

Cubicación de cuñas de sedimentos mediante GPS de precisión y comparación de modelos digitales del terreno. Estimación de la erosión en la sierra de Ávila

Measurement of check dam sediment wedges by means of differential GPS and MDT to estimate erosion rates in *Sierra de Ávila*

Muñoz-Barco, M.A.¹; Mongil-Manso, J.^{1,3*}; Díaz-Gutiérrez, V.^{1,3}; Navarro-Hevia, J.^{2,3}

¹Grupo de Hidrología y Conservación de Aguas y Suelos, Universidad Católica de Ávila. Ávila, España

²Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid. España.

³Forest, Water and Soil Research Group

Autor para correspondencia: jorge.mongil@ucavila.es

Resumen

La determinación del volumen de sedimento almacenado en diques de retención es de gran interés para el cálculo de las tasas de erosión. En nuestro país se han realizado muchas restauraciones hidrológico-forestales con el fin de frenar la degradación que supone grandes pérdidas de suelo y genera graves problemas como la colmatación de embalses. Existen diferentes metodologías para calcular estos volúmenes de sedimento y determinar las tasas de erosión en sus cuencas. El presente trabajo propone una nueva metodología para la cubicación del sedimento retenido en diques, basada en el uso del GPS centimétrico y programas informáticos de tratamiento de datos espaciales, y en la comparación de los modelos digitales de terreno. La metodología se aplica a una muestra de diez diques ejecutados en 1964 por la Confederación Hidrográfica del Duero. También se calculan las tasas de erosión a partir del volumen de sedimento retenido y se comparan los resultados obtenidos con los que arroja el método geométrico del Prisma. Se puede concluir que el método propuesto es fiable y de gran precisión. Los valores estimados superan hasta en un 20% de media a los obtenidos por el método geométrico del Prisma. La exactitud obtenida por el método propuesto tiene interés en futuros estudios y proyectos de restauraciones hidrológico-forestales.

Palabras clave: cárcavas, conservación de suelos, dique, gavión, restauración forestal.

Abstract

Determining the volume of trapped sediment in retaining check dams is of great interest to estimate erosion rates. Many forest-hydrological restorations were carried out in our country to stop soil degradation because of great losses of soil, which generates serious problems such as reservoirs siltation. There are different methods to calculate the retained sediment volume and determine the erosion rates in their basins. The aim of this paper is to show a new method to determine the volume of retained sediment in check dams, based on the use of differential GPS, computer programs for spatial data processing, and comparing digital terrain models. The method is applied to a sample of ten check dams, which were built in 1964 by the *Duero* Hydrographic Agency. Erosion rates were also calculated based on the volume of retained sediment and the obtained results were compared with those obtained by means of the geometric Prism method. It can be concluded that the proposed method is reliable and highly accurate. The estimated values are higher up to 20% on average than those obtained by means of the geometric Prism method. The accuracy of the proposed method is interesting for future researching and designing in forest-hydrological restorations.

Keywords: gullies, soil conservation, check dam, gabion, forest restoration.

1. Introducción

Los diques tienen una notable eficacia en la retención de sedimentos (Romero *et al.*, 2012; Quiñonero *et al.*, 2016). Estas estructuras transversales capturan y retienen los materiales sólidos, reduciendo su transporte fuera de las cuencas (Conesa y García 2007; Romero, 2008). El estudio de estos sedimentos permite reconstruir la evolución del aterramiento y estimar las tasas de erosión media en las cuencas. Para ello, es necesario cuantificar el volumen del material atrapado, mediante algún método que sea lo más preciso posible (Ramos-Díez *et al.*, 2017). De esta manera, es posible saber cuáles son las mejores prácticas de gestión para aplicar en áreas degradadas (Navarro *et al.*, 2014; Mongil *et al.*, 2016).

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de cubicación de sedimentos moderna, precisa y con múltiples aplicaciones para el estudio de la erosión hídrica, basada en el uso del GPS centimétrico y programas de tratamiento de datos espaciales, así como en la comparación de los modelos digitales de terreno (MDT). Este método se aplica en una restauración de cárcavas de más de 50 años de antigüedad situada en la Sierra de Ávila (Ávila).

