



APLICACIÓN DE LA FOTOGRAFÍA AL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE RÍOS CON LECHO DE GRAVAS

Grain size analysis of gravel-bed rivers by means of photography

L. Crozzoli y R.J. Batalla

*Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl
Universitat de Lleida
Av. Alcalde Rovira Roure, 177. E-25198 Lleida
E-mail: laura@macs.udl.es Fax: 79702613*

Resumen: Se analiza la aplicabilidad de la fotografía para la caracterización granulométrica en ríos con lecho de gravas. El sector de estudio es la cuenca de la Ribera Salada (Pre-Pirineo). En el trabajo se comparan el muestreo directo con retícula, la fotografía de superficie (escala 1:10) y la fotografía remota (1:45). Los resultados indican que la fotografía de superficie es muy fiable a partir de valores de 10 mm de eje *b* de partícula y es aplicable, con un ajuste medio del 95%, para la estimación de todos los percentiles de la distribución. La fotografía remota también es aplicable con precisión (95% de ajuste) para la obtención de curvas granulométricas truncadas en 45 mm lo que significa, en el caso de la Ribera Salada, el percentil 25 (D_{25}) de las distribuciones. Si no se realiza ningún truncamiento el error aumenta hasta el 30% para los diámetros superiores a 64 mm. La rugosidad del lecho se ha estimado también a partir de las imágenes fotográficas, con un ajuste cercano al 95% entre este método y la medición directa con retícula.

Palabras clave: ríos con lecho de gravas, distribución granulométrica, rugosidad, muestreo, retícula, fotografía, escala.

Abstract: Grain-size distribution (GSD) and roughness of gravel-bed rivers are studied by means of vertical photography. Testing area is located in the Ribera Salada River basin (Catalan Pre-Pyrenees), where fifteen reaches were surveyed and sampled. Methods are direct sampling by means of a sampling grid, and indirect measurements using surface photography (scale 1:10) and remote photography (1:45). On one side, results indicate that surface photography is a reliable technique to estimate particle size from 10 mm and fully applicable to derive the whole grain-size distribution. Adjustment of this method to direct measurements reaches 95% and errors are mainly due to underestimation. On the other, remote photography is a reliable tool in order to obtain grain-size distributions for particles larger than 45 mm in diameter, the D_{25} of the Ribera Salada GSD. Adjustment between methods for particles between D_{25} and D_{100} is very high (95%) in truncated distributions at 45 mm, and errors are due to underestimation. However, without truncation, error increases up to 30% for particles larger than 64 mm. River-bed roughness can also be estimated using data on particle size from photographs, with a degree of adjustment between the three methods close to 95%.

Keywords: gravel-bed rivers, grain-size distribution, roughness, sampling grid, photography, scale.



Crozzoli, L. & Batalla, R.J. (2003) Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas. *Rev. C. & G.*, 17 (3-4), 29-39.

1. Introducción

La distribución granulométrica del lecho de un río es un aspecto fundamental a la hora de describir las

características físicas de un cauce fluvial y analizar su dinámica, con múltiples aplicaciones en el campo de la Geomorfología, la Ecología y la Ingeniería fluvial. Su conocimiento es de gran utilidad para el estudio de

procesos fluviales como el inicio del movimiento de las partículas del lecho del río, para la estimación de parámetros de rugosidad en ecuaciones de resistencia al flujo y del calibre de los materiales en modelos de carga de fondo, y para la caracterización de hábitats ictícolas. La caracterización del sedimento que forma el lecho de un río es especialmente difícil en ríos con lecho de gravas y materiales gruesos debido, entre otros factores, a la amplitud del rango que presentan, desde limos (<0,063 mm) a grandes bloques (>500 mm), a las variaciones laterales y longitudinales debidas al transporte selectivo del sedimento, y a las variaciones verticales debido a la existencia de una capa acorazada (*armour layer*), compuesta por materiales más gruesos que la subsuperficie (Church *et al.*, 1987). La coraza de un río con lecho de gravas se forma generalmente por el lavado del material fino durante la recesión de avenidas. La capa superficial de gravas y cantos es importante porque es el límite rugoso que ofrece resistencia al fluido.

En función de la existencia de capas diferenciadas, los métodos de muestreo del material de lecho del río se pueden clasificar en dos categorías: superficial y subsuperficial. El objetivo del muestreo superficial es caracterizar las propiedades del material situado en superficie, que son importantes para determinar la rugosidad y la estabilidad del lecho (García, 1994). Los principales métodos de muestreo del material superficial son: *a*) el conteo por transectos (Wolman, 1954), *b*) la retícula (Kellerhals y Bray, 1971), *c*) el método areal (e.g.

Diplas y Sutherland, 1988), y *d*) la fotografía vertical (Adams 1979, Ibbeken y Schleyer 1986).

El objetivo de este trabajo es la validación de la fotografía vertical como técnica de aplicación general, no destructiva y menos costosa que los métodos tradicionales, para el estudio de la distribución granulométrica y la rugosidad en ríos con lecho de gravas. Se analiza la influencia de la escala en la obtención de la información. El trabajo se ha realizado en la cuenca experimental de la Ribera Salada (cuenca del río Segre).

2. Área de estudio

La Ribera Salada es el principal afluente del río Segre en la intercuenca que forman los embalses de Oliana y Rialb (Fig. 1). Está situada en el Pre-Pirineo catalán y ocupa una superficie de 270 km². La pendiente media del río, una vez recogida el agua de sus tres afluentes principales, es del 1,2%. El clima de la cuenca es de montaña mediterránea y el régimen pluviométrico de no-estiaje. En la parte norte de la cuenca se encuentran los materiales calizos del macizo pirenaico, separados de la depresión del Ebro por el cabalgamiento principal surpirenaico. La principal fuente de material grueso de la cuenca (cantos y gravas) lo constituye la litología conglomerática de borde de depresión. Por lo tanto, los cantos ya están rodados cuando llegan al cauce actual.

