

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

En el primer artículo, de una serie de tres destinados a una síntesis del estado del conocimiento acerca de la hidráulica y la geomorfología fluvial que se desarrollan en ríos de montaña, se puso de manifiesto el papel absolutamente determinante de las cuencas montañas en los recursos hídricos mundiales. Asimismo, se describieron los rasgos definitorios de las tres categorías de flujo consideradas en cauces de montaña en función de la concentración del sedimento transportado (de baja concentración, hiperconcentrado y lava torrencial). En este segundo artículo se exponen las principales características hidráulicas del flujo de baja concentración de sedimento.

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

### 3.-CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS (continuación)

#### 3.2.- Características hidráulicas del flujo de baja concentración

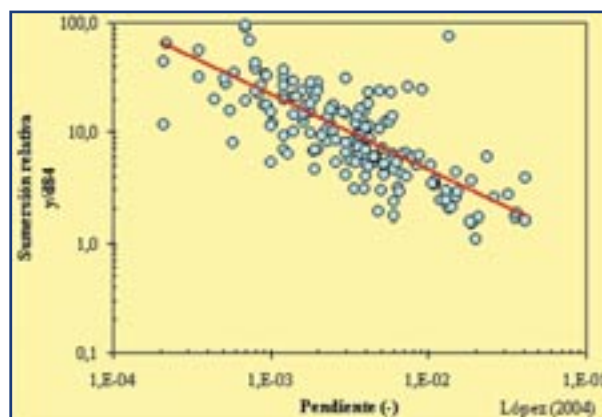
##### 3.2.1.- Sumersión relativa reducida

Debido al efecto combinado del gran calibre de los sedimentos y la elevada pendiente longitudinal del cauce, para la mayoría de los flujos la relación entre la profundidad del agua y el diámetro de los sedimentos es mucho más reducida en los ríos de montaña de material grueso que en los ríos de arena de llanura. Lo anterior se cumple incluso para profundidades tan elevadas como la correspondiente a la capacidad máxima de desagüe del cauce principal (*bankfull*). En la figura 3 se ha representado la relación entre la pendiente longitudinal del cauce y la sumersión rela-

tiva para la profundidad máxima del cauce principal (expresada en este caso como el cociente entre el calado medio en la sección y el tamaño  $d_{84}$ ) en diferentes ríos de grava. En dicha figura se pone de manifiesto que para pendientes del cauce superiores al 1% en condiciones de *bankfull* no se llega a superar una sumersión relativa de 10, lo que significa que para este tipo de cauces la mayor parte del tiempo nos encontramos que los elementos más gruesos puede descollar en la superficie libre.

##### 3.2.2.- Flujo turbulento e hidráulicamente rugoso

En un flujo laminar el fluido se desliza en capas o láminas, de tal modo que las trayectorias de las



**Figura 3.** Relación entre pendiente longitudinal y sumersión relativa en condiciones de *bankfull* para ríos de grava. Fuente: López (2004).



Río Noguera-Ribagorzana.

partículas individuales ni se cruzan ni intersectan. En un flujo turbulento las partículas describen movimientos irregulares secundarios y sufren fluctuaciones de la velocidad que se superponen al flujo principal promedio. El grado de turbulencia de un flujo se determina a partir del número de Reynolds ( $Re$ ) que representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan en el fluido. Para flujos en lámina libre se calcula como:

$$Re = \frac{v \cdot R}{\nu}$$

denotando  $v$  la velocidad media del flujo,  $R$  el radio hidráulico de la sección mojada y  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua. Para números de Reynolds superiores a 2.000 el flujo es turbulento, mientras que para valores inferiores a 500 se considera flujo laminar. Entre 2.000 y 500 el flujo es de transición entre laminar y turbulento. En ríos de grava el flujo es en la inmensa mayoría de las ocasiones turbulento, dado el gran predominio que en este tipo de cauces muestran las fuerzas de inercia sobre las viscosas. En la figura 4 se ha representado sobre el plano  $v$ - $R$  la posición de aproximadamente mil registros efectuados en ríos de grava en condiciones de flujo