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la localidad de Cabezas de Bonilla (término municipal de Bonilla de la Sierra, Ávila), situada en el extremo suroeste de la Sierra de Ávila, dentro de la cuenca del Duero. La precipitación media anual es 571 mm y su temperatura media anual de 10,6°C. El material geológico es ígneo, formado por monzogranitos. La vegetación original, antes de iniciarse los procesos de degradación estaba compuesta por encinares (*Quercus ilex* ssp. *ballota* (Desf.) Samp.) y robledales (*Quercus pyrenaica* Willd.). Tras la restauración hidrológico-forestal realizada en 1964, las laderas y cárcavas se cubren con pinares de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* AIT., 1789, principalmente (MONGIL *et al.*, 2013).

2.2. Metodología

Se ha aplicado la metodología de cubicación de sedimentos que se explica a continuación (MDT) en una muestra de 10 diques de la restauración hidrológico-forestal (Muñoz-Barco, 2016). En primer lugar, se han realizado los levantamientos taquimétricos de las cuñas, del paramento del dique que permanece visible y del contorno de la zona de estudio. Con el GPS se ha tomado una nube de puntos (densidades entorno a 3 ptos/m²) que permita representar de forma correcta las dimensiones del terreno y de la cuña de sedimento. Cada punto, una vez medido, recibe unas coordenadas de ubicación Este, Norte y Altitud (XYZ), un número de punto y un código específico del elemento que representa. Dentro de esta nube de pun-

tos y para la correcta interpretación posterior hay que diferenciarlos mediante su código:

- Puntos en líneas de rotura: Son aquellos que definen una línea a partir de la cual se produce un cambio brusco de pendiente. Se unen posteriormente con una polilínea que representa una línea natural o artificial en el terreno. El programa utilizado para triangular los puntos no une vértices que corten sobre líneas de rotura. Este grupo es el más importante pues el resto de puntos pueden ser interpolados a partir de las líneas de rotura que definen estos.
- Puntos de relleno: Son los que rellenan superficies planas o de pendientes constantes. La triangulación que se realice es aleatoria y puede ser modificada para mejorar el diseño del modelo.
- Puntos de información: Son los medidos en el terreno pero que no son usados posteriormente en el modelo digital, sino que se usan para ampliar información.

Posteriormente se trabaja editando diferentes capas donde se irán separando los distintos códigos usados. Este método de gestión de capas es altamente eficiente pues permite visualizar por separado las diferentes características del dibujo. Una vez se han completado las labores de clasificación de puntos y líneas de rotura se han creado los modelos digitales mediante algoritmos de casado de vértices. De manera automática se han generado triángulos con vértices con información planimétrica y altimétrica. Una vez obtenida la superficie mediante triangulación de la nube de puntos, se ha realizado el curvado del plano. Las curvas de nivel definen un modelo digital más preciso y mejoran los puntos de corte de los perfiles longitudinales y transversales que se obtienen. Con el paso de los años el terreno ha sufrido una serie de transformaciones, ya sean de origen natural o antrópico. En el estudio de terrenos digitales es posible diferenciar tres tipos diferentes en función de las transformaciones sufridas en una secuencia temporal:

- Terreno actual ($MDT_{\text{acumulado}}$): Terreno en el instante “t” de cualquier medición.
- Terreno original (MDT_0): Se trata del terreno original años antes de que se realizaran las obras de restauración (*Figura 1*). El terreno actual medido en este estudio es la base para la obtención del terreno original, puesto que no se realizaron mediciones cuando comenzó la restauración. Posee información del área que delimita el sedimento y el dique. Para la obtención del terreno original se usó un método de interpolación entre puntos de vaguada y proyectando las pendientes de los taludes laterales hasta la línea de vaguada (Díaz *et al.*, 2014; Díaz-Gutiérrez *et al.*, 2018) en el programa MDT4.0. Una vez se han insertado puntos interpolados se procedió de igual manera que en el modelo digital del terreno actual.

