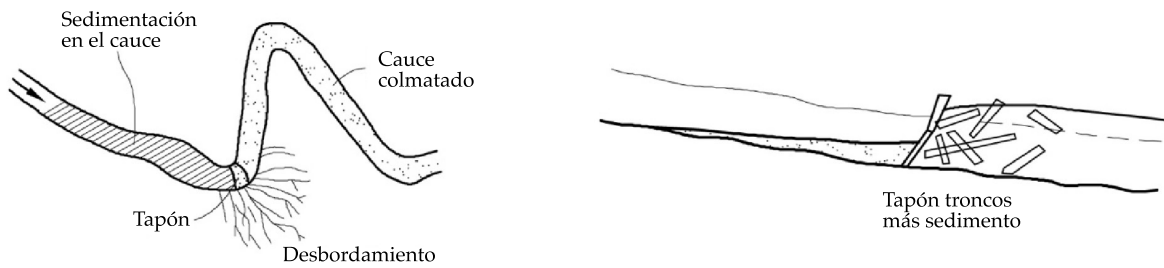


Figura 5. Esquema en planta y perfil longitudinal del tapón del río Pilcomayo.

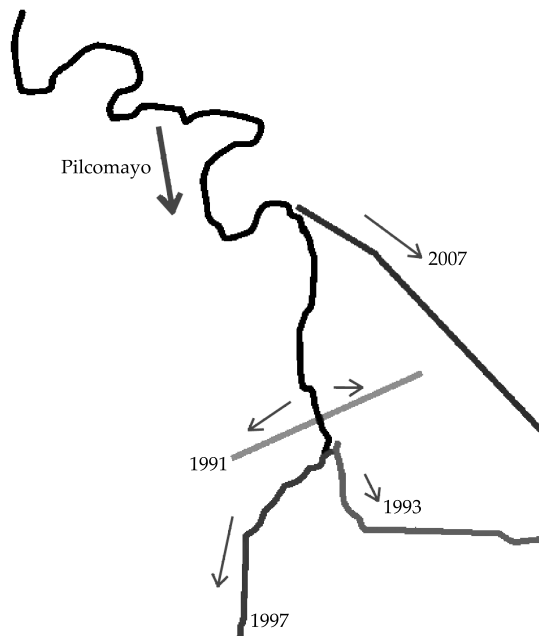


Figura 6. Esquema en planta de los canales del río Pilcomayo en 1991 y en fechas posteriores.

ya que el río corre por un país o por el otro, el más afortunado por el relieve del mega-abanico aluvial o el más diligente en la excavación de su canal. Estos factores, suerte o diligencia, contribuyen a ensombrecer la relación bilateral. Después de cada desenlace, los países han excavado nuevos canales hasta hoy (figura 6), olvidándose del acuerdo de 1991.

La inestabilidad intrínseca de la división se puede demostrar con dos principios. El primero es que el flujo de los canales es

siempre subcrítico (pendientes de 0.02-0.03%) y por tanto controlado por el nivel aguas abajo, y el segundo es que el sedimento fino se distribuye en la misma proporción que el agua; es decir, quien tome una parte del agua tomará la misma parte del sedimento en suspensión. Los diferentes niveles en la desembocadura de los canales determinan el reparto de caudales: por ejemplo, un nivel alto con una curva de remanso (M1, pendiente suave) en uno y uno bajo con una curva de desagüe (M2) en el otro, implicarán la entrada de más caudal en este último y menos en el primero, cuyo alto nivel y baja velocidad propiciarán la sedimentación.

Después de unos años en que, bajo el auspicio de la Unión Europea (UE), se estudió el reparto del agua mediante una acción en la región de bañados y esteros aguas abajo (o sea, no en el cauce del río vivo), y se instó al mantenimiento de un solo cauce del río como forma más eficiente de luchar contra el retroceso, los dos países prefirieron volver a la idea de los respectivos canales.