Aun siendo el flujo turbulento se pueden distinguir tres situaciones en función de la penetración de los elementos de rugosidad que conforman el contorno sólido en la subcapa límite laminar. Dicha subcapa limita con el lecho y en su seno predominan las fuerzas viscosas sobre las de inercia, por lo que localmente el flujo es laminar. Si el tamaño de las partículas que conforman el lecho es tal que éstas atraviesan completamente la subcapa laminar o incluso la destruyen al impedir su continuidad, el flujo es hidráulicamente rugoso. Si por el contrario las partículas penetran en la subcapa laminar de forma limitada el flujo se clasifica como hidráulicamente liso. El tipo de régimen incide en los modelos de resistencia al flujo, ya que si el flujo es hidráulicamente liso el factor de fricción se calcula únicamente en función del número de Reynolds y sin que influya la rugosidad del contorno. Por el contrario, cuando el flujo es hidráulicamen-

te rugoso el cálculo del factor de fricción depende de la rugosidad relativa (relación entre calado y rugosidad equivalente, siendo esta última de forma aproximada proporcional al tamaño de sedimento) y es independiente del número de Reynolds.

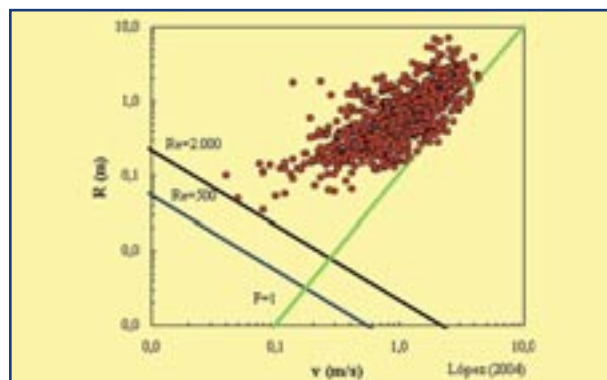
En ríos de lecho granular de material grueso, como son los ríos de partículas de grava y superiores, dada la gran irregularidad del contorno sólido, introducida por el tamaño, forma y disposición de las partículas, la subcapa laminar no puede desarrollarse y no existe para la práctica totalidad de los flujos que circulan, es decir, que el flujo es hidráulicamente rugoso. A partir del número de Reynolds de partícula ( $Re^*$ ) es posible clasificar el flujo en los tipos anteriormente mencionados, pues representa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el entorno de la partícula de sedimento. Dicho número se calcula como:

$$Re^* = \frac{v^* \cdot d_{50}}{\nu}$$

y

$$v^* = \sqrt{g \cdot R \cdot S}$$

denotando  $v^*$  la velocidad de corte,  $d_{50}$  el diámetro correspon-



**Figura 4.** Relación entre velocidad y radio hidráulico para registros en ríos de grava en condiciones de flujo casi uniforme. Se han representado los límites del número de Reynolds para flujo laminar y turbulento y la línea de régimen crítico (número de Froude igual a 1). Fuente: López (2004).

diente al percentil 50 de las distribución granulométrica del tamaño de los sedimentos del contorno,  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua,  $g$  la constante de aceleración de la gravedad y  $S$  la pendiente longitudinal del cauce. El límite en el valor del número de Reynolds de partícula entre flujo hidráulicamente rugoso y de transición es de 200 y de 2 entre este último y el hidráulicamente liso. En la figura 5 se muestra sobre el plano  $v^*-R$  la posición de aproximadamente mil registros efectuados en ríos de grava en condiciones de flujo casi uniforme en cauces de alineación no sinuosa y desprovistos de vegetación y obstáculos. En dicha figura se pone de manifiesto que todos los puntos representados alcanzan valores de  $Re^*$  superiores a 200 y la inmensa mayoría muestra valores muy superiores.

### 3.2.3.- Flujo en régimen subcrítico o lento

El número adimensional de Froude ( $F$ ) es proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre las fuerzas de inercia del flujo y el peso del fluido. Se calcula como:

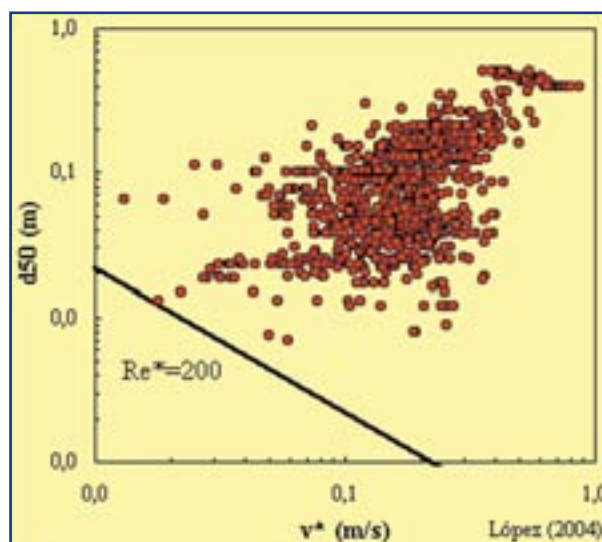
$$F = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{T}}}$$

