

# EXPORTACIÓN DE SEDIMENTOS DURANTE EVENTOS DE LLUVIA: INFLUENCIA DE REGUEROS Y CÁRCAVAS EFÍMERAS

## Sediment Export during Rainfall Runoff Events: Influence of Rills and Ephemeral Gullies

M. L. Rodríguez-Blanco<sup>1</sup>, M. M. Taboada-Castro<sup>1‡</sup>, L. Palleiro-Suárez<sup>1</sup>,  
M. T. Taboada-Castro<sup>1</sup> y J. L. Oropeza-Mota<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se estudiaron las principales fuentes de sedimentos en suspensión originados durante siete eventos pluviométricos en una pequeña cuenca fluvial de uso agroforestal, situada en el NO de España. Para ello, se analizaron los fenómenos de histéresis derivados de la relación concentración de sedimentos en suspensión y caudal, medidos ambos en la salida de la cuenca. Se inspeccionó visualmente la cuenca con el fin de obtener información directa de las fuentes de sedimentos. Los eventos estudiados se produjeron en otoño, periodo durante el cual algunas parcelas de la cuenca se encontraban desprovistas de vegetación. La mayor parte de los eventos produjeron fenómenos de histéresis positivos, es decir, el pico de sedimentos se produce antes o junto con el pico de caudal. La inspección visual de la cuenca permite concluir que, durante el periodo de estudio, la principal fuente de sedimentos en suspensión corresponde a regueros o canalillos y cárcavas efímeras formadas en la cabecera de la cuenca, en una parcela limítrofe con el arroyo, que se halla desprovista de vegetación.

**Palabras clave:** lluvia, pico de sedimentos, pico de caudal, erosión, suelo desprotegido.

### SUMMARY

This work attempts to identify the source of suspended sediment caused by seven rainfall events in a small river basin located in NW of Spain used sediment agroforestry. Water discharge and suspended sediment

concentrations were measured during these rainfall events at the catchment outlet and hysteretic loops of the relationship suspended sediment concentration versus discharge were established. In addition, within the catchment regular surveys were conducted in order to obtain data on the suspended sediment sources. The events studied occurred in autumn, a period during which some plots of the basin were without vegetation. In most of the events clockwise hysteresis loops were described, the sediment peaks occurred prior to or with peaks discharge. Field observations indicated that sediment discharged from the rills and ephemeral gullies, formed in a bare field located in the head of the catchment, represents the most important source of suspended sediment in this catchment during the study period.

**Index words:** rainfall, sediment peak, peak discharge, erosion, bare soil.

### INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos en suspensión constituye el mecanismo de mayor importancia en la transferencia de materiales por los cursos fluviales. La carga de sedimentos transportada por un río o arroyo comúnmente representa una mezcla de sedimentos derivados de diferentes lugares y de distintos tipos de fuentes dentro de la cuenca contribuyente. Por ejemplo, un área relativamente pequeña de la cuenca con un determinado uso del suelo, puede contribuir a la mayor parte de la carga de sedimentos en suspensión en la salida de la cuenca. En algunas cuencas, la erosión laminar y en surcos o regueros domina el aporte de sedimentos, mientras que en otras, la erosión en cárcavas representa la fuente primaria. La información sobre el área fuente de sedimentos es de suma importancia para entender la dinámica de los sedimentos en suspensión y el balance de sedimentos de una cuenca (Trimble, 1983; Walling *et al.*, 2001; Walling *et al.*, 2002), para mejorar la interpretación y modelación de la producción de sedimentos en suspensión (Summer *et al.*, 1996) y para

<sup>1</sup> Universidad de A Coruña, Facultad de Ciencias. A. Zapateira. 15071 La Coruña, España.

<sup>‡</sup> Autor responsable (mtaboada@udc.es)

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

diseñar e implantar estrategias de manejo encaminadas a controlar los problemas ambientales asociados a la exportación de sedimentos (USEPA, 1999; Warren *et al.*, 2003; Evans y Gibson, 2006; Gardner y Kjerfve, 2006.).

