

**ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DE SEDIMENTO EN UN RÍO
DE ARENAS Y GRAVAS FINAS: IMPLICACIONES
TÉCNICAS Y METODOLÓGICAS.**

Ramón J. BATALLA & María SALA
*G.R.A.M. Grup de Recerca Ambiental Mediterrània
Departament de Geografia Física i An. Geog. Reg.
Universitat de Barcelona*

RESUMEN: Este trabajo analiza el movimiento de las partículas sólidas en un río de arenas y gravas finas (Arbúcies, Cordilleras Costero Catalanas), a partir de las mediciones de carga de fondo realizadas semanalmente y durante crecidas en 1991 y 1992. Los resultados muestran la importancia de la distribución granulométrica del material del lecho del río sobre la tensión de corte crítica necesaria para el inicio del movimiento de un tamaño de partículas determinado. Desde un punto de vista técnico, se confirma que la fiabilidad del tomamuestras Helley-Smith disminuye considerablemente en lechos de arenas y gravas finas con una distribución granulométrica muy dispersa.

ABSTRACT: Initiation of motion of the bed-material is investigated in a sandy gravel-bed river (Arbúcies, Catalan Coastal Ranges), where bedload samples were obtained every week as well as during flood events in 1991 and 1992. The study assesses the influence of the grain size distribution of the streambed on the critical shear-stress for particle entrainment. From a technical perspective, the Arbúcies data confirm the low efficiency of the Helley-Smith Sampler in poorly sorted sandy gravel-bed rivers.

INTRODUCCIÓN.

El transporte de fondo de un río es la parte de la carga de sedimento que se mueve por el lecho del canal fluvial, ya sea por saltación o bien por rodamiento. El tamaño del material que se mueve como carga de fondo depende, básicamente, de la energía y de la turbulencia del flujo. No obstante, raramente incluye material más fino de 0,1 mm que se transporta directamente en suspensión (GÓMEZ & CHURCH, 1989). La intensidad del flujo de agua controla el inicio del movimiento de la partículas en el lecho del río y la tasa de

transporte correspondiente. Esta condición de movimiento inicial se mide por el caudal crítico (*critical discharge*, SCHOKLITSCH 1930), la velocidad del flujo (HJULSTRÖM, 1935), por la tensión de corte (*shear stress*, SHIELDS 1936), o por la energía del canal (*stream power*, BAGNOLD 1977). El flujo crítico para el inicio del movimiento es aquel con la mínima intensidad capaz de mover las partículas en el lecho.

Desde 1991 se está llevando a cabo un proyecto de investigación en la cuenca Mediterránea de la riera de Arbúcies (BATALLA, 1993), el principal objetivo del cual es construir un balance de sedimento centrado en la contribución del material sólido a la producción de sedimento de la cuenca. En concreto, este trabajo analiza el inicio del movimiento de las partículas sólidas en el lecho de este río de arenas y gravas finas, y establece algunas implicaciones técnicas para la obtención de mediciones de campo sobre transporte de sedimento.

ÁREA DE ESTUDIO.

La riera de Arbúcies es uno de los afluentes principales del río Tordera. La cuenca de drenaje está situada en la parte nororiental del macizo del Montseny (Cordilleras Costero Catalanas) y drena una superficie de 114 km². El principal material que forma el subsuelo de la cuenca es la granodiorita biotítica, que representa más del 80% de la superficie de la cuenca. Los depósitos cuaternarios constituyen el 10% del área drenada y se componen de tres niveles de terrazas Holocenas en las cuales el material entre 2 mm a 4 mm es el predominante. El material del lecho del río está compuesto por arenas y gravas finas no uniformes con un d_{50} de 2,2 mm y un d_{95} de 71 mm (fig.1), siendo el índice de dispersión de 7,6 calculado a partir de BRONWILIE (1981):

$$\sigma_g = 0,5[(d_{84}/d_{50})+(d_{50}/d_{16})]$$

donde σ_g es el índice de clasificación del material del lecho, y $d_{16,50,84}$ son los percentiles respectivos de la distribución de tamaños del sedimento en milímetros. El muestreo del material del lecho, basado en CHURCH ET AL. (1987), fue realizado con un error de un 1,5% en el criterio de selección del peso de las muestras.

