

# Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III)

En el segundo artículo, de una serie de tres destinados a una síntesis del estado del conocimiento hidráulico y geomorfológico acerca de ríos de montaña, se expusieron las principales características hidráulicas del flujo de baja concentración de sedimento. En este último artículo, se tratarán los rasgos geomorfológicos que caracterizan a los ríos de montaña de material grueso de forma específica frente a los ríos de llanura de sedimento fino.

Raúl López Alonso, Ing. Téc. de Obras Públicas, Ldo. en Geografía y DEA en Ingeniería Hidráulica. Dpto. de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida

## 4.- CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

### 4.1.- Pendiente longitudinal del cauce elevada y sedimentos de calibre grueso

Los ríos de montaña muestran una elevada variabilidad espacial de la morfología de cauce, debido al control externo que introduce la geología (litología, tectónica, estructura, glaciación, aporte de sedimentos, etc.). Sin embargo, si se comparan las diferencias entre los ríos de montaña y los ríos de llanura o planicie sobresalen dos características principales. Los primeros suelen presentar un sedimento mucho más grueso y una pendiente longitudinal del cauce mucho más elevada. En efecto, la mayoría de los ríos de lecho aluvial exhiben un decrecimiento aguas abajo del tamaño medio del sedimento, aunque esta tendencia general puede verse modificada localmente. Los mecanismos que explican este fenómeno son el control que provo-

ca la pendiente del cauce, el aporte de material grueso proveniente de las vertientes o afluentes y la abrasión, *in situ* o durante el transporte, que sufren de las partículas.

Especialmente significativa es la relación entre la pendiente del cauce y la capacidad del flujo para erosionar y transportar sedimentos. Si se reduce la pendiente, a igualdad de resto de condiciones, disminuye también el caudal sólido y el tamaño de las partículas que acarrea la corriente, de tal modo que se produce una clasificación selectiva del tamaño de los sedimentos a través de la erosión, transporte y sedimentación de los mismos. Interesa señalar la excepción que representan ciertos cursos de agua en medios áridos y semiáridos, como puedan ser las ramblas mediterráneas en las que coexisten pendientes elevadas del lecho y sedimento fino.

La distribución de tamaños del sedimento en ríos de arena se

caracteriza de forma general por una dispersión relativamente pequeña, presentando un material mal graduado. Por el contrario, los ríos con lechos constituidos con sedimento de tamaño medio de grava o superior muestran un rango de tamaños de las partículas que se puede expandir varios ordenes de magnitud, ya que además del material de calibre superior a 2 mm puede encontrarse un porcentaje variable de arena, mostrando así una distribución granulométrica que se califica como extendida. Esto último es causa de complejas interacciones entre partículas de diferente calibre durante los procesos de erosión, transporte y sedimentación, originando lechos espacialmente heterogéneos.

Muchos ríos de lecho de grava presentan una capa superficial, denominada coraza, constituida por sedimento más grueso y menos graduado que el material subyacente, generalmente dicha capa presenta un grosor equivalente a

una vez el diámetro (figura 6). Existen varias teorías para explicar este fenómeno de acorazamiento, en parte porque seguramente el mecanismo de formación y mantenimiento de dicha capa difiere entre cauces. Las tres principales teorías se basan en: erosión selectiva de los finos en superficie, sedimentación selectiva de partículas gruesas, y por último, transporte generalizado afectando a un cierto espesor del lecho.

#### 4.2.- Relevancia del geodinamismo de vertiente

En todas las cuencas los procesos de vertiente que controlan la esorrentía y la emisión de sedimentos se encuentran conectados con los procesos que tienen lugar en el cauce. Sin embargo, en los ríos de montaña tal conexión es especialmente acusada, dada la proximidad existente entre ladera y cauce. En efecto, los ríos en zona de montaña muestran valles relativamente estrechos con la práctica ausencia de llanuras de inundación. En esas condiciones las laderas devienen la principal y directa fuente de sedimento y agua, y a diferencia de los ríos de llanura el impacto de los procesos morfológicos de vertiente en el cauce no se encuentra amortiguado por el almacenamiento que procura el fondo del valle.

Torrente de Basco (Erill la Vall, Lleida). Obsérvese la estrecha conexión entre vertiente y cauce y

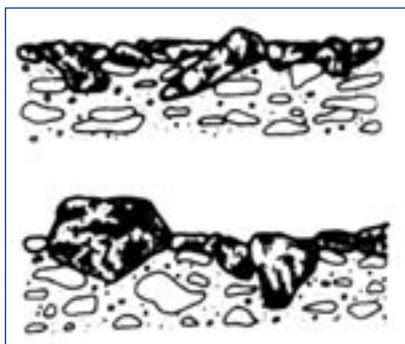


Figura 6. Esquema de lechos con coraza superficial

el dique de retención de sedimentos construido en el lecho del torrente.