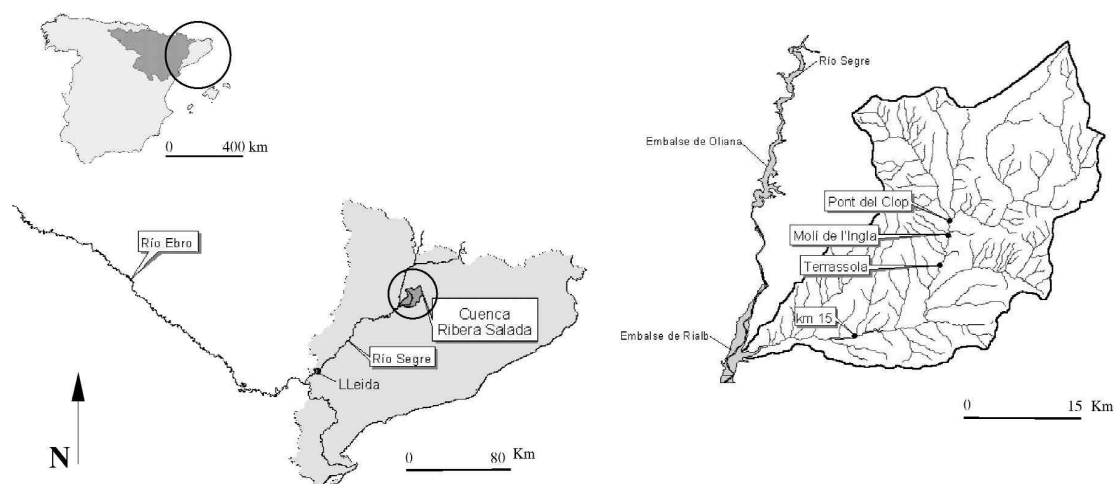


Figura 1. Localización de la cuenca de la Ribera Salada y de los puntos de muestreo granulométrico.
Figure 1. Location of the Ribera Salada watershed and grain-size sampling points along the streamchannel.

El caudal medio de la Ribera Salada es de $1,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, llegando las crecidas anuales a picos de más de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ superando, a menudo, el nivel de canal lleno o *bankfull*. En la mayor parte del tramo medio y bajo, la Ribera Salada es un río unicanal con una sinuosidad de tipo estructural y con barras laterales formadas por materiales de granulometría muy diversa. El calibre medio del material superficial del lecho oscila entre 50 mm y 70 mm (gravas muy gruesas), mientras que el tamaño medio del material subsuperficial varía entre 8 mm y 22 mm (gravas medias) (Alisedo, 1999). La Ribera Salada presenta, en general, un material moderadamente clasificado, con valores del coeficiente de dispersión (σ)¹ de Folk y Ward (1957) alrededor de 1,1. Las partículas presentan todavía una esfericidad notable en todo el sector ($\sigma = 0,67$)², aunque la tendencia general es a tomar forma de disco ($F=2,13$)³, especialmente aguas abajo.

3. Materiales y métodos

Para realizar el trabajo de campo, se eligieron cuatro tramos de estudio en los sectores medio y bajo de la cuenca, caracterizados por la presencia de barras laterales gravas. La caracterización del material superficial de dichas barras se ha realizado de manera indirecta mediante quince fotografías de superficie y seis fotografías remotas y, simultáneamente, de manera directa mediante el muestreo del mismo material con el método de la retícula. En el campo se realizaban en primer lugar las fotografías desde el globo, después se colocaba la retícula y se fotografiaba. Posteriormente y, sin quitar la retícula de la barra, se medían las partículas.

3.1. Muestreo superficial con retícula

El método de la retícula implica la colocación de una retícula o malla sobre la superficie del lecho y del muestreo de las partículas situadas justo debajo de la intersección de 2 ejes (Kellerhals y Bray, 1971). La distancia entre puntos de intersección en la malla

oscila habitualmente entre los 4 cm (Diplas y Sutherland, 1988) y los 5,5 cm (Church *et al.*, 1987).

La retícula debe colocarse paralelamente a la dirección del flujo principal. Se deben buscar puntos donde el material sea lo más representativo posible del conjunto de la barra, evitándose localizaciones erróneas con calibres inusuales. Una vez colocada la retícula, se marcan los cantos en las intersecciones. Posteriormente y, si es posible sin retirar la malla, se recogen los cantos y se miden sus ejes *a* (el más largo), *b* (el máximo perpendicular al eje *a*), y *c* (el perpendicular a la intersección *ab*). El calibre de la partícula viene determinado por el eje *b*.

Para cada muestra se midieron 100 intersecciones, muestra considerada aceptable por diversos autores (Wolman 1954, Church *et al.* 1987, Diplas y Sutherland 1988), desestimando las áreas de material fino y las gravas inferiores a 8 mm. En el caso de la Ribera Salada se empleó una malla de 1,25 m por 0,75 m que fuera compatible con las características ópticas del método fotográfico, por lo que la distancia entre dos puntos de intersección (9,5 cm) fue superior a la recomendada por los autores anteriormente citados.

3.2. Caracterización del material con fotografía vertical

Aplicando el método de la fotografía vertical, el material del lecho del río puede ser caracterizado sin perturbación alguna y más rápidamente (Adams 1979, García 1994). Esta técnica permite el seguimiento del material del lecho a lo largo del tiempo mediante la comparación de fotografías georeferenciadas del mismo punto de la barra o sector analizado. Además, las fotografías de la superficie del lecho del río se pueden solapar y analizar con técnicas fotogramétricas, asegurando un error mínimo (de Jong, 1995). El método fotográfico puede estar sesgado respecto a la distribución real debido a la imbricación, empaquetamiento y ocultación parcial de las gravas y los cantos, por lo que su uso está indicado especialmente para tamaños de gravas gruesas y cantos (Church *et al.*, 1987). Según Friedman (1958), no es un método directamente comparable con el de los transectos (Wolman, 1954), ya que no está sometido a la subjetividad del que realiza el muestreo y las áreas de trabajo son distintas. En este trabajo se ha empleado la técnica de la fotografía con dos variantes: a) de superficie, acoplada a la retícula y, b) remota, desde un globo.