La precipitación media anual en la cuenca es de 947 mm con una alta variabilidad interanual. El análisis del registro de caudales diarios para el período 1967-1992 (BATALLA & SALA, 1993), indica que hay un flujo continuo de agua el 98% del tiempo. El caudal medio es de 1,1 m³ s⁻¹ y el flujo

de base medio es de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La pendiente media del canal en el sector estudiado es del 0,95%.

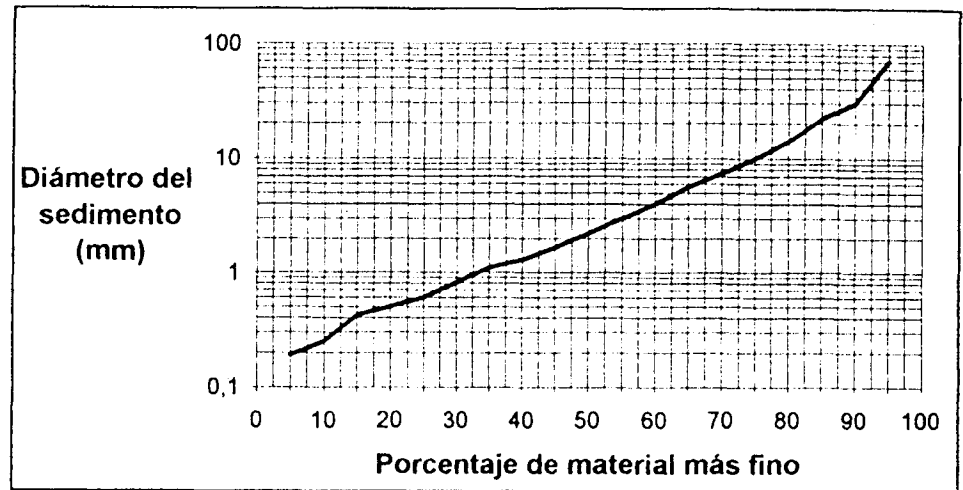


Fig 1. Distribución granulométrica del material del lecho de la riera de Arbúcies

METODOLOGÍA

Los datos de caudales y de carga de fondo se han obtenido a la salida de la cuenca, aguas arriba de la estación de aforos de la *Junta d'Aigües, Generalitat de Catalunya*, sobre la base de muestreos semanales y durante avenidas en 1991 y 1992. El transporte de fondo se ha recogido mediante un tomamuestras portátil Helley-Smith de 76,2 mm de entrada y red de 0,45 mm (fig.2). Las muestras se tomaban de manera integrada en intervalos de 1 metro con una frecuencia de muestreo que oscilaba entre 5 y 10 minutos. Las setenta y dos muestras tomadas cubren un amplio rango de condiciones hidráulicas (98% de la curva de frecuencias de caudales) y de tasas de transporte de fondo (desde $0,4 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en caudales bajos a $280 \text{ gr m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ durante caudales de cauce lleno o *bankfull*).