denotando  $v$  la velocidad media del flujo,  $g$  la constante de aceleración de la gravedad,  $A$  el área mojada del flujo y  $T$  el ancho superficial de la lámina libre. Cuando el valor del número de Froude toma el valor de 1,0 el flujo es crítico, si el valor es superior a 1,0 el flujo se denomina supercrítico y subcrítico si es inferior a 1,0. En canales artificiales de contorno no granular, como puedan ser los revestidos de hormigón, el hecho de que la pendiente del tramo sea elevada suele

implicar una alta velocidad del flujo, y por consiguiente, valores de  $F$  mayores que 1,0 y flujo supercrítico. No obstante, en ríos de montaña, aun con pendientes muy elevadas, se observa en general flujo con número de Froude ligeramente inferior a 1,0, limitándose el flujo supercrítico a tramos cortos (decenas de metros) y periodos reducidos (segundos o minutos). Efectivamente, en la figura 4 se puede apreciar la recta de flujo crítico (número de Froude igual a 1,0), sobre el plano  $v-R$ . Se observa que la inmensa mayoría de los puntos se sitúan a la izquierda de la recta de flujo crítico y aquellos puntos que se sitúan a la derecha tienen números de Froude ligeramente superiores a la unidad. Además, el centro de gravedad de la figura que forman los puntos representados se encuentra próximo al límite de condición crítica. De acuerdo con Jarrett (1984) lo anterior se explicaría debido a la gran disipación de energía del flujo que en ríos de material grueso se produce debido diferentes componentes como la protusión de los sedimentos y la formación de resaltes hidráulicos locales aguas abajo de los elementos más descollantes.

En contra de lo que se afirma en el párrafo precedente podría argumentarse que en general en ríos de montaña, por razones de seguridad, son escasos los registros hidráulicos completos correspondientes a caudales de avenidas extraordinarias, con lo que en la figura 4 se

encuentran infrarrepresentados los flujos que por su elevada velocidad podrían dar lugar a régimen supercrítico. Sin embargo, según afirma Jarrett (1984) en esos casos la erosión de los sedimentos y el transporte sólido que se establece puede provocar un incremento de la resistencia al flujo que detrae energía a la corriente e impide que ésta alcance el régimen supercrítico de forma generalizada en el espacio y en el tiempo. Incluso análisis de crecidas provocadas por la rotura de presas (Jarrett y Costa, 1986; Trieste, 1992) han demostrado el predominio del flujo subcrítico en tramos de río con pendientes longitudinales elevadas. Grant (1997), basándose en análisis teórico-empíricos, propugna que en ríos con sedimento de tamaño desde arena hasta bolo se alcanza un equilibrio entre flujo líquido, sólido y morfología del cauce de modo que el número de Froude toma valores próximos a la unidad o moderadamente inferiores. En definitiva, parece que en ríos de contorno erosionable el flujo supercrítico únicamente se produciría en cor-



**Figura 5.** Relación entre velocidad de corte y radio hidráulico para registros en ríos de grava en condiciones de flujo casi uniforme. Se han representado los límites del número de Reynolds de partícula para flujo hidráulicamente rugoso. Fuente: López (2004).





tas distancias y periodos producto de elevados caudales punta.

**3.2.4.- Distribución vertical de velocidad no logarítmica**

Para un flujo en lámina libre de régimen turbulento e hidráulicamente rugoso cuando el tamaño de las partículas o la rugosidad equivalente son despreciables o muy inferiores a la profundidad de la corriente, la ley de variación de

la velocidad con la profundidad en una vertical se puede aproximar con suficiente precisión a partir de una ecuación logarítmica, basándose en la ley de Prandtl-Karman. Lo anterior tiene, entre otras, implicaciones en la modelación de la resistencia al flujo, en el cálculo de la tensión de corte que actúa en el contorno o en aquellos procedimientos de aforo de caudal que se basan en la medición puntual de la velocidad.