#### 4.3.- Importancia del transporte sólido de fondo

En ríos de montaña se ha observado que el transporte sólido que tiene lugar en contacto con el fondo, o acarreo, supone una proporción mucha más alta de la carga total de sedimentos que en ríos de llanura. Efectivamente, la carga sólida en suspensión suele ser reducida en cauces de montaña a excepción de ríos alimentados por cuencas áridas o glaciares o después de una perturbación como pueda ser un incendio forestal, una lava torrencial o deslizamientos.

El transporte de fondo en ríos de fuerte pendiente se caracteriza por su alta variabilidad espacial y temporal, así como por la compleja relación que se establece entre caudal líquido y sólido. Lo anterior, entre otras causas, es atribuible al progresivo acorazamiento del lecho, a la heterogeneidad de la estructura del lecho y a la hidráulica asociada, al sedimento almacenado en obstáculos formados por restos leñosos de gran tamaño (*large woody debris*), a la migración de las formas de fondo y a

la ocurrencia de flujos hiperconcentrados, lavas torrenciales o deslizamientos.

La variabilidad temporal que sufre la morfología de los ríos de montaña es mucho más reducida que la de los ríos de llanura, debido fundamentalmente a la elevada magnitud que se requiere del caudal para superar el umbral de inicio del movimiento de los sedimentos en los primeros. En ríos montanos el inicio del movimiento de las partículas se ve dificultado no sólo por el mayor calibre del sedimento, sino también por la de disposición y agrupación que adoptan las partículas y por las formas de fondo del lecho, que tienden a maximizar la resistencia al flujo. En esas condiciones para caudales ordinarios el flujo no cuenta con la suficiente competencia para movilizar material y modelar el cauce. A diferencia de los ríos aluviales de llanura en los que la acción persistente del flujo va modelando el cauce y el caudal dominante (aquél que desarrolla la mayor acción modeladora sobre el cauce, en virtud de la combinación entre frecuencia de ocurrencia y capacidad de transporte) tiene asociado un periodo de retorno que no suele superar los tres años; los ríos de montaña de fuerte pendiente y material grueso sufren un



Torrente de Basco (Erill la Vall, Lleida). Obsérvese la estrecha conexión entre vertiente y cauce y el dique de retención de sedimentos construido en el lecho del torrente.

modelado abrupto, en la que los eventos extremos, ya sea en forma de flujos de baja concentración, hiperconcentrados o lavas torrenciales, ejercen una influencia mucho más determinante. En estos últimos ríos, predomina, por consiguiente, la estabilidad entre eventos extremos y las formas de erosión y sedimentación por ellos creadas tienden a dominar la morfología del cauce. En este sentido, los cauces aluviales de sedimento fino suelen denominarse ríos de lecho "vivo" (o activo) o de "régimen", porque el transporte de sedimento ocurre para casi todos los caudales. Por el contrario, los de sedimento grueso (de naturaleza aluvial, semi-aluvial o coluvial) se denominan cauces de "umbral" o estables, porque los sedimentos únicamente se movilizan para caudales elevados y el flujo es menos capaz de imponer una organización aluvial característica a lo largo del cauce.

#### 4.4.- Clasificación morfológica de ríos de montaña

Dada la heterogeneidad geomorfológica de los ríos de montaña el estudio de la forma del cauce y su clasificación se aborda a escala de tramo, entendiendo por tal un segmento de río de morfología uniforme que es al menos en longitud

varias veces el ancho del cauce. Las clasificaciones de tramos de río pueden basarse en diferentes criterios, como por ejemplo, el régimen hidrológico, la forma y alineación del cauce (p. ej. Leopold y Wolman, 1957), las formas del lecho (p. ej. Montgomery y Buffington, 1993) o en una combinación de los mismos (p. ej. Rosgen, 1994; Bathurst, 1993, 1997). En aras de la brevedad de exposición en este trabajo se van a presentar únicamente dos clasificaciones aplicables a ríos de montaña: la propuesta por Bathurst (1993, 1997), escogida aquí por su capacidad de síntesis, y la propugnada por Montgomery y Buffington (1993), elegida por su amplia difusión.