Existen diversas técnicas para medir o inferir la procedencia de la carga de sedimentos en suspensión (Brazier, 2004; Collins y Walling, 2004). Entre ellas se han utilizado los fenómenos de histéresis resultantes de la relación concentración de sedimentos en suspensión con el caudal (diCenzo y Luk, 1997; Regües *et al.*, 2000). Por ejemplo Klein (1984) atribuye las curvas de histéresis negativas, es decir, las que siguen una dirección en contra de las agujas del reloj, al suministro de sedimentos del canal. Por el contrario, Bogen (1980) identificó fenómenos de histéresis positivos o siguiendo la dirección de las agujas del reloj, con la resuspensión de sedimentos del canal durante el limbo de ascenso de los hidrogramas. Además de ésta interpretación existen otras explicaciones para los fenómenos positivos, como las que consideran el agotamiento de sedimentos desde fuentes superficiales o subsuperficiales (Carling, 1983) y la reducción del desprendimiento de partículas del suelo debido al cese de las lluvias efectivas (Novotny, 1980). Por tanto, es posible explicar fenómenos similares de histéresis en términos de suministro de sedimentos, bien de fuentes superficiales o del canal, lo que hace necesario contar con información adicional para verificar la procedencia de los sedimentos (Peart y Walling, 1988). Está claro que en muchos casos, diversas combinaciones de procesos conducen a relaciones similares de concentración-caudal en la salida de la cuenca. Por tanto, los fenómenos de histéresis deben ser interpretados con información complementaria sobre la producción y el transporte de sedimentos con el fin de conocer la contribución de fuentes individuales al flujo de sedimentos medidos en la salida de la cuenca. Entre los diferentes métodos existentes, las observaciones de campo se presentan como un complemento útil para documentar fuentes de sedimentos en suspensión en cuencas (Steege *et al.*, 2000).

Este trabajo presenta un análisis del caudal (Q) y de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) para la cuenca del río Corbeira (aproximadamente 16 km<sup>2</sup>) en el noroeste de España. Los datos de caudal y concentración de sedimentos en suspensión, son examinados para siete eventos de lluvia producidos durante el otoño de 2005, con el propósito de documentar la cantidad y procedencia de sedimentos en suspensión

del río. En la cuenca se efectuaron observaciones visuales después de cada evento de lluvia con el fin de detectar áreas de erosión y confirmar la relación entre fuentes de sedimentos y la red del arroyo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

La cuenca del río Corbeira se localiza (coordenadas UTM: 562658 N, 4785332 O) en la parte alta de la cuenca del río Mero, aproximadamente a 20 km de la ciudad de La Coruña (NO España). La roca madre es esquisto perteneciente a la unidad denominada Complejo de Órdenes, el cual abarca un amplio sector de la región de Galicia. El clima de la región, de acuerdo con la clasificación agroecológica de la FAO es templado sub-tropical con inviernos húmedos. La precipitación media anual es de 1180 mm, concentrada básicamente en otoño e invierno. La temperatura media anual es de 13 °C. El arroyo Corbeira drena alrededor de 16 km<sup>2</sup> de una cuenca de cabecera, cuya altitud varía entre 60-474 m y la pendiente media es del 20%. La mayor parte de la cuenca es forestal (65%) con predominio de pinos y eucaliptos. La superficie agrícola útil representa el 30%, predominando las praderas, pastos y maíz, y en menor medida cereal de invierno, patatas y extensiones muy pequeñas de cultivos hortícolas. Aunque la mayor parte de la cuenca tiene una buena cubierta vegetal durante todo el año, algunas parcelas permanecen sin vegetación después de la recolección del maíz. El sistema de labranza del suelo es tradicional, lo que conlleva un laboreo primario, generalmente con arado de vertedera, seguido por labores de desmenuzamiento y mullido del suelo. La textura del suelo es limosa y franco-limosa. La precipitación registrada en la cuenca durante el año 2005 ascendió a 1042 mm. El 50.6% de la precipitación anual se registró entre octubre y diciembre, situándose el periodo de estudio en la época más húmeda de este año.

### Equipo y Métodos

En la salida de la cuenca se midió el nivel de agua en continuo usando un sensor de presión acoplado a un equipo colector de muestras de agua automático (ISCO modelo 6712FS). El nivel se transformó en caudal mediante la calibración de una curva de gasto. El colector de muestras se programó para comenzar el muestreo

cuando se excede el umbral del nivel de agua. Este umbral fue variable a lo largo del periodo de estudio, pues la operación de muestreo se modificó manualmente con el fin de seguir adecuadamente la evolución temporal del evento, de modo que permitiese tomar muestras durante el ascenso, el pico y el descenso del limbo del hidrograma. El tiempo de la colecta de muestras fue variable y se considera representativo del transporte de sedimentos durante los eventos estudiados. La concentración de sedimentos en suspensión (CSS) se determinó por gravimetría. Las muestras de agua se filtraron al vacío a través de un filtro de  $0.45 \mu\text{m}$  y el residuo se secó a  $105^\circ\text{C}$  durante 24 h. Posteriormente se pesó el residuo para obtener la CSS ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