¹ $\sigma = [(s_{84} - s_{16})/4] + [(s_{95} - s_5)/6,6]$, donde σ es la transformación $\sigma = -\log_2 D$ propuesta por Krumbein (1934), y *D* es el percentil correspondiente de la distribución granulométrica de los materiales.

² Índice de esfericidad: $\sigma = \{(bc) / a^2\}^{1/3}$

³ Índice de achatamiento: $F = (a+b)/2c$

La fotografía de superficie con retícula permite obtener imágenes del lecho del río a una distancia de 2 m y a una escala 1:10. Para ello es necesaria una estructura rígida que permita ubicar la cámara a la altura requerida (Fig. 2). El equipo de campo consta del siguiente material:

- Estructura en forma de π compuesta por un palo telescópico de 2 m de altura y una travesía de 0,43 m perpendicular al telescopico, donde se sujeta la cámara.
- Cámara *reflex* con un objetivo de 50 mm y un cable disparador de 0,5 m.
- Nivel de burbuja para asegurar la horizontalidad de la cámara.

Para realizar las fotos se empleó película de 400 ASA. El equipo permitía tomar imágenes de un área de 1,25 m x 0,74 m (Fig. 3). Una vez reveladas, las fotografías se ampliaron a un tamaño de 10 x 18 cm obteniéndose de esta manera un nivel de precisión en la medición de alrededor de 1 mm (1 cm en la realidad), lo que obligó a realizar un corte o truncamiento inferior en las muestras en 8 mm. La escala se obtuvo a partir de la mira topográfica fotografiada en cada imagen. Los resultados obtenidos con este método se han validado con los obtenidos mediante la retícula en la misma posición.

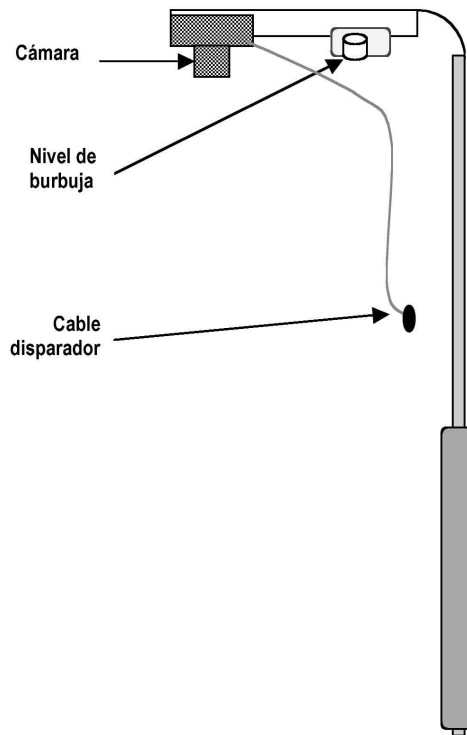


Figura 2. Estructura de sujeción del método fotográfico de superficie.
Figure 2. Fasten frame of the surface photography technique.

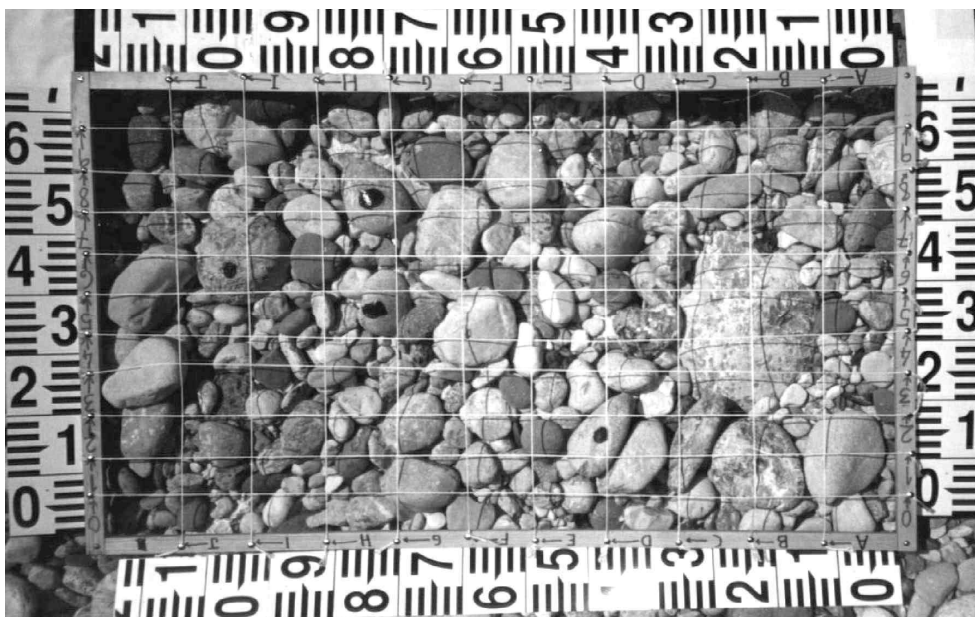


Figura 3. Imagen de gravas y cantos a escala 1:10 (método fotográfico de superficie).
Figure 3. Gravels and cobbles of the river-bed at 1:10 scale (surface photography technique).