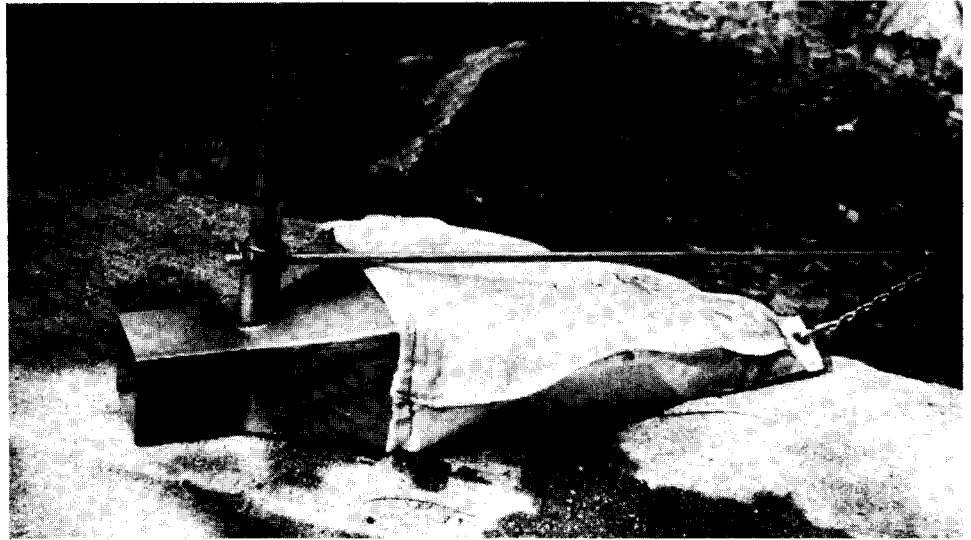


Fig 2. Muestreador ligero Helley-Smith

Es importante señalar que para partículas más grandes de 0,5 mm y más pequeñas de 16 mm, la fiabilidad de este muestreador alcanza el 100%. Para el sedimento con un calibre superior a 16 mm la efectividad en el muestreo se reduce al 70% (EMMETT, 1979). El caudal se ha medido rutinariamente como el producto del área de la sección y la velocidad media del flujo tomada a 0,4 de la profundidad desde el fondo, mediante un molinete hidráulico OTT C-2.

RESULTADOS.

El estadio crítico del inicio del transporte de sedimento es, generalmente, difícil de establecer. En flujos turbulentos, las fluctuaciones de velocidad pueden causar variaciones temporales y espaciales al azar. La identificación visual del nivel crítico de movimiento es, por tanto, forzosamente subjetiva.

Inicio de movimiento del sedimento en el canal

En el caso de la riera de Arbúcies se ha establecido un umbral de inicio de movimiento de las partículas en el canal a partir de dos años de observaciones de campo. El caudal mínimo para el cual se ha observado movimiento de

material en el río es de 250 l s^{-1} , con una profundidad del flujo de 10 cm igualada o superada el 80% del tiempo (BATALLA & SALA 1993), y una velocidad media de $0,49 \text{ m s}^{-1}$.

Es interesante relacionar el movimiento inicial del sedimento con medidas sencillas de las condiciones medias del flujo, como por ejemplo la tensión de corte media ($\tau_0 = \rho_w g D s$). El criterio de tensión de corte crítica de SHIELDS (1936) reconoce que la tensión crítica (τ_{0c}) se incrementa con el tamaño de las partículas, aunque también depende de la rugosidad del lecho. En el caso de Arbúcies, la tensión media sobre el lecho del río en el momento del inicio del transporte de carga de fondo es,

$$\tau_0 = \rho_w g D s = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,1 \cdot 0,0095 = 9,3 \text{ N m}^{-2}$$

donde, ρ_w es la densidad del fluido en kg m^{-3} , g es la aceleración de la gravedad en m s^{-2} , D es la profundidad media de la sección, y s es la pendiente en el sector. La tensión crítica necesaria en esta sección para el inicio del movimiento de las partículas en el canal, basada en el criterio de SHIELDS (1936) es,

$$\tau_{0c} = \rho'_s g d_{50} 0,056 = 1650 \cdot 9,8 \cdot 0,0022 \cdot 0,056 = 2 \text{ N m}^{-2}$$

donde, ρ'_s es la densidad del material en peso sumergido en kg m^{-3} y d_{50} es el tamaño medio del material del río. Este análisis demuestra una cierta compactación del material superficial más fino del canal durante caudales bajos, ya que el inicio del movimiento de las partículas no se produce hasta que la tensión crítica se ha superado en más de 4 veces. El inicio del movimiento ocurre siempre asociado a la migración de dunas en el canal.

Relación entre la tensión de corte crítica adimensional y la distribución granulométrica del material del río

A partir de la información existente sobre el movimiento de las partículas con un calibre mayor a 2 mm, BAKER & RITTER (1975) y CHURCH (1978) demostraron que la tensión crítica cambiaba de orden de magnitud para una serie de partículas de tamaños determinados. Cabe señalar, asimismo, el estudio de ANDREWS (1983), que presenta una mejora del concepto de tensión de corte crítica adimensional desarrollado por SHIELDS (1936). Según este autor, y a partir de las mediciones de carga de fondo obtenidas en ríos de arenas, gravas y cantos, el valor de la tensión de corte crítica necesaria para poner el material en movimiento depende directamente de la distribución del material en el lecho

del río. Siempre que en el río se encuentre material de un tamaño superior al recogido por el muestreador, la partícula máxima recogida indica la competencia del flujo. ANDREWS (1983) concluyó que para partículas con un tamaño entre 0,3 y 4,2 el tamaño del material de la capa subsuperficial del lecho del río (d_{50}), la tensión de corte crítica adimensional es igual a,