La producción de sedimentos en la cuenca ( $\text{Mg km}^{-2}$ ) se calculó multiplicando los datos de caudal por la concentración de sólidos en suspensión, dividiendo este producto por la superficie total. Cuando se observó la formación de surcos y cárcavas dentro de la cuenca, se estimó el volumen de suelo erosionado, así como los depósitos de sedimentos. El volumen se transformó en peso considerando una densidad aparente de  $1500 \text{ kg m}^{-3}$ . Se tomó este valor por ser el que presentan otros suelos sobre esquistos del Complejo de Órdenes próximos a la zona de estudio, tal como encontró Valcárcel *et al.* (2003).

Las curvas de histéresis resultan de graficar CSS contra  $Q$  para eventos de lluvia individuales y la interpretación de las mismas se realizó de acuerdo a los criterios de Williams (1989).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de sedimentos en suspensión, el caudal y la lluvia fueron medidos durante 7 eventos de lluvia producidos en el otoño de 2005, cuyas características se resumen en el Cuadro 1. Se obtuvieron datos de los eventos completos. Se muestreó el ascenso, pico y descenso del caudal.

Los resultados muestran una gran diferencia entre sedimentos en suspensión transportados durante cada evento y entre eventos. La concentración máxima de sedimentos varió entre 44 y  $626 \text{ mg L}^{-1}$ . El primer valor correspondió al evento 25-28 noviembre y el segundo al evento 1-3 diciembre. La producción de sedimentos osciló entre  $0.036$  y  $1.3 \text{ Mg km}^{-2}$ , originándose el valor máximo en el evento 1-3 diciembre 2005 que fue el de mayor caudal del periodo de observación (Cuadro 1). La elevada humedad antecedente causada por

los eventos previos ( $105.8 \text{ mm}$  en los 21 días anteriores), junto con una elevada concentración en la distribución de las lluvias, podría explicar el caudal máximo alcanzado durante este evento, originado con cantidades de lluvia similares a las de eventos anteriores.

El evento 19-20 octubre, generado con una alta precipitación, ocasionó una baja concentración de SS mientras que el siguiente evento (31 de octubre 1 de noviembre), con sólo  $0.8 \text{ cm}$  de precipitación, alcanzó CSSs similares ( $131 \text{ mg L}^{-1}$ ), probablemente debido al elevado estado de humedad del suelo al comienzo del evento (la lluvia de los 5 días anteriores fue de  $6.1 \text{ cm}$ ). El evento 2-3 noviembre, producido un día después del mencionado anteriormente, alcanzó valores muy altos de CSS (CSSmax  $474 \text{ mg L}^{-1}$ ) y de producción de SS ( $0.56 \text{ Mg km}^{-2}$  considerando la superficie total o  $1.87 \text{ Mg km}^{-2}$  atendiendo exclusivamente al área agrícola). Hay una alta precipitación ( $5.1 \text{ cm}$ ) y elevada humedad antecedente ( $7.8 \text{ cm}$  en 5 días). La inspección visual de la cuenca, realizada con especial atención en las zonas agrícolas, por ser estas áreas particularmente sensibles a la erosión durante el otoño (Valcárcel *et al.*, 2003; Taboada *et al.*, 2008), permitió identificar durante este evento la formación de surcos y cárcavas efímeras (Figura 1) en una parcela de fuerte pendiente (del orden del 20% en el 85% de su superficie y superior al 25% en el 10% de la parcela), adyacente al arroyo, situada en la cabecera de la cuenca. La formación de los surcos y cárcavas tuvo lugar después de la recolección del maíz, cuando la infiltración del agua de lluvia se encontraba dificultada a causa del encostrado superficial, datos acorde a los estudios realizados por Valcárcel *et al.* (2003) y Taboada *et al.* (2008). Dichos rasgos de erosión se agrandaron durante el evento acaecido entre el 1 y 3 de diciembre, y se produjeron otros nuevos. Para cada uno de estos eventos, se calcularon las tasas de erosión y deposición dentro de la parcela, así como, la cantidad de sedimentos aportados al curso de agua. Los resultados mostraron que los regueros y cárcavas efímeras causaron una gran influencia sobre los sedimentos en suspensión exportados durante ambos eventos. Así, el evento 2-3 noviembre exportó  $9 \text{ Mg}$  de sedimentos en suspensión, de las cuales  $8.3 \text{ Mg}$  proceden de los canales de erosión (regueros y cárcavas) mientras que en el evento 1-3 diciembre, la aportación de sedimentos al arroyo debida a este tipo de canales se cifró en  $14.95 \text{ Mg}$  y la exportación de materiales en suspensión en  $20.98 \text{ Mg}$ . La diferencia existente entre estos dos últimos datos sugiere un aporte adicional de sedimentos.