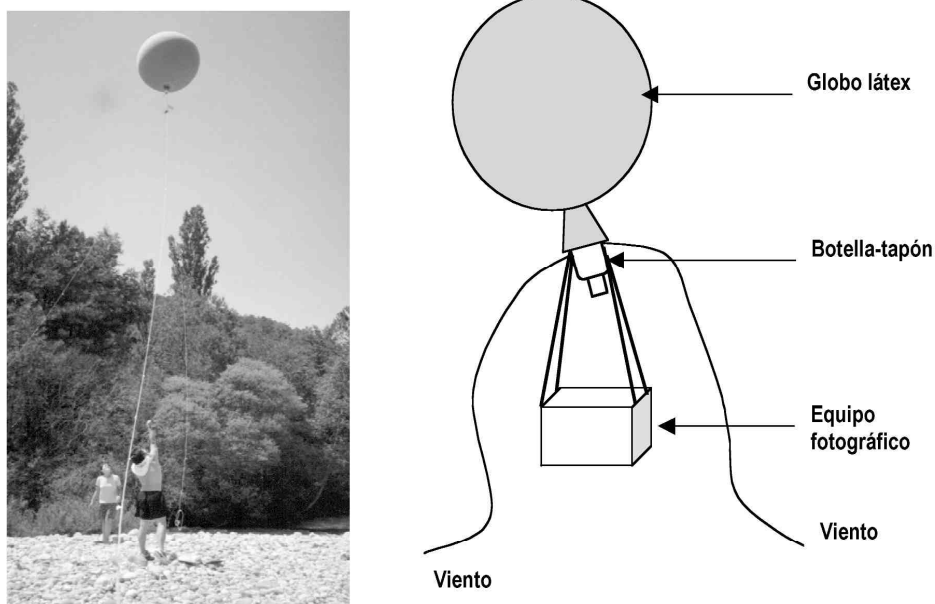


Figura 4. Equipo para operar el método fotográfico remoto desde globo.

Figure 4. Balloon fastening photographic equipment for the remote photography method.

La fotografía remota desde globo permite obtener imágenes de la superficie del lecho a una distancia de 10 m y a una escala 1:45. El nivel de precisión en la medición se estableció en 1 mm (4,5 cm en la realidad), lo que obligó a realizar un truncamiento inferior en 45 mm.

Para realizar las fotografías se empleó un globo inflado con helio que elevaba la cámara hasta esa altura (Fig. 4). El material necesario para trabajar con el método fotográfico remoto es:

- Globo de látex de 0,5 m de diámetro acoplado a una botella a modo de tapón
- Cámara de fotos automática con objetivo de 24 mm con disparador por infrarrojos y caja de protección de porexpán.

Mediante este equipo se obtienen imágenes de 7 m x 4,5 m de la superficie del lecho en las barras (Fig. 5). La película utilizada fue de 400 ASA. El mejor momento para realizar las fotos era a primera hora de la mañana antes que se levantara brisa.

La información obtenida con este método se ha comparado con la de la retícula para evaluar su fiabilidad y los límites de aplicación, y con la obtenida mediante la fotografía de superficie para estu-

diar la influencia de la escala en la precisión de los datos granulométricos obtenidos.

En la Ribera Salada se obtuvieron series de fotografías solapadas, para su ensamblaje y ubicación posteriores. El solapamiento era del 40%, como margen de seguridad tanto lateralmente como entre fotos consecutivas. La obtención de fotos solapadas requiere un trabajo de campo previo, ya que debe marcarse el terreno para indicar el centro de cada foto en el momento del disparo. Aunque más laboriosa, la posibilidad de hacer fotos solapadas es más interesante porque, además de estudiar la granulometría del lecho, permite obtener datos de sus microestructuras (parches, agrupaciones) e, incluso, de su morfología. Estos aspectos no se contemplan en el presente trabajo.

Las curvas granulométricas se han obtenido a partir de la medición sobre la posición de la retícula en la fotografía, del máximo número de partículas posible a escala 1:10 y a escala 1:45. El número medio de partículas medidas en cada fotografía de superficie fue de 87 (el mismo número que en la medición directa con la retícula), mientras que el número de partículas medidas en fotografía remota fue de 60.



Figura 5. Imagen de la barra a escala 1:45 (método fotográfico remoto).
Figure 5. Gravel bar at 1:45 scale (remote photography method).

4. Resultados y discusión

A partir de los datos de campo obtenidos mediante métodos directos (retícula) e indirectos (fotografía de superficie y remota) se ha evaluado el grado de fiabilidad del método fotográfico para la caracterización granulométrica y de la rugosidad del lecho del río.

4.1. Ajuste granulométrico entre la retícula y la fotografía de superficie

Los datos granulométricos han permitido la construcción de curvas granulométricas y la estimación de los principales percentiles en cada una de las secciones de estudio (Tabla 1 y Fig. 6). Las curvas granulométricas obtenidas a partir de 1305 datos mediante los dos métodos son muy parecidas visualmente y presentan valores similares para todos los percentiles característicos (Tabla 2).

A partir del D_{10} de las distribuciones, el 100% de los valores estimados mediante fotografía se sitúan entre 0,5 y 2 veces los valores medidos en el campo (Fig. 7). Para percentiles inferiores a 10, el porcentaje de valores estimados (fotografía) situados entre 0,5 y 2 veces los observados (retícula) está entre el 80 y el 90%. El grado de ajuste de las distribuciones por percentiles se ha estudiado, asi-

mismo, mediante un análisis de sensibilidad a partir de la ecuación de Nearing *et al.* (1989)

$$S = [(O_2 - O_1) / O_{1,2}] / [(I_2 - I_1) / I_{1,2}]$$

donde S es el parámetro de sensibilidad, O_1 es el valor del percentil inferior mediante la fotografía, O_2 es el valor del percentil superior mediante la fotografía, $O_{1,2}$ es el valor medio entre O_1 y O_2 , I_1 es el valor del percentil inferior a partir de la retícula, I_2 es el valor del percentil superior a partir de la retícula, e $I_{1,2}$ es el valor medio entre I_1 e I_2 . Valores medios de S muy cercanos a 1, como el calculado para la comparación entre el método directo y el de fotografía de superficie ($S = 0,94$), indican un incremento muy similar de las dos distribuciones de valores, con una ligera desviación entre percentiles.