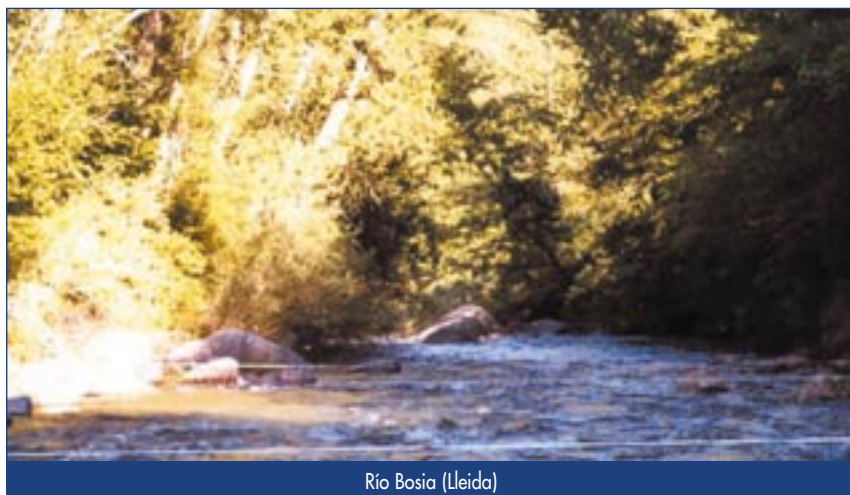
##### 4.4.1.- Clasificación de Bathurst (1993, 1997)

Según Bathurst (1993, 1997) de forma esquemática pueden distinguirse varios tipos de cauces aluviales de material granular, principalmente en función del tamaño medio de los sedimentos y de la pendiente. De la interacción de ambas propiedades del cauce con el flujo resultan diferentes formas del lecho, perfiles de velocidad, resistencia al flujo y transporte de sedimentos, que caracterizan a cada cauce. Primeramente los ríos

de arena, que se caracterizan por un diámetro medio ( $d_{50}$ ) de las partículas inferior a 2 mm, pendiente que tiende a ser suave (inferior a 0,1%) y sumersión relativa elevada, a menudo superior a 100. El transporte de sedimentos en suspensión y acarreo se produce para casi todos los caudales y, consecuentemente, en el lecho se desarrollan diversas formas de fondo características: arrugas (o rizos), dunas, lecho plano y antidunas, en función de las condiciones hidráulicas. El rango aproximado del coeficiente de Manning estaría comprendido entre 0,01 y 0,04.

En los cauces formados por gravas y cantos el diámetro medio variaría entre 10 y 100 mm, mientras que la pendiente del cauce lo haría entre 0,05 y 0,5%. La sumersión relativa se halla comprendida generalmente entre 5 y 100 y el coeficiente de Manning varía entre 0,02 y 0,07. El transporte de fondo ocurre irregularmente, únicamente para caudales elevados, y las formas de fondo de pequeña escala, como las desarrolladas en los ríos de arena, no están generalmente presentes. En su lugar, la forma de fondo de pequeña escala que característicamente se desarrollan en ríos de grava es la agrupación de partículas (*pebble clusters*). La forma dominante a gran escala corresponde a la secuencia de rápidos y pozas (*riffles and pools*).

Los cauces de bolos presentan lechos constituidos por sedimento de diámetro medio grueso, superior a 100 mm, y elevadas pendientes, entre 0,5 y 5%. La sumersión es muy reducida, encontrándose habitualmente por debajo de 1,0 y el coeficiente de Manning oscila entre 0,03 y 0,2. La carga de fondo involucrando a los elementos más gruesos sólo tiene lugar durante eventos extremos y no se distinguen formas del lecho



Río Bosia (Lleida)

determinadas para los ríos con lecho de bolos.

En los pequeños cauces de cabecera del sistema fluvial, la pendiente es muy fuerte (superior al 5%) y el flujo cae en cascada desde una obstrucción (formada por agrupación de bolos, o troncos y ramas o bien por un afloramiento rocoso) a otra, a través de pozas. Para caudales reducidos presentan la apariencia de una serie de escalones, por lo que este tipo de cauce se denomina escalón-poza (*step and pool*). El diámetro medio del sedimento es muy

variable y el coeficiente de Manning excede el valor de 0,1.

#### 4.4.2.- Clasificación de Montgomery y Buffington (1993)

Montgomery y Buffington (1993), sobre la base de la geomorfología fluvial de la región noroeste de la costa estadounidense del Pacífico, propusieron un sistema de clasificación de tramos fluviales que toma como criterio principal la forma del lecho y que puede ser aplicable a ríos de montaña en general. Las distintas formas se explican porque la interac-

ción entre la hidráulica del flujo y los procesos sedimentarios (erosión, transporte y sedimentación) y en particular la energía del flujo disipada es diferente en cada una. Dicha clasificación distingue cinco tipos de formas de fondo que a continuación se presentaran en orden decreciente de la pendiente.