**Cuadro 1. Datos hidrológicos y sedimentológicos de los eventos.**

Fecha del evento	Lluvia	Pico de caudal instantáneo	Rango de concentración de sedimentos en suspensión	Rango de sedimentos en suspensión
	cm	L s <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	Mg km <sup>-2</sup>
19-20 octubre	4.7	370	1-111	0.051
31 octubre-1 noviembre	0.8	350	3-131	0.036
2-3 noviembre	5.1	650	14-474	0.56
8-10 noviembre	3.1	380	4-88	0.08
12-14 noviembre	4.3	470	8-78	0.05
25-28 noviembre	4.7	360	9-44	0.14
1-3 diciembre	4.5	1120	14-626	1.3

Las observaciones visuales, permitieron comprobar cómo en algunas parcelas con escasa cubierta vegetal debido a la siembra reciente del cereal de invierno, se formaba escorrentía superficial que transportaba rápidamente los sedimentos hacia el arroyo a través de las cunetas. Además, las fuertes lluvias de este evento (1-3 diciembre) arrastraron hacia el arroyo sedimentos depositados en praderas limítrofes a los terrenos de cultivo.

La producción de sedimentos asociada con estos dos eventos (Cuadro 1) refleja que la parcela, fue particularmente susceptible a la escorrentía y erosión en estas condiciones. Estos resultados ponen de manifiesto como un pequeño número de eventos, unido a un determinado uso de la tierra (suelo agrícola

desprotegido) influyen en la erosión y exportación de sedimentos al cauce. Las observaciones de campo han evidenciado una escasa importancia de las zonas forestales y orillas del cauce como fuentes de sedimentos durante el periodo de estudio.

Con respecto a los eventos 8-10 noviembre, 12-14 noviembre y 25-28 noviembre, generados con precipitación similar a la de los eventos erosivos (2-3 noviembre y 1-3 de diciembre) exportaron pocos SS (Cuadro 1). Esto puede ser debido a la distribución de las precipitaciones, que en los primeros alcanzaron una mayor duración que en los del 2-3 noviembre y 1-3 de diciembre y, en consecuencia, no generaron erosión concentrada en la parcela desprovista de vegetación. Por este motivo, los sedimentos disponibles para ser



**Figura 1. Detalle de una cárcava efímera (izquierda) y depósito de sedimentos (derecha).**

transportados al cauce fueron menos cuantiosos que en los eventos más erosivos (2-3 noviembre y 1-3 de diciembre).

A pesar de la alta variabilidad que reflejan los eventos en términos de agua y producción de sedimentos, los hidrogramas mostraron formas similares, con ascensos rápidos y descensos prolongados hasta estabilizarse en un valor por encima del caudal anterior al del evento. La Figura 2 muestra dos ejemplos de hidrogramas y sedimentogramas observados en la cuenca del río Corbeira. Los sedimentogramas también presentan características similares, la concentración de sedimentos en suspensión se incrementa rápidamente con el caudal alcanzando el pico de concentración antes que el de caudal o bien con el de caudal. En ningún caso la CSS máxima se alcanza en la rama descendente del hidrograma, lo cual podría indicar que las fuentes de sedimentos se hallan próximas al arroyo. En la mayor parte de los casos, es decir, en cinco de los siete eventos, se obtuvieron fenómenos de histéresis positivos. Sólo en los eventos del 31 octubre-1 noviembre y

2-3 noviembre, en los cuales hubo lluvias al final del evento, se obtuvieron formas de ocho.

Las histéresis positivas se han interpretado de diversos modos. En algunos casos se relacionan con las condiciones del evento (Seeger *et al.*, 2004) y en otros con las fuentes de sedimentos (Klein, 1984; Lenzi y Marchi, 2000). Zabaleta (2007) en cuencas de clima templado húmedo, atribuye las histéresis positivas a la escasez de sedimentos disponibles cercanos al cauce del río para ser transportados, mientras que Soler *et al.* (2007) en cuencas de montaña del área mediterránea explica este comportamiento por la resuspensión de sedimentos depositados en el canal a causa del incremento del caudal.