El problema de sedimentación del río Pilcomayo se puede describir de una forma simple, aunque cruda. En el fuerte "pulso" anual de agua y sedimento, de un trimestre de duración, el agua desborda, alimentando un flujo superficial extenso y un flujo subterráneo, mientras que el sedimento no tiene más remedio que recrecer el abanico aluvial y colmatar el cauce. Contra esta fuerza de la naturaleza (cuya magnitud es  $140 \cdot 10^6$  t/año de carga sólida) no hay potencia humana capaz de

medirse. A la vista de esta tragedia, el decoro manda que los dos países se coordinen.

### Ejemplos de restauración fluvial en Europa

Los países de la UE se han destacado por su política de restauración fluvial. Ya antes de promulgarse la Directiva Marco del Agua en el año 2000, que exige la conservación del buen estado ecológico de los ríos de la Unión, se habían llevado a cabo actuaciones importantes. Un ámbito geográfico privilegiado ha sido el de los ríos de llanura de países húmedos del norte de Europa, como Inglaterra (Brookes y Shields, 1996) y Dinamarca (Hansen, 1996), en donde la meandrización de ríos rectificadas ha sido el interés dominante. Otro ámbito privilegiado es el de los ríos alpinos: Suiza, Austria, sur de Alemania, norte de Italia y este de Francia. En el caso de Suiza, un país cuyos ríos habían sido canalizados sistemáticamente ya desde el siglo XIX, se trata de “descanalizar” los ríos retirando los materiales duros de las márgenes y propiciando el ensanchamiento del cauce. En el río Drau en Carintia (Austria) se abrió un brazo izquierdo en un río anteriormente canalizado con sección prismática, dejando una isla en el centro, pero se observaba la acreción progresiva del nuevo brazo (figura 7). El río

Danubio, al este de Viena, sirve como ejemplo de un tercer ámbito: el de los grandes ríos aluviales, que fueron en el pasado francamente trezados o anastomosados (verdaderos deltas interiores europeos), pero que se vieron convertidos poco a poco en ríos de cauce único, para favorecer la navegación fluvial. Hoy se están desmontando espigones y defensas de orilla, y se está facilitando la entrada de agua a los brazos abandonados. Esta política de restauración se hace en coordinación con la autoridad de navegación fluvial, que ha de ceder en algún punto de los intereses del transporte fluvial que representa.

La experiencia en España es mucho más limitada. Como en otros lugares, se han retirado con éxito represas en desuso y otros obstáculos transversales. Está comenzando el interés por volver a conectar meandros abandonados, como en el caso del río Arga, en Navarra (figura 8). En este río de gravas mediano (2 800 km<sup>2</sup> de cuenca tributaria) de una región rica en agricultura, el Estado realizó obras de corte de meandros y canalización con diques longitudinales, para desterrar las inundaciones de la huerta. Fueron cuatro cortes sucesivos desde abajo hacia arriba en orden temporal. El primero, en 1961-66, supuso pasar de 3.7 km a 1.5 km de cauce, y el segundo, en 1971-74, recortó de 5.7 km a 2.2 km la longitud (figura



Figura 7. Apertura del brazo izquierdo del río Drau. Estado de la restauración en 2005, unos tres años después de la acción.



8). Al proyectar el segundo corte en 1971 fue necesario rehacer la topografía, porque el río había sufrido una incisión, efecto lógico del desequilibrio debido al aumento de pendiente del primer acortamiento. Los meandros perdidos se han conservado en buen estado, pero la dificultad para conectarlos hoy radica en que sus fondos están 2, 3 o 4 m más altos que el río canalizado debido a su incisión. Al mismo problema se enfrenta la restauración de un meandro del río Fluvià (Martín-Vide *et al.*, 2012b). Es frecuente que la demanda de restauración coincida con un desequilibrio de incisión, enfermedad casi incurable de un río. Es difícil tener éxito en estas exigentes condiciones.