$$\tau_{ci}^* = 0,0834 (d_{50} / d_i)^{0,872} \quad (r^2=0,98)$$

donde d_i es el diámetro máximo encontrado en la muestra de carga de fondo. Este análisis demuestra que, en ríos con material no uniforme, la tensión de corte crítica adimensional varía de forma inversamente proporcional al diámetro de la partícula; por tanto, las partículas del lecho entre 0,3 y 4,2 el tamaño medio del material subsuperficial se ponen en movimiento con el mismo caudal. En el caso de la riera de Arbúcies se puede aplicar directamente esta formulación, aunque el diámetro del material analizado corresponde a las capas superficial y subsuperficial sin discriminar. Los datos de transporte de fondo se han agrupado en relación a la clase del calibre máximo de las partículas recogidas en las muestras (tabla 1).

La tensión de corte crítica adimensional para cada clase se ha calculado a partir de,

$$\tau_{ci}^* = \tau_0 / (\rho_s - \rho_w) g d_i$$

d_i/d_{50}	τ_{ci}^*
1,36	0,47
1,82	0,31
2,95	0,28
2,27	0,30
2,50	0,29
2,73	0,22
3,04	0,19
4,09	0,19
4,93	0,15

Tabla 1. Tensión de corte crítica adimensional para datos agrupados de la relación d_i/d_{50}

Los valores de τ_{ci}^* se han contrapuesto a la relación d_i/d_{50} (fig.3). Empíricamente, se ha encontrado una buena correlación entre la tensión de corte crítica adimensional y la relación d_i/d_{50} . La relación viene definida por la ecuación,

$$\tau_{ci}^* = 0,549 (d_{50} / d_i)^{0,821} \quad (r^2=0,92)$$

Cada punto en la curva de la figura 3 representa la tensión de corte crítica adimensional media calculada a partir de diferentes observaciones agrupadas de τ_{ci}^* para una relación d_{50}/d_i determinada. Se obtiene la mejor relación estadística para valores de d_i/d_{50} inferiores a 4,59. En el caso de observaciones individuales de τ_{ci}^* la dispersión es más elevada alrededor de la regresión. Se produce, por tanto, un buen ajuste entre la curva propuesta por ANDREWS (1983) y los datos de carga de fondo obtenidos en la riera de Arbúcies.

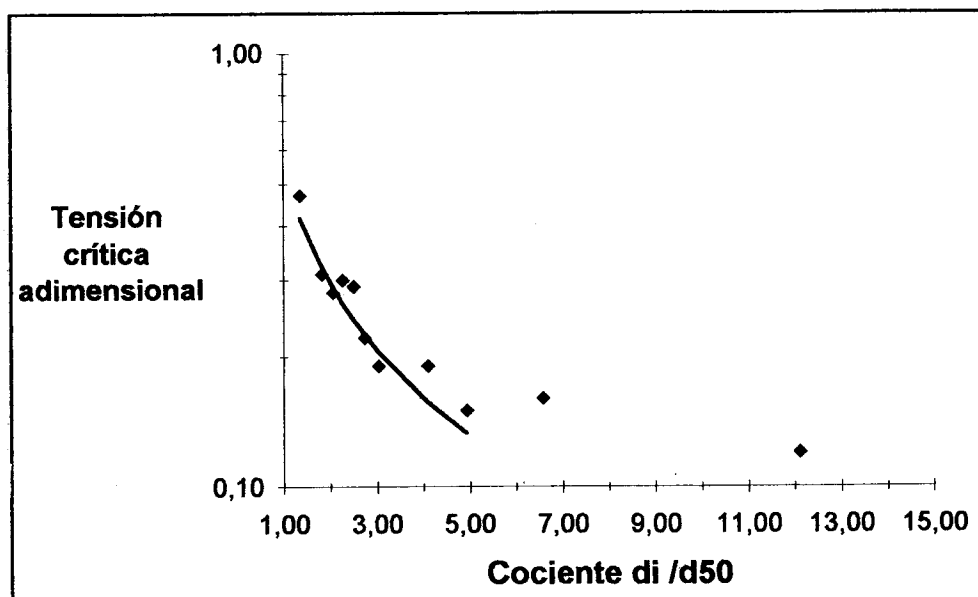


Fig 3. Relación entre el cociente del diámetro crítico de cada muestra y el diámetro medio del material del lecho, y la tensión de corte crítica adimensional.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