En nuestro estudio, la histéresis positiva observada durante los eventos puede ser explicada por fuentes de sedimentos cercanas al arroyo. Las observaciones de campo permitieron visualizar cómo los surcos y cárcavas efímeras localizadas en la cabecera de la cuenca, en una parcela colindante con el arroyo, han contribuido significativamente a la exportación de sedimentos durante el periodo de estudio.

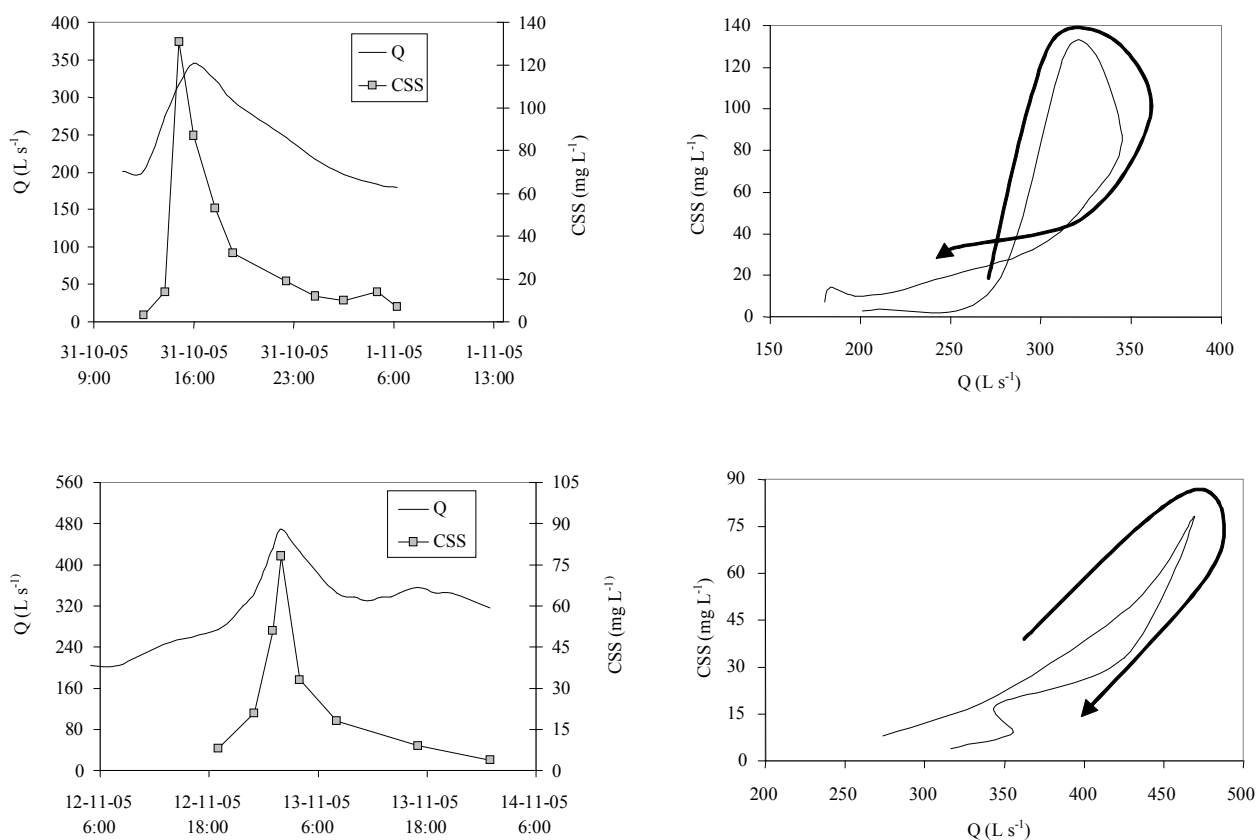


Figura 2. Hidrogramas, sedimentogramas y curvas de histéresis en forma de ocho y positivas.

## CONCLUSIONES

- Las observaciones de campo aportan información para identificar las áreas de la cuenca que experimentan erosión y permiten confirmar la relación entre fuentes y producción de sedimentos.
- Los fenómenos de histéresis positivos en los diagramas de la relación caudal-concentración de sedimentos en suspensión son los tipos más comunes en esta cuenca durante eventos de otoño. Sin embargo, cuando se produce un pico secundario de lluvia los fenómenos de histéresis en forma de ocho pueden ocurrir. Los surcos y cárcavas efímeras fueron importantes fuentes de sedimentos durante el periodo de estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte de los proyectos REN2003-08143 y PGIDIT05RAG10303PR, financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España y Xunta de Galicia, respectivamente. Igualmente se agradece al MEC la beca FPI otorgada a la primera autora.