Finalmente, el grado de correlación entre las distribuciones de valores obtenidas mediante los dos métodos propuestos se ha analizado mediante un análisis de regresión. Según Adams (1979), si todos los demás factores tales como la orientación y forma permanecen constante, el calibre correspondiente a los distintos percentiles de dos muestras tomadas por métodos diferentes debería estar relacionado por una función estadística del tipo $y = a + bx$. En el caso de la Ribera Salada, las dos series de valores están relacionadas estadísticamente de manera significativa ($N=15$, $p < 0,01$) (Tabla 3, Fig. 8). Los valores

Tabla 1. Valores granulométricos de las secciones de estudio a partir de retícula y de fotografía de superficie (1:10) con truncamiento en 8 mm (arriba), y a partir retícula y de fotografía remota (1:45) con truncamiento en 45 mm (abajo).

Table 1. Selected values of grain-size distributions estimated from sampling grid and surface photography (1:10) truncated at 8 mm, and from sampling grid and remote photography (1:45) truncated at 45 mm.

	PC ^{1*}		PC ²		MI ¹		MI ²		TE ¹		TE ²		KM ¹		KM ²															
D ₅	40	27	23	23	36	33	16	26	14	17	38	32	38	31	31	27	14	24	26	23	23	23	20	17	40	36	19	22	16	17
D ₁₆	44	37	33	32	31	30	34	30	17	26	33	32	60	43	44	37	17	27	37	37	32	34	27	23	30	30	23	23	23	23
D ₅₀	76	71	72	62	102	89	32	43	37	37	98	90	118	103	73	67	32	38	77	73	63	62	49	47	78	73	33	30	33	46
D ₈₄	138	133	142	127	173	181	84	87	133	134	213	176	204	181	130	124	61	63	190	197	143	124	81	83	146	133	103	91	111	103
D ₉₅	188	191	197	163	276	292	114	130	209	193	313	290	310	299	163	138	84	89	304	308	238	188	111	123	234	197	132	136	132	143

	PC ^{1*}		MI ¹		TE ¹		TE ²					
D ₅	43	43	47	47	30	30	32	31	30	30	46	46
D ₁₆	33	34	64	37	60	60	73	66	60	60	36	33
D ₅₀	33	70	108	92	93	98	121	129	97	96	34	73
D ₈₄	143	123	181	197	163	139	209	264	217	216	173	143
D ₉₅	194	209	280	304	233	223	309	331	317	317	236	270

^{1*} Calibre del eje b en estado
^{2*} Localización (Figura 1) PC (Pob del Clog), MI (Mol del lagja), TE (Terrassola), KM (Kab 13)
^{1*} Retícula
^{2*} Fotografía de superficie
^{3*} Fotografía remota

Tabla 2. Valores medios de los percentiles más característicos con cada uno de los métodos de muestreo.
 Table 2. Mean characteristic values estimated from each sampling method.

	Valores medios ¹ con retícula		Valores medios ¹ con fotografía	
	N=15 ²	N=6 ³	de superficie ²	remota ³
D ₅	21	50	25	49
D ₁₆	34	60	34	57
D ₅₀	67	100	64	91
D ₈₄	140	187	130	179
D ₉₅	214	298	197	295

¹ valores de eje b en estado
² con truncamiento en 8 mm
³ con truncamiento en 45 mm

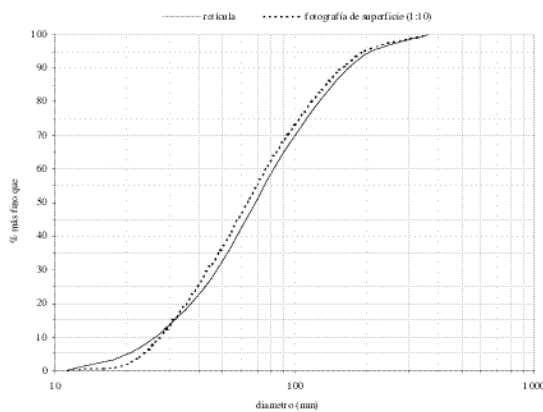


Figura 6. Curvas granulométricas para el conjunto de las secciones analizadas en la Ribera Salada mediante retícula y fotografía de superficie con truncamiento en 8 mm.
 Figure 6. Grain-size curves for the overall Ribera Salada experimental sites by means of sampling grid and surface photography with truncation at 8 mm.

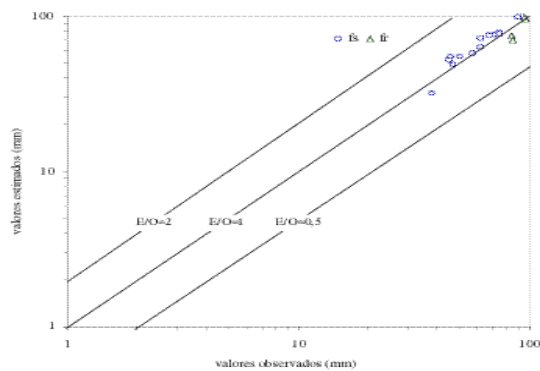


Figura 7. Relación entre valores Observados (retícula) y valores Estimados (fotografía de superficie, fs, y remota, fr) del percentil 50 (D₅₀) de la distribución granulométrica con truncamiento en 8 mm y 45 mm respectivamente, del lecho de la Ribera Salada.
 Figure 7. Relation between Observed D₅₀ (sampling grid) and Estimated D₅₀ (surface, fs, and remote photography, fr) of the Ribera Salada's river-bed, with truncation at 8 mm and 45 mm respectively.