El análisis realizado muestra que la distribución del material del lecho tiene un efecto muy importante sobre la tensión crítica necesaria para poner en movimiento un tamaño de partículas determinadas. En la riera de Arbúcies se ha encontrado que este efecto es muy importante para las partículas hasta 4,59 veces el calibre medio del material del canal. Para partículas más grandes que esta relación, la tensión de corte crítica adimensional tiene un valor aproximado de 0,15. El análisis realizado muestra que la tensión de corte crítica adimensional es inversamente proporcional al diámetro de la partícula. Según ANDREWS (1983), ésta es una conclusión suficientemente significativa, ya que indica que las partículas hasta un tamaño 4,59 veces superior al material del lecho del río se ponen en movimiento con una misma tensión de corte y, por lo tanto caudal. Consecuentemente, el inicio diferencial de movimiento no es un proceso geomorfológico destacado en canales aluviales de arenas y gravas. Los resultados presentados por ANDREWS (1983) han sido considerablemente debatidos, principalmente por lo que se refiere a la fiabilidad de las mediciones realizadas con Helley-Smith en ríos de gravas y material grueso (KOMAR 1989). En este sentido, la figura 4 muestra que: *a*) hay una relación muy débil entre el diámetro medio del sedimento movilizado y el caudal, indicando que el material más fino se mueve uniformemente durante cualquier caudal, *b*) los resultados similares para las partículas máximas transportadas y, *c*) se produce un cambio en el orden de magnitud de las partículas máximas movilizadas durante caudales de cauce lleno o *bankfull* ($4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Este fenómeno podría indicar la activación de todo el lecho y la liberación de grandes cantidades de sedimento para ser transportado.

Los valores de la tensión crítica adimensional τ_{ci}^* medidos en ríos de arenas, gravas y cantos oscilan, normalmente, entre 0,25 y 0,020 alrededor del valor crítico 0,056 de SHIELDS (1936). Como hemos señalado anteriormente, en el caso de Arbúcies algunos de los valores de la tensión de corte crítica adimensional son superiores a 0,25 (fig.3). Este hecho podría explicarse por diferentes motivos: *a*) la dispersión del material del lecho con un d_{95} de 71 mm en relación al d_i máximo de 55 mm encontrado en las muestras tomadas con Helley-Smith indica que el tomamuestras no ha recogido en la riera de Arbúcies, especialmente durante las crecidas, material con un calibre superior al d_{92} del material disponible en el lecho, *b*) posiblemente, la hipótesis de ANDREWS (1983) que señala que el material más grande recogido en una muestra con Helley-Smith es el material de mayor calibre que se ha movido, siempre que

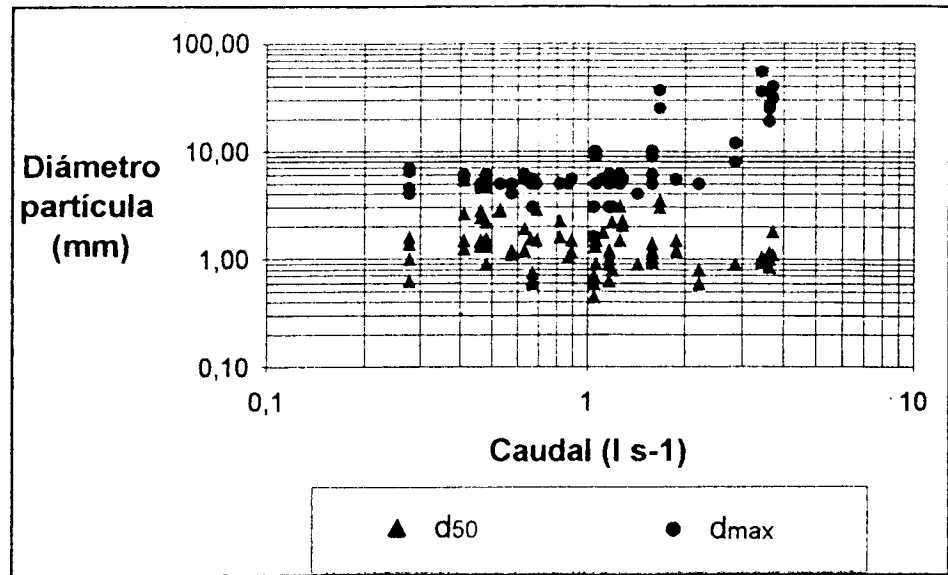


Fig 4. Relación entre el diámetro medio y máximo de las partículas muestreadas y el caudal.