El río Besòs, con una pequeña cuenca hidrográfica de 1 000 km<sup>2</sup>, cruza el norte del área metropolitana de Barcelona. Esta circunstancia le marcó un destino de profundo deterioro ambiental en la segunda mitad del siglo XX hasta el momento de la intervención de recuperación (1999). Como caso de estudio, pese a no ser típico ni modélico (no puede llamarse “restauración”), contiene algunas lecciones interesantes de orden hidromorfológico, ambiental y social.

Se trata de un río torrencial (pendiente del 0.3%), con un transporte sólido abundante de gravas de tamaño 20 mm. Su morfología original era algo trezada, dentro de una llanura aluvial de unos 300 m de anchura. A raíz de la avenida de 1962 ( $\approx 2\,300\text{ m}^3/\text{s}$ ), se proyectó una canalización de 130 m de anchura (capacidad de  $2\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ), con un canal central recto de 20 m (figura 9). Esta obra de defensa de inundaciones, basada de manera exclusiva en la capacidad hidráulica del río fue inaugurada en 1975, y desencadenó a su alrededor la ocupación urbana y la ubicación de infraestructuras.

La motivación para intervenir en el río Besòs fue la calidad de las aguas, pues era uno de los ríos más contaminados de Europa. El objetivo de la recuperación, pagada en un 80% por la UE, era la mejora de la calidad por medio de humedales construidos en las planicies del cauce de avenidas ( $2 \times 53\text{ m}$  de anchura). La recuperación de espacio fluvial (en anchura) o la “descanalización” estaban descartadas. Por otra parte, en la segunda mitad del siglo XX, la urbanización de la cuenca había alterado las dos variables de entrada del equilibrio



Figura 8. Izquierda: planta del río Arga (Navarra) con los meandros originales, que se planea ahora restaurar, y la canalización más recta que los cortó en 1960-1980. Derecha: sección tipo de la canalización con diques longitudinales al borde del cauce dragado.

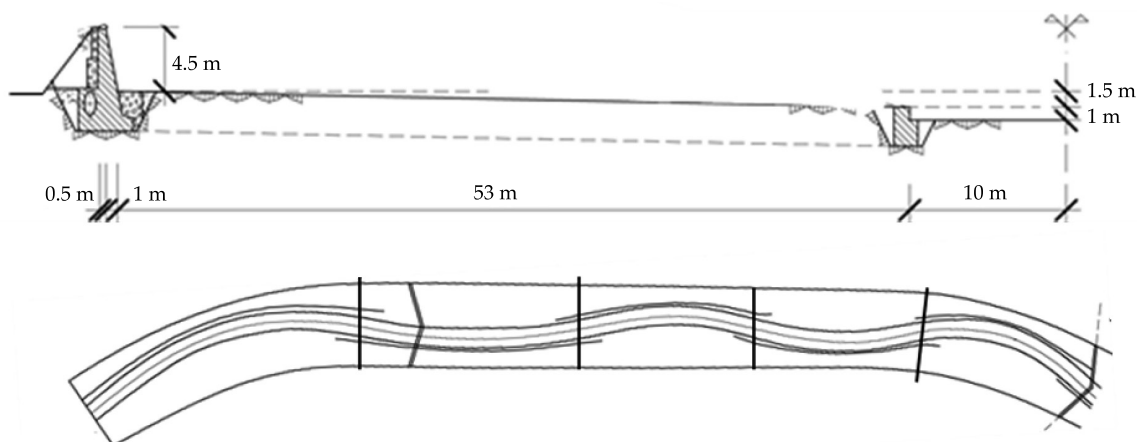


Figura 9. Arriba: media sección transversal (simétrica) de la canalización del río Besòs, objeto de la restauración. Abajo: planta de un tramo del cauce del río Besòs restaurado. Se dibujan los muros del cauce de avenidas (anchura de 130 m), el cauce principal sinuoso (30 m), su eje, las protecciones enterradas en los lados exteriores de las curvas, las traviesas de hormigón por demoler (forma de V) y las nuevas traviesas enterradas (rectas). Flujo de derecha a izquierda.