Tabla 3. Parámetros de las rectas de regresión ($Dx(r) = a + bDx(f)$) entre granulometrías mediante retícula y fotografía de superficie.
 Table 3. Regression coefficients ($Dx(r) = a + bDx(f)$) for the relations between sampling grid and surface photography grain-size distributions.

	Constante (a)	Pendiente (b)	Correlación (r^2)
D_5	-8,3	1,32	0,74
D_{16}	-10,4	1,30	0,86
D_{50}	-5,9	1,17	0,96
D_{84}	-3,9	1,09	0,93
D_{95}	-7,9	1,01	0,91

medios (D_{50}) de las granulometrías son los que presentan un mayor grado de correlación ($r^2=0,96$) entre el método directo (retícula) e indirecto (fotografía de superficie), siendo la ecuación resultante,

$$D_{50(r)} = 1,17D_{50(fs)} - 5,9$$

donde $D_{50(r)}$ es el valor medio de las muestras con retícula (reales) y $D_{50(fs)}$ es el valor medio de las muestras con fotografía de superficie. La pendiente de la ecuación es superior a 1 indicando una subestimación del método fotográfico con respecto a las mediciones efectuadas directamente con la retícula para materiales superiores a 34 mm ($y = x$ en la ecuación).

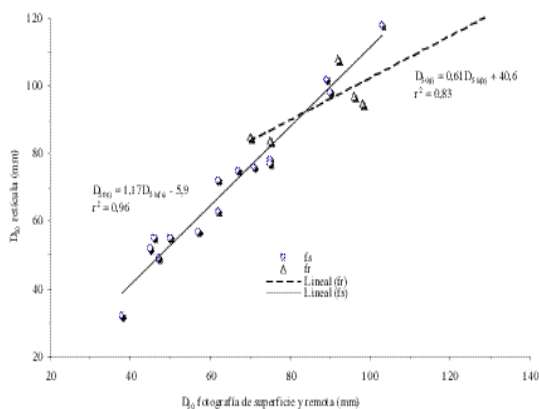


Figura 8. Relación entre el material medio (D_{50}) del lecho del río a partir de mediciones con retícula (r), con fotografía de superficie (fs, truncamiento en 8 mm) y con fotografía remota (fr, truncamiento en 45 mm), en todas las secciones de muestreo.
 Figure 8. Relation between mean particle size of the river-bed (D_{50}) derived from sampling grid (r), surface photography (fs, with truncation at 8 mm) and remote photography (fr, with truncation at 45 mm), for all monitored river sections.

El nivel de correlación entre ambos métodos es menor para los percentiles más pequeños ($r^2=0,74$ para D_5) y se va incrementando para los percentiles mayores ($r^2 > 0,90$ a partir de D_{50}) (Tabla 3).

4.2. Ajuste granulométrico entre la retícula y la fotografía remota

Los datos de campo (retícula) y de gabinete (fotografía remota) han permitido la construcción de las curvas granulométricas para cada método (Fig. 9) y la estimación de los principales percentiles (Tablas 1 y 2) para el conjunto de las secciones fluviales analizadas ($N=360$). Las curvas granulométricas obtenidas mediante los dos métodos presentan una curvatura similar, pero a diferencia de la fotografía de superficie, los valores presentan mayores desviaciones, especialmente para los percentiles centrales alrededor del D_{50} .

El grado de ajuste de las distribuciones se ha analizado igualmente a través del indicador de sensibilidad (S) de Nearing *et al.* (1989). El valor de S entre las dos distribuciones es igual a 0,99, lo que indica un crecimiento de las mismas casi paralelo. Asimismo, cabe señalar que los valores estimados mediante fotografía remota se sitúan entre 0,5 y 2 veces los valores medidos en el campo para todos los percentiles ($D_5, D_{16}, D_{50}, D_{84}$ y D_{95}) (Fig. 7).

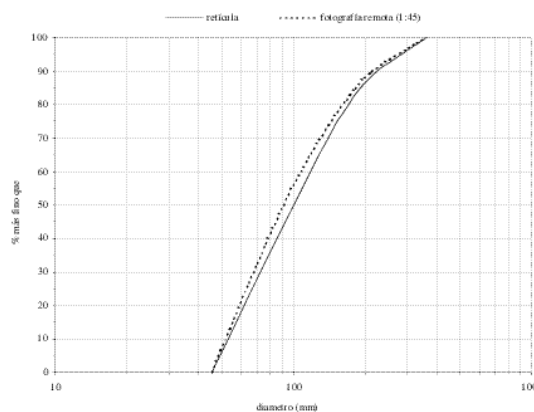


Figura 9. Curvas granulométricas para el conjunto de las secciones analizadas en la Ribera Salada mediante retícula y fotografía remota con truncamiento en 45 mm.
 Figure 9. Grain-size curves for the overall Ribera Salada experimental sites by means of sampling grid and remote photography with truncation at 45 mm.

Ambos análisis sugieren, no obstante, un alto grado de bondad del método de la fotografía remota para reproducir tanto la forma de la curva granulométrica real, como para aproximarse a los valores reales medidos directamente en el campo.

Las series de valores granulométricos de la Ribera Salada obtenidos a partir de retícula y a partir de fotografía remota están relacionadas estadísticamente de manera significativa ($N=6$, $p<0,01$) (Fig. 8) para todos los calibres, siendo las ecuaciones para el valor central de la distribución (D_{50}),

$$D_{50(r)} = 0,61D_{50(fr)} + 40,6 \quad (r^2=0,83)$$

donde $D_{50(r)}$ es el valor medio de las muestras con retícula (reales) y $D_{50(fr)}$ es el valor medio de las muestras con fotografía de superficie. La pendiente inferior a 1 indicaría que el método fotográfico sobrestima los valores reales obtenidos mediante retícula. No obstante, el valor de constante tan elevado modifica el comportamiento predictivo de la ecuación: a) para valores de D_{50} inferiores a 104 mm ($y = x$ en la ecuación), el método fotográfico subestima los valores reales y b) a partir de 104 mm, la fotografía sobrestima los valores reales obtenidos con retícula.