haya partículas más grandes en el lecho, no es aplicable a la riera de Arbúcies y, c) una compactación del material fino superficial del lecho del canal, que impide el movimiento de partículas más grandes que las recogidas. La experiencia de campo lleva a deducir que, especialmente durante las crecidas, con velocidades medias de 1 m s^{-1} , calados de 50 cm y una pendiente del 1%, el material superior a 55 mm era también transportado como carga de fondo. Desde un punto de vista técnico y metodológico, este análisis confirma que la fiabilidad del muestreador Helley-Smith, ampliamente demostrada en ríos de arena y gravas finas uniformes, disminuye considerablemente en lechos que, aunque presentan un d_{50} correspondiente a arenas y gravas finas, como es el caso de la riera de Arbúcies, tiene una distribución granulométrica muy dispersa. Es aconsejable, por tanto, tener en cuenta otros percentiles de la curva granulométrica (d_{75} , d_{90}), en el momento de escoger la técnica de muestreo más adecuada para el arrastre de fondo.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido financiado con una Beca F.P.I. del Ministerio de Educación y Ciencia, y con ayudas a la investigación de la CIRIT, Generalitat de Catalunya. Parte de este trabajo ha sido discutido con Juan P. Martín Vide, Universitat Politècnica de Catalunya, con Marwan Hassan, University of British Columbia, y con Celso García, Universitat de Barcelona. Agradecemos la colaboración técnica de la Junta d'Aigües, Generalitat de Catalunya y de Peter Ergenzinger, Freie Universität Berlin.

REFERENCIAS.

- ANDREWS, E. D. (1983). "Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material". *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 94, pp. 1225-1231.
- BAGNOLD, R. A. (1977). "Bedload transport by natural rivers". *Water Resources Research*, vol. 13 (2), pp. 303-312.
- BAKER, V. R. & RITTER, D. F. (1975). Competence of rivers to transport coarse bedload material, *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 86, pp. 975-978.
- BATALLA, R. (1993). *Contribució del transport de sorres en el balanç de sediment d'una conca granítica mediterrània*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, pp. 199.
- BATALLA, R. & SALA, M. (1993). *Effective discharge for bedload transport in a subhumid Mediterranean sandy gravel-bed river (Arbúcies, NE Spain)*. En: HICKIN, E.J. (ed.): *Rivers* (en prensa).
- BROWNLIE, W. R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*. Report KH-R-43A, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California.
- CHURCH, M. A. (1978). "Paleohydrological reconstructions from a Holocene valley". En: MIALL, A.D. (ed.): *Fluvial sedimentology*. Can. Soc. Petr. Geol. Mem., vol.5, pp.743-772.
- CHURCH, M. A., McLEAN, D. G. & WOLCOTT, J. F. (1987). "River bed gravels: Sampling and analysis". In: THORNE, C.R., BATHURST, J.C. & HEY, R.D.: *Sediment transport in gravel bed rivers*. Wiley, Chichester, pp.43-88.
- EMMETT, W. W. (1979). "A field calibration of the sediment trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler" *US Geol. Sur. Prof. Pap.* 1139.
- GÓMEZ, B. & CHURCH, M. A. (1989). "An assessment of bedload sediment

- transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, vol. 25, (6), pp.1161-1186.
- HJULSTRÖM, F. (1935). "Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris". *Bull. Geol. Inst.*, Univ. Uppsala, vol.25, pp. 221-527.
- KOMAR, P. D. (1989). "Flow-competence evaluation of the hydraulic parameters of floods: an assessment of the technique". En: BEVEN, K. CARLING, P. (eds.): *Floods: hydrological, sedimentological and geomorphological implications*. Wiley, Chichester, pp. 107-134.
- SCHOHLITSCH, A. (1930). *Handbuch des Wasserbaues*. 1ª ed., Springer, Vienna.
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik un der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. *Mitteilung der Preussische versuchsanstalt fuer Wasserbau und Schifftbau*, 26, Berlin.