fluvial, pues de la cuenca escurría más agua y proporcionaba menos sedimento. De hecho, el río ya padecía una incisión, que se había frenado construyendo umbrales de fondo (traviesas). Por tanto, habiendo cambiado las condiciones de equilibrio, ¿habría resultado sostenible una restauración radical, que trascendiera las limitaciones impuestas en anchura con los muros de la canalización, en perfil con las traviesas, buscando la vuelta a toda costa al estado original?

En los primeros planes se pensaba prolongar en 4.2 km el cauce recto, centrado y de hormigón (figura 9), para encajar el máximo número de células de humedal construido. El objetivo de depuración de las aguas chocaba así con la dinámica fluvial, que aconsejaba en cambio un cauce sinuoso libre para mejorar el hábitat, en lugar de uno recto. Aplicar esta forma natural, compatible con las restricciones, aunque no fuera la forma original (algo trenzada), significaba una visión pragmática de la restauración, máxime cuando era inviable recuperar anchura y había dudas sobre el equilibrio del río debido a los cambios en la cuenca. Una consecuencia de esta sinuosidad fue, no obstante, la pérdida de área de humedal

construido, de 14 a 9 ha, en la misma longitud de río.

La planta de un tramo de los 4.2 km naturalizados se muestra en la figura 9. Para diseñarla se calculó un caudal dominante de  $54 \text{ m}^3/\text{s}$  (caudal de cauce lleno) y se usó la teoría del régimen para ríos de grava, resultando un cauce de 30 m de anchura y 1 m de profundidad. Las longitudes de onda del cauce quedaron comprendidas entre 320 y 920 m para adaptarse a la canalización (que ambos cauces, el meandriforme principal y el de avenidas fijado por los muros, giren en el mismo sentido). La curvatura del cauce y el ángulo entre éste y el eje de la canalización se mantuvieron pequeños en comparación con los meandros libres. Esta fue una medida de precaución, pues el río canalizado en 1975 perdió sus 300 m de anchura. El flujo se presenta desde entonces mucho más concentrado: mayor calado y velocidad que en el pasado, con peligro para la estabilidad de un cauce muy sinuoso. El cauce se forma en gravas, pero se proyectan protecciones de escollera, enterradas en zanjas, para frenar el movimiento en los lados exteriores de las curvas. Se demuelen las traviesas, pero se entierran otras nuevas, por

si el río sigue su incisión. Hoy, trece años más tarde, han aflorado muchas de las protecciones de margen (y alguna traviesa) y varias han sido flanqueadas por el agua. El caudal máximo desde 1999 no ha superado los  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Además de los 4.2 km naturalizados, a lo largo de otros 2 km se construyó un parque fluvial con un cauce central muy ancho, presas inflables para mantener un espejo de agua, praderas y pistas para peatones y ciclistas, que ha cosechado el mayor éxito social de la intervención. Si el problema era el mismo en los 6.2 km, ¿por qué la solución fue tan distinta?, o ¿tiene sentido para la continuidad del río una segregación de funciones: depuración con humedales y parque urbano? La construcción de un humedal de depuración en el río, comprometida por la financiación europea, ¿se hubiera realizado, sin existir tal compromiso, también en el propio lecho de avenidas del río, o bien se hubiera construido fuera del río?

### Epílogo: una línea de investigación en ingeniería fluvial

Es ideal que la investigación universitaria se inspire en asuntos reales de ingeniería. Aquí se presentan algunos ejemplos. Los ríos efímeros y torrenciales que sufren incisión son controlados de manera frecuente con umbrales de fondo o traviesas. De estas estructuras se espera que impidan el descenso del fondo. Lo consiguen porque son puntos duros (no erosionables).