## LITERATURA CITADA

- Bogen, J. 1980: The hysteresis effect of sediment transport systems. *Norsk Geografisk Tidsskrift. Norwegian J. Geog.* 34: 45-54.
- Brazier, R. 2004. Quantifying soil erosion by water in the UK: a review of monitoring and modelling approaches. *Prog. Phys. Geogr.* 28: 340-365.
- Carling, P. A. 1983: Particulate dynamics, dissolved and total load in two small basins, northern Pennines, UK. *Hydrol. Sci. J.* 28: 355-375.
- Collins, A. L. and D. E. Walling. 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Prog. Phys. Geogr.* 28: 159-196.
- diCenzo, P. and S. Luk. 1997. Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment, South China. *Catena* 29: 161-176.
- Evans, D. J. and C. E. Gibson. 2006. Sediment in the River Bush, Northern Ireland: Transport, Sources and Management Implications. pp. 101-111. *In: P. N. Owens and A. J. Collins (eds.). Soil erosion and sediment redistribution in River Catchments.* CABI. UK.
- Gardner, L. R. and B. Kjerfve. 2006. Tidal fluxes of nutrients and suspended sediments at the North Inlet/Winyah Bay National Estuarine Research Reserve. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 70: 682-692.
- Klein, M. 1984. Anti-clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment, Yorkshire, England. *Catena* 11: 251-257.
- Lenzi, M. A. and L. Marchi. 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39: 267-282.
- Novotny, V. 1980. Delivery of suspended sediment and pollutants from nonpoint sources during overland flow. *Water Resour. Res.* 16: 1057-1065.
- Peart, M. R. and D. E. Walling. 1988. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basins in Devon, UK: a comparative assessment. pp. 269-279. *In: M. P. Bordas and D. E. Walling (eds.). Sediment budgets.* International Association of Hydrological Sciences Publication N° 174. IAHS Press. Wallingford, UK.
- Regüés, D., J. C. Balasch, X. Castelltort, M. Soler y F. Gallart. 2000. Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallecebre, Pirineos Orientales). *Cuadernos Invest. Geogr.* 26: 41-65.
- Seeger, M., M. P. Errea, S. Beguería, J. Arnáez, C. Martí, and J. M. García-Ruiz. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *J. Hydrol.* 288: 299-311.
- Steege, A., G. Govers, J. Nachtergaele, I. Takken, L. Beuselinck, and J. Poesen. 2000. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology* 33: 25-36.
- Summer, W., E. Klaghofer, and K. Hintersteiner. 1996. Trends in soil erosion and sediment yield in the alpine basin of the Austrian Danube. pp. 473-479. *In: D. E. Walling and B. W. Webb (eds.). Erosion and sediment yield: global and regional perspectives.* International Association of Hydrological Sciences Publication No. 236. IAHS Press. Wallingford, UK.
- Taboada-Castro, M. M., M. L. Rodríguez-Blanco y M. T. Taboada-Castro. 2008. Escorrentía y erosión en suelos agrícolas del NO España: interacción entre prácticas agrícolas y condiciones climáticas. *Geo-Temas* 10: 109-112.
- Trimble, S. W. 1983. A sediment budget for Coon Creek basin in the Driftless Area, Wisconsin. *Am. J. Soil Sci.* 283: 454-474.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1999: Protocol for developing sediment TMDL's. Washington DC: Office of Water (4503F) United States Environmental Protection Agency, EPA 841-B-99-004.
- Valcárcel, M., M. T. Taboada, and J. Dafonte. 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena* 50: 199-216.
- Walling, D. E., A. L. Collins, H. M. Sickingabula, and G. J. L. Leeks. 2001. Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets: a Zambian example. *Land Degradation and Development* 12: 387-415.
- Walling, D. E., M. A. Russell, R. A., Hodgkinson, and Y. Zhang. 2002. Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK. *Catena* 47: 323-353.
- Warren, N., I. J. Allan, J. E. Carter, W. A. House, and A. Parker. 2003. Pesticides and other micro-organic contaminants in freshwater sedimentary environments-a review. *Appl. Geochem.* 18: 159-194.
- Williams, G. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111: 89-106.
- Zabaleta, A., M. Martínez, J. A. Uriarte, and I. Antigüedad. 2007. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena* 71: 179-190.