4.3. Niveles de error asociados a la escala de la fotografía

Partiendo de una máxima precisión visual alcanzable por el ojo humano de 1 mm sobre la imagen, en una fotografía a escala 1:10, 1 mm representaría 10 mm en la realidad, y en una escala 1:45 representarían 45 mm reales. Por lo tanto, *a priori*, el método fotográfico de superficie debería ser capaz de medir de manera fiable a partir de partículas de 10 mm, calibre que concuerda con el límite inferior generalmente aceptado para los métodos de conteo (Wolman 1954, Kellerhals y Bray 1971).

El método fotográfico remoto no puede apreciar partículas menores de 45 mm, con lo que el error asociado al tamaño de la partícula es importante. Para analizar este aspecto se han comparado las curvas granulométricas a partir de retícula y a partir de fotografía remota sin realizar ningún truncamiento (Fig. 10).

El error por sobreestimación del método de fotografía remota es de 130% para partículas inferiores a 21 mm (D_{ϕ}) y de 67% para partículas entre 21 y 34

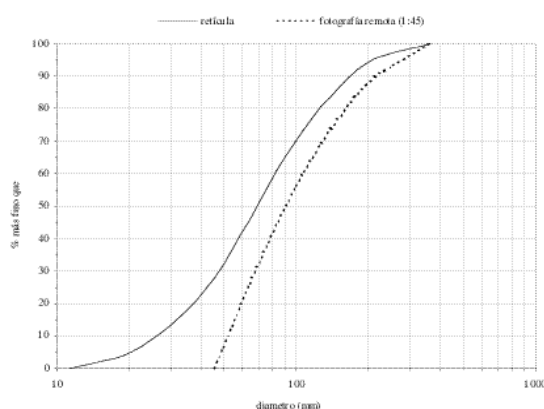


Figura 10. Curvas granulométricas para el conjunto de las secciones analizadas en la Ribera Salada mediante retícula y fotografía remota sin truncamiento.

Figure 10. Grain-size curves for the overall Ribera Salada experimental sites by means of sampling grid and surface photography without truncation.

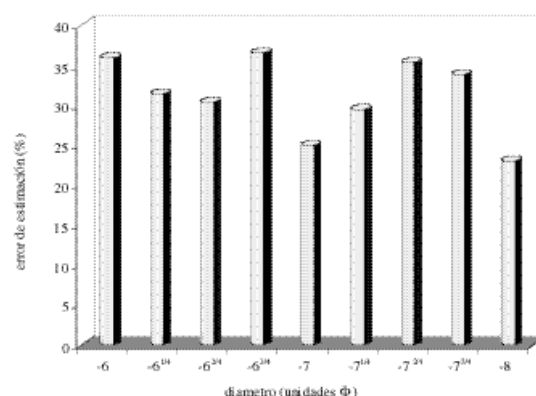


Figura 11. Errores asociados a la medición de gravas y cantos con el método fotográfico remoto ($f_x = -\log_2 D_x$).

Figure 11. Errors associated with remote photography measuring gravels and cobbles ($f_x = -\log_2 D_x$).

mm (D_{16}). Para partículas a partir de 67 mm (D_{50}) la desviación por sobrestimación disminuye hasta el 36%, encontrándose la menor desviación (28%) para el calibre 140 mm (D_{84}). Para tamaños superiores el error vuelve a aumentar ligeramente (35% para D_{95}). La figura 11 ilustra el porcentaje de error por sobrestimación para calibres característicos en intervalos de $\frac{1}{4}$. Los errores se deben en parte a la imbricación de las partículas y a las sombras entre ellas, factores que impiden ver la partícula completa y sus límites en la fotografía, tal y como ya expresaron autores como Adams (1979) y Ibbeken & Schleyer (1986).

4.4. Estimación de la rugosidad del cauce a partir de la fotografía

Uno de los factores básicos que controla la velocidad con la que discurre el agua por un río es la rugosidad del cauce. La rugosidad de partícula se estima generalmente a partir de los percentiles medios y superiores de la distribución granulométrica (D_{50} , D_{84} , D_{90}) por lo que, teniendo en cuenta que las mayores desviaciones entre los métodos propuestos se producen para percentiles inferiores, el cálculo de la rugosidad se plantea, de entrada, como fiable a partir de las imágenes fotográficas, especialmente en ríos con lecho de gravas.

El parámetro de rugosidad forma parte de las ecuaciones de resistencia al flujo para el cálculo de la velocidad (e.g. Manning, 1891) y se estima a partir de tablas o mediante ecuaciones como las de Strickler (1923)⁴ y Meyer-Peter y Müller (1948)⁵. En el caso de la Ribera Salada se han calculado los valores de n a partir de los datos granulométricos obtenidos a partir de la retícula. Según la fórmula de Strickler, el valor medio de n es de 0,031, mientras que a partir de la ecuación de Meyer-Peter y Müller, n tiene un valor medio de 0,029. Estos datos obtenidos coinciden con los resultados del trabajo de Alisedo (1999). Se trata de valores que, según las tablas, corresponden a canales naturales limpios, de gravas y cantos. De la misma manera, se ha estimado el valor de n a partir de los datos granulométricos obtenidos con los dos métodos fotográficos. La comparación de éstos con los datos directos mediante retícula ofrece una desviación de 0,002 en unidades n lo que significa un error medio del 6% tanto para la n estimada con la fórmula de Meyer-Peter y Müller como con la de Strickler. Este hecho pone de manifiesto que la baja correlación entre el método de la retícula y el de la fotografía remota para diámetros inferiores 45 mm (D_{25} en la distribución real) no influye en el cálculo de la rugosidad, debido a que las fórmulas empleadas elevan los diámetros a un exponente muy bajo (1/6), minimizando las posibles diferencias entre métodos. Ambas técnicas son aplicables, por tanto, para la estimación de la rugosidad y su aplicación en ecuaciones de resistencia al flujo.