Hemos estudiado en ensayos de lecho vivo en equilibrio el comportamiento de estos puntos duros (Martín-Vide y Andreatta, 2006). El lecho se escalona propiciando una erosión local al pie de cada punto duro, pero lo más sorprendente es que la pendiente entre traviesas ( $i'$  en la figura 10) es menor que la de equilibrio en caso de no haber traviesas ( $i$ ), y tanto menor cuanto menor es la distancia  $L$ , incluso hasta llegar a una pendiente negativa.

Cuando una traviesa es de escollera, su estabilidad es muy diferente a la de escolleras longitudinales colocadas en las márgenes. La protuberancia de los escollos respecto al fondo ( $p_c$ ) es un factor desestabilizante y, en cambio, la anchura del tapiz ( $l$ ), es decir, la longitud en la dirección de la corriente, es estabilizante. Ambas tendencias parecen intuitivas si se piensa en la exposición al flujo de escollos desplazados y en la colaboración entre los escollos cuando mantienen el conjunto. La diferencia se expresa como aumento de tamaño del escollo ( $D$ ) necesario para resistir la acción del agua, respecto al de la escollera longitudinal continua (de larga extensión). Para traviesas (tapices) de tres anchuras distintas,  $4D$ ,  $8D$  y  $16D$  ver figura 11 (De Almeida y Martín-Vide, 2009).

En ríos de gran pendiente se producen formas de fondo de transición y de régimen superior (antidunas, figura 12). Se han estudiado estas formas en ensayos de lecho vivo en equilibrio, cuando el lecho se compone

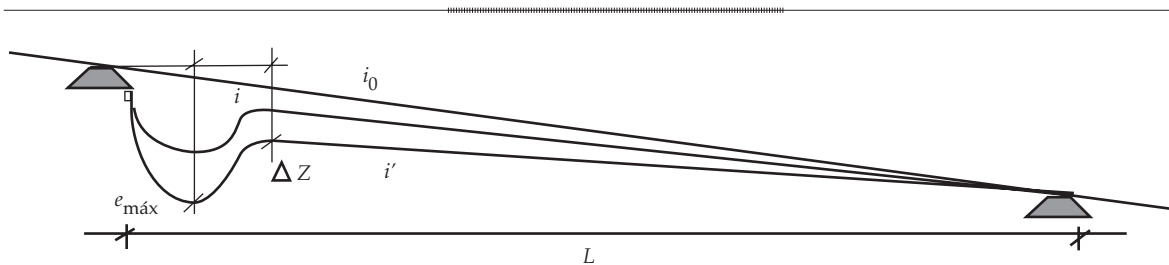


Figura 10. Esquema de la investigación sobre umbrales de fondo en ríos de gran pendiente. Entre dos umbrales a distancia  $L$ , que trazan una pendiente  $i_0$  inicial, la erosión causada por el desequilibrio fluvial debería tender a una pendiente de equilibrio  $i$ , pero tiende a una pendiente menor  $i'$ , tanto menor cuanto más cerca se encuentran los umbrales.