Cuando el flujo es macrorrugoso o de sumersión reducida el calibre del sedimento o la rugosidad equivalente del contorno son del orden de la profundidad de la corriente. En esas condiciones se ha observado por diferentes investigadores que el perfil de velocidad en una gran mayoría de ocasiones diverge considerablemente de la ley logarítmica.

Un tipo de perfil que se ha identificado frecuentemente en condición de sumersión reducida ( $y/d_{sa}$  inferior a 4-6) (p. ej. Jarrett, 1990; Ferro, 2003) es el denominado en "S". Comparado con el perfil logarítmico presenta una mayor velocidad que éste para puntos situados sobre la línea delimitada por los sedimentos gruesos más descollantes, mientras, que por el contrario, bajo tal línea la velocidad es inferior.

En uno de los estudios más exhaustivos sobre distribución espacial de la velocidad del flujo en ríos de montaña en condiciones de flujo macrorrugoso, llevado a cabo por Byrd et al. (2000) y en el que se estableció una elevada densidad de puntos de medida de velocidad, se constató una gran heterogeneidad en dicha distribución. De los 60 perfiles de velocidad obtenidos el 10% seguía la ley logarítmica, un 40% mostraba una variación aproximadamente lineal y del resto algunos correspondían al perfil en "S", aunque sin embargo la mayoría eran irregulares. ■

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

BATHURST, J.C. (1985): *Literature review of some aspects of gravel-bed rivers*. Institute of Hydrology, Wallingford Oxfordshire.

BYRD, T.C.; FURBISH, D.J.; WARBURTON, J. (2000): "Estimating depth-averaged velocities in rough channels". *Earth Surface Processes and Landforms*. 25: 167-173.

FERRO, V. (2003): "ADV measurements of velocity distributions in a gravel-bed flume". *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 707-722.

GRANT, G.E. (1997): "Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis". *Water Resources Research*. 33: 349-358.

JARRETT, R.D. (1984): "Hydraulics of high-gradient streams". *Journal of Hydraulic Engineering*. 110, 11: 1519-1539.

JARRETT, R.D. (1990): "Hydrologic and hydraulic research in mountain rivers". *Water Resources Bulletin*. 26, 3: 419-429.

JARRETT, R.D.; COSTA, J.E. (1986): *Hydrology, Geomorphology, and Dam-Break Modelling of the July 15, 1982 Lawn Lake Dam and Cascade Lake Dam Failures, Larimer County, Colorado, U.S.* Geological Survey Profesional Paper 1369.

LÓPEZ, R. (2004): *Ecuaciones para la determinación de la resistencia al flujo en ríos de montaña*. Tesis Doctoral (en preparación). Universitat de Lleida.

TRIESTE, D. J. (1992): "Evaluation of Supercritical/Subcritical Flows in High-Gradient Channel" *Journal of Hydraulic Engineering*. 118, 8: 1107-1118.

WOHL, E. (2000): "Mountain rivers". *Water Resources Monograph*. 14. American Geophysical Union.

**CONGRESO INTERNACIONAL**

**CRITERIOS E INNOVACIONES EN SEGURIDAD DE TUNELES**



**Gijón 29, 30 de Junio y 1 de Julio de 2005**

**PROGRAMA:**

Miércoles 29 de junio	Jueves 30 de junio	Viernes 1 de julio
<b>MAÑANA</b> * Legislación * Normativa	<b>MAÑANA</b> * Ensayos * Innovaciones técnicas	<b>MAÑANA</b> * Visita al Centro de Investigación de Fuegos y Ventilación en Túneles "San Pedro de Arnes" * <b>Ensayo de Incendio</b>
<b>TARDE</b> * Ensayos * Simulaciones numéricas	<b>TARDE</b> * Ensayos * Simulaciones numéricas	<b>Clausura del Congreso "España" (Lunch informal)</b>
<b>NOCHE</b> Cena de bienvenida	<b>NOCHE</b> Cena de gala	

**PROMUEVE Y ORGANIZA**




**ASTURTUNEL**  
C/ Alier, Nº 1 Bajo.  
33600 Mieres, Asturias (España).  
Tel: +34 985 45 32 55  
Fax: +34 985 46 47 37  
E-mail: [info@asturtunel.com](mailto:info@asturtunel.com)  
Ponencias: [congreso@asturtunel.com](mailto:congreso@asturtunel.com)  
[www.asturtunel.com](http://www.asturtunel.com)