⁴ Strickler: $n = (D_{50}^{-1/6})/21,1$ donde D_{50} en m.

⁵ Meyer-Peter & Müller: $n = (D_{90}^{-1/6})/26$ donde D_{90} en m.

5. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son básicamente de tipo técnico y se resumen como sigue:

- 1) El método fotográfico de superficie (1:10) es aplicable para la obtención de curvas granulométricas en ríos con lecho de gravas, siendo muy fiable a partir de valores de 10 mm de eje b de partícula y para todos los percentiles de la distribución. El ajuste entre método de retícula y el de fotografía de superficie es del 95%, con un error medio por subestimación del 5%.
- 2) El método fotográfico remoto (1:45) es aplicable de manera fiable para la obtención de curvas granulométricas en ríos con lecho de gravas a partir de calibres mayores de 45 mm de eje b de partícula lo que significa, en el caso de la Ribera Salada, el percentil 25 de la distribución (D_{25}). Entre D_{25} y D_{100} en distribuciones con truncamiento en 45 mm el ajuste es también del 95%, con un error medio del 5% por subestimación. El error se incrementa (hasta una media del 30% por sobrestimación) a partir de 64 mm si no se realiza truncamiento de las muestras tomadas con retícula en el campo.
- 3) Los métodos fotográficos son aplicables en la estimación del parámetro de rugosidad debido a las partículas del cauce (n) en ecuaciones de resistencia al flujo, con un ajuste del 95% con relación al método directo (retícula).

Los resultados de este trabajo amplían y corroboran las conclusiones de trabajos anteriores (e.g. Adams 1979, Ibbeken y Schleyer 1986) sobre la fiabilidad de la fotografía para la estimación de la granulometría en ríos con lecho de gravas. El trabajo aporta una nueva base de datos que ejemplifica las posibilidades de uso de esta técnica con relación a otras de medición directa más costosas, como el conteo mediante retícula o a través de transectos. La precisión de la fotografía como técnica de estimación granulométrica debería, no obstante, ser ampliada con más estudios, tanto en medios similares (ríos con lecho de gravas y materiales redondeados) como en contextos fluviales distintos (ríos con lechos de granulometría poco uniforme y materiales de formas diversas).

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a una beca de la *Fundació Catalana per la Recerca*. Los autores agradecen la disposición de medios materiales y la ayuda del equipo del Área de Hidrología del *Centre Tecnològic Forestal de Catalunya* y de la *Universitat de Lleida*, el soporte y asesoramiento técnico de Peter Ergenzinger de la Freie Universität Berlin, y la revisión del trabajo por parte de Celso García de la Universitat de les Illes Balears, de Arsenio Muñoz de la Universidad de Zaragoza y de Alfonso Sopena de la Universidad Complutense de Madrid.

Referencias bibliográficas

- Adams, J. (1979). Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division*, 10, 1247-1255.
- Alisedo, O. (1999). *Caracterización del material del lecho, la geometría hidráulica y la carga de fondo de la Ribera Salada*. Tesis de licenciatura (inérita), Universitat de Lleida, 92 p. y anexos.
- Church, M.A., Mclean, D.G. & Wolcott, J.F. (1987). River-bed gravels: sampling and analysis. En: *Sediment transport in gravel-bed rivers* (C.R. Thorne, J.C. Bathurst & R.D. Hey, eds.). John Wiley & Sons, 43-88.
- De Jong, C. (1995). *Temporal and spatial interactions between river bed roughness, geometry, bedload transport and flow hydraulics in mountain streams*. Tesis doctoral, Freie Univesität Berlin, 229 pp.
- Diplas, P. & Sutherland, A.J. (1988). Sampling techniques for gravel sized sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 484-451.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-6.
- Friedman, G.M. (1958). Determination of sieve-size distribution from thin-section data from sedimentary petrology studies. *Journal of Geology*, 66, 394-416.
- García, C. (1994). Métodos para la caracterización granulométrica en ríos de gravas. *Notes de Geografia Física*, 23, 5-16.
- Ibbsen, H. & Schleyer, R. (1986). Photo-sieving: a method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11, 59-77.
- Kellerhals, R. & Bray, D.I. (1971). Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of Hydraulics Division*, 97, 1165-1179.
- Krumbein, W. (1934). Size frequency of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 4, 65-77.
- Manning, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes. *Trans. Inst. Civ. Eng. Ireland*, 20, 161-207.
- Meyer-Peter, E. & Müller R. (1948). Formulas for bedload transport. *Int. Ass. Hydraulic Structures Res.* 2nd meeting, Stockholm (7-9 June, 1948), App. 2, 39-64.
- Nearing, M.A., Ascough, L.D. & Chaves, H.M.L. (1989). WEPP model sensitivity analysis. En: *USDA- Water Erosion Prediction Project (WEPP): Hillslope profile version. Profile model documentation* (L.J. Lane & M.A. Nearing, eds.). West Lafayette, USDAARS, 14.1-14.33.
- Strickler, A. (1923). Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Strome, Kanäle und Geschlossene Leitungen. *Mitteilungen des Eidgenössischer Amtes für Wasserwirtschaft*, Bern, Switzerland, 16 pp.
- Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse bed-material. *American Geophys. Union Trans.*, 35, 951-956.

Recibido 24 de Marzo de 2003.

Aceptado 9 de Junio de 2003.