**Cascada.** Si partimos de las cotas más altas del sistema fluvial el primer tipo corresponde a aquellos tramos con lecho de fuerte pendiente (en el rango entre 0,03 y 0,20) en forma de cascada, que se caracteriza por un sedimento grueso, de tamaño entre canto y bolo, que se halla dispuesto de manera desorganizada, tanto lateral como longitudinalmente (figura 7-a). La separación media entre los elementos más descollantes es inferior al ancho del cauce. En este tipo de cauce las fuentes predominantes de aporte de sedimento son de origen fluvial (aguas arriba) y otras no directamente fluviales, como aquellas ligadas a procesos morfogenéticos de vertiente (fenómenos gravitacionales como caídas y deslizamientos), así como las lavas torrenciales. Por otra parte, el almacenamiento sedimentario principal se produce alrededor de las obstrucciones al flujo.

**Escalón-poza.** En este tipo de tramo la pendiente es pronunciada, oscilando entre 0,02 y 0,09, el calibre del sedimento se clasifica en el rango entre canto y bolo y el lecho se organiza longitudinalmente en una secuencia entre escalones formados por agrupaciones de los sedimentos de mayor calibre y pozas formadas por partículas más finas (figura 7-b). Se puede apreciar una separación media entre pozas que varía entre uno y cuatro veces el ancho del cauce principal. Las fuentes predominantes de aporte de sedimento son las mismas que en el caso de la cascada (es decir, además de fluvial, de

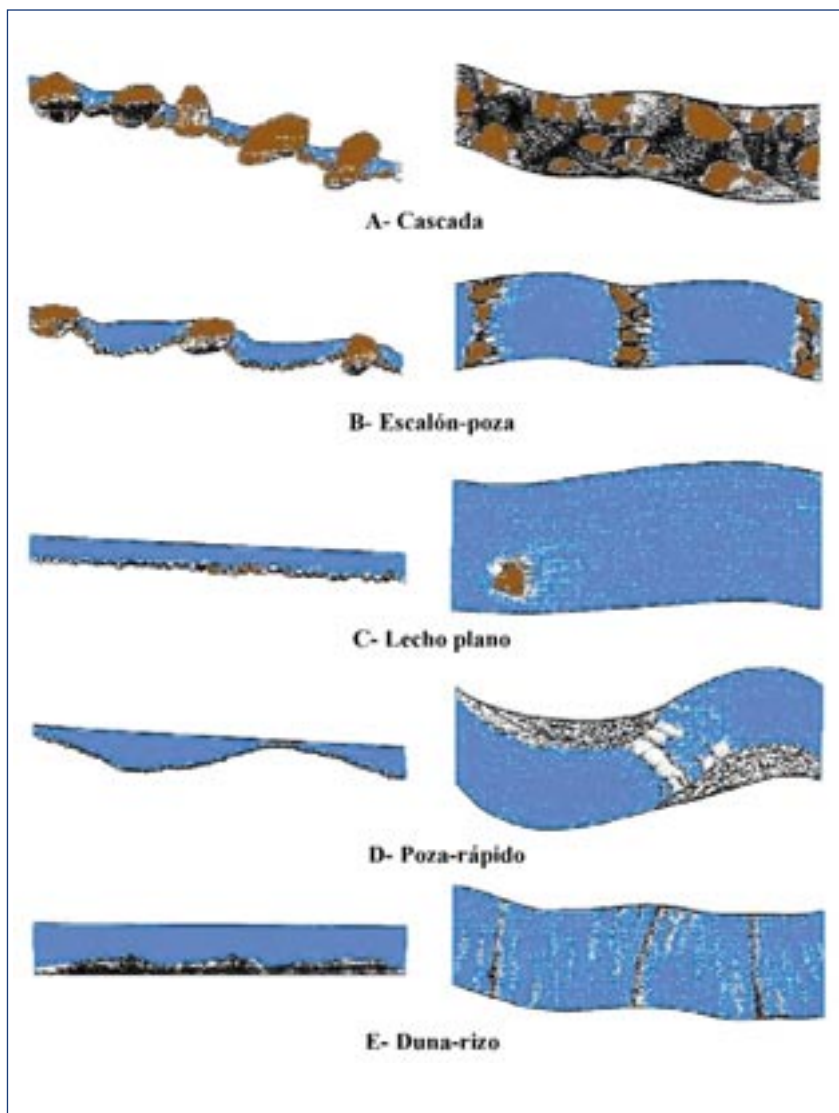


Figura 7. Representación morfológica de los tipos de cauce que contempla la clasificación propuesta por Montgomery y Buffington (1993).

ladera y lava torrencial) pero la sedimentación primordial se produce en las formas de fondo.