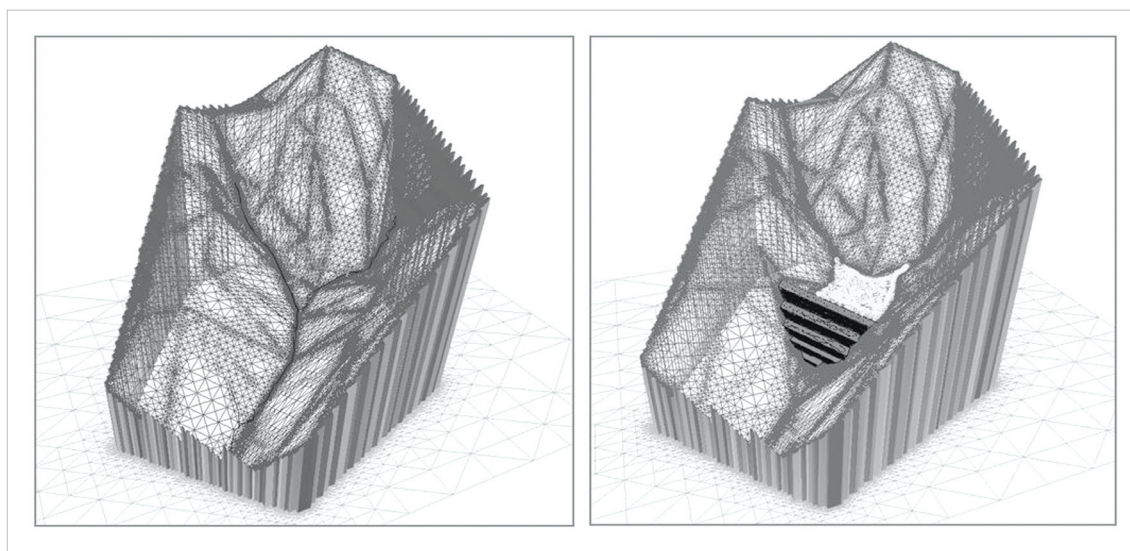


Figura 1. Terreno Original MDTo (Modelo Digital del Terreno Original obtenido mediante interpolaciones de pendientes de sus taludes y líneas de vaguada (izquierda). A la derecha, Terreno Modificado una vez ejecutadas las obras de ingeniería (MDTmod) y sedimento acumulado por el dique de gaviones. La comparación de ambos modelos nos permite conocer el volumen de sedimento retenido durante el periodo 1964-2016.

- Terreno original modificado con las obras de ingeniería (MDT_{mod}): El empotramiento del dique sobre el terreno original se ha realizado adaptándose a la geometría de la cárcava y sin cambios morfológicos en la estructura tipo del dique (*Figura 1*). La información recogida en el proyecto original (Azcarretazabal, 1964) y el trabajo posterior de inventario de diques (Amores, 2013) ha permitido dibujar el terreno modificado y la inserción de las pilas de malla y gaviones. En el actual estudio se ha obtenido el terreno que, bajo las especificaciones de construcción de los mencionados trabajos, se modificó para la instalación de los diques. Teniendo en cuenta las geometrías especificadas en estos trabajos y el modelo digital original se ha construido un terreno modificado virtual. Se ha partido de la hipótesis de la simetría de la obra transversal permitiendo el diseño del dique aguas arriba y consiguiendo un encaje perfecto y muy aproximado a la realidad. Se han creado las superficies y los curvados de este modelo, que han sido utilizadas para la cubicación del sedimento. La inserción real del dique en la vaguada supone cierta necesidad de excavación sobre el lecho original, quedando siempre el primer nivel de gaviones enterrado en el suelo. No obstante, esos pequeños volúmenes de tierra de excavación no generarán volumen de acumulación de sedimento, pues son ocupados totalmente por los gaviones. Para una mejor comprensión de la geometría, se han realizado modelos tridimensionales de cada terreno estudiado. Mediante los trabajos previos mencionados se conocieron los detalles de la geometría de los diques y cómo se construyeron (Muñoz-Barco, 2016).

El primer modelo que se ha usado es el “terreno original modificado” partiendo del momento en el que se insertó la hidrotecnia sobre la cárcava y, por tanto, aún no había sedimento acumulado. Para facilitar el diseño se ha considerado un dique no escalonado aguas arriba, para posteriormente restar el volumen de escalones enterrados. Para el cálculo del sedimento almacenado se han comparado los levantamientos realizados que nos han definido el terreno natural y el