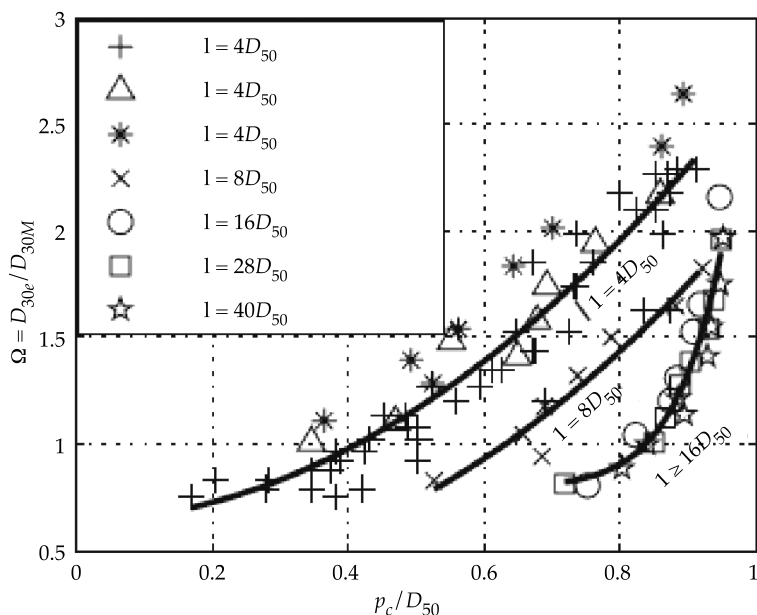


Figura 11. Dimensionamiento de un umbral de escollera que sobresale una cantidad  $p_c$  (protuberancia) respecto al nivel medio del lecho y que forma parte de un conjunto de anchura limitada (no indefinida)  $l$ , por medio del incremento  $\Omega$  del tamaño necesario respecto al dimensionamiento con la fórmula de Maynard  $D_{30M}$ .

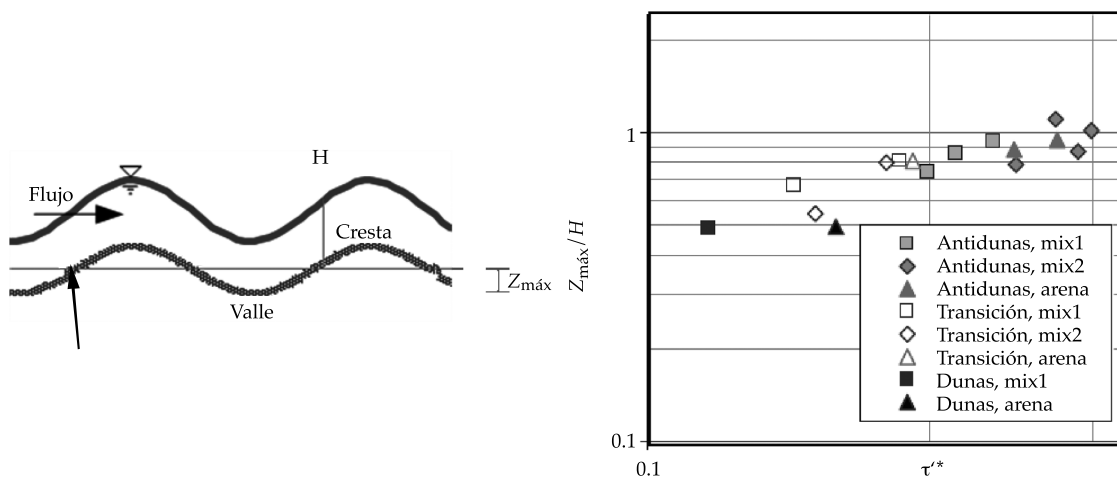


Figura 12. Izquierda: esquema de la antidunas y notación:  $H$ ,  $Z_{máx}$ . Derecha: erosión máxima  $Z_{máx}/H$  en función de la tensión adimensional de grano (parámetro de Shields de grano o piel).

de una mezcla de arena (en proporción de 30-40%) y grava (Núñez-González, 2012; Núñez-González y Martín-Vide, 2011). Se ha obtenido el transporte sólido (en condiciones de movilidad igualada), la resistencia al flujo de

grano y de forma, la dirección del movimiento de las antidunas (hacia arriba o hacia abajo), y la erosión máxima del fondo al paso de un tren de antidunas (figura 12): en abscisa se representa la tensión de grano adimensional

(entre 0.1 y 0.3), y en ordenadas el cociente sin dimensiones entre la profundidad máxima de erosión  $Z_{\text{máx}}$  y el calado de agua  $H$ . Aunque el fondo de un río no descienda en forma transitoria, obsérvese que es posible una erosión del mismo orden de magnitud que el calado en régimen supercrítico.