**Lecho plano.** Estos tramos en los que el tamaño del sedimento varía entre grava y canto y la pendiente lo hace entre valores inferiores a 0,02 y un máximo de 0,05 se caracterizan por la ausencia de formas de fondo bien definidas por lo que el lecho muestra una apariencia relativamente plana, ocasionalmente distorsionada por elementos gruesos aislados (figura 7-c). Las fuentes dominantes de aporte de carga sólida, además de la fluvial originada aguas arriba, son las márgenes inestables y las lavas torrenciales, mientras que las estructuras sedimentarias predominantes se producen por desbordamiento lateral.

**Poza-rápido.** Tramos en los que un lecho de gravas de pendiente media que varía entre valores inferiores a 0,001 y 0,03 describe una

secuencia longitudinal ondulante entre rápidos constituidos por material más grueso y pozas de material más fino, mientras que en los márgenes pueden apreciarse barras laterales (figura 7-d). La separación entre pozas oscila entre cinco y siete veces el ancho del cauce principal. Las fuentes de sedimentos hegemónicas son la fluvial y la erosión en las márgenes, mientras que los depósitos por desbordamiento y las formas de fondo representan los principales tipos de almacenamiento de sedimento.

**Duna-rizo.** En el lecho formado por partículas de arena y pendiente suave, inferior a 0,001, se aprecian diferentes variedades de formas de fondo móvil con una longitud de onda entre cinco y siete veces el ancho del cauce (figura 7-e). Las fuentes principales de aporte de caudal sólido son la fluvial aguas arriba, la erosión en las márgenes y las formas de fondo, mientras que es hege-

mónico el almacenamiento de sedimento por desbordamiento.

## 5.- CONCLUSIÓN

A continuación, a modo de somera conclusión de los tres artículos destinados a describir las características hidráulica y geomorfológicas propias de los ríos de montaña, se expone una breve síntesis del contenido de los mismos.

Las cuencas de montaña son determinantes en la aportación hídrica global, como demuestra el hecho de que en promedio aunque sólo representan el 32% de la superficie de la cuenca contribuyan en un 63% a la aportación anual.

De forma esquemática pueden distinguirse tres tipos de flujo en cauces de montaña en función de la concentración de carga sólida que transportan: de baja concentración, flujo hiperconcentrado y lava torrencial. El flujo de baja concentración que circula por ríos de montaña se caracteriza por ser generalmente turbulento e hidráulicamente rugoso, subcrítico (salvo en pequeñas distancias y cortos periodos) y presentar perfiles verticales de velocidad de forma heterogénea a causa de su baja sumersión relativa (relación entre el calado medio del flujo y el tamaño de los sedimentos).

Desde una perspectiva geomorfológica, los ríos de montaña, en contraste con los ríos de llanura, se caracterizan por presentar mayor pendiente longitudinal del cauce y sedimento de mayor calibre, mayor conexión con los procesos morfogenéticos de vertiente, mayor relevancia del transporte sólido de fondo y por exhibir formas de lecho específicas. ■

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BATHURST, J.C. (1985): *Literature review of some aspects of gravel-bed rivers*. Institute of Hydrology, Wallingford Oxfordshire.
- BATHURST, J.C. (1993): "Flow resistance through the channel network", en BEVEN, K.; KIRKBY, M.J. (Eds.): *Channel network hydrology*. Wiley.
- BATHURST, J.C. (1997): "Environmental River Flow Hydraulics", en THORNE, C.R.; HEY, R.D.; NEWSON, M.D. (Eds.): *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Wiley.
- BUNTE, K.; ABT, S.R. (2001): "Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring". General Technical Report RMRS-GTR-74. USDA. Forest Service Rocky Mountain Research Station.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G. (1957): "River channel patterns: straight, meandering and braided" *US Geol. Surv. Profess. Papers*. 282-B: 39-85.
- MONTGOMERY, D.R.; BUFFINGTON, J.M. (1993): "Channel classification, prediction of channel response and assessment of channel conditions". Report TFW-SH10-93-002, Washington Department of Natural Resources.
- ROSGEN, D.L. (1994): "A classification of natural rivers". *Catena*. 21: 169-199.
- WOHL, E. (2000): "Mountain rivers". *Water Resources Monograph*. 14. American Geophysical Union.