## Agradecimientos

A José Vázquez e Ignacio Benavent (Piura), a Juan H. Hopwood, Mario Gamarra, Mabel Amarilla y Fernando Zárate (Pilcomayo), y a los doctores de la UPC Marta Roca Collell, Andrés Andreatta, Gustavo A. Mazza de Almeida, Carles Ferrer i Boix, Francisco Núñez González y Pedro Martín Moreta.

Recibido: 31/01/2013

Aceptado: 03/04/2013

## Referencias

- BROOKES, A. and SHIELDS, F.D. *River Channel Restoration*. Chichester: John Wiley, 1996, 433 pp.
- DE ALMEIDA, G.A.M. and MARTÍN-VIDE, J.P. Rip-rap stability: transverse and longitudinal *versus* continuous protections. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 135, No. 6, 2009, pp. 447-456.
- HANSEN, H.O. (editor). *River Restoration. Danish experience and examples*. Copenhagen: Ministry of Environment and Energy, National Environmental Research Institute, 1996, 99 pp.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., and MILLER, J.P. *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York: Dover Publications, Inc., 1964, 522 pp.
- MARTÍN-VIDE, J.P. Restoration of an urban river in Barcelona, Spain. *Environmental Engineering and Policy*. Vol. 2, 2001, pp. 030/1-030/7.
- MARTÍN-VIDE, J.P., AMARILLA, M., and ZÁRATE, F. Collapse of the Pilcomayo River. *Geomorphology*, 2012a, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.12.07.
- MARTÍN-VIDE, J.P., RODRÍGUEZ-MAÑEZ, E., FERRER-BOIX, C., NÚÑEZ-GONZALEZ, F., MARUNY-VILALTA, D. *Morphodynamic study of the Fluvia River. Scope and methods in light of data scarcity*. Water Technology and Sciences. Vol. III, No. 3, July-September, 2012b, pp. 115-133.
- MARTÍN-VIDE, J.P., ANDREATTA A. Disturbance caused by bed sills on the slope of steep streams. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 2006, vol.132, n. 11, 2006, pp. 1186-1194
- NÚÑEZ-GONZÁLEZ, F. *Bed-load transport of sand-gravel mixtures with antidunes. Flume experiments*. Tesis doctoral. Barcelona: UPC, 2012, 626 pp.
- NÚÑEZ-GONZÁLEZ, F., MARTÍN-VIDE, J.P. Analysis of antidune migration direction. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 116, 2011, doi: 10.1029/2010JF001761.

## Abstract

MARTÍN-VIDE, J.P. *Erosion, sedimentation and restoration of rivers. Engineering and research examples. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 5-18.*

*This paper presents some examples of studies in river engineering in which sediment plays a relevant role. This field is sometimes called hydromorphology, river morphodynamics or fluvial morphology. This study focuses more on the longitudinal profile and cross-sections of the river rather than the planform mobility. The river engineering examples are from Latin America, including erosion in rivers on the northern coast of Peru during the 1998 El Niño and sedimentation in the Pilcomayo River, which is shared by Bolivia, Argentina and Paraguay. Both examples are a result of experiences from European missions. Because of their magnitude, these kinds of problems are related to the geomorphology of rivers. Restoration examples include the Besòs River near Barcelona and others in developed European countries. These cases involve small gravel-bed rivers only. The end of this article briefly mentions research carried out by the author and collaborators at the University related to torrential rivers with steep slopes and rock riprap protections. This paper was presented as the opening talk in the 25th Latin American Congress on Hydraulics held in San José, Costa Rica, September 9-12, 2012.*

**Keywords:** *bed sill, erosion, sedimentation, river restoration, river morphodynamics, Piura River, Pilcomayo River, Besòs River.*

## Dirección institucional del autor

*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  
juan.pedro.martin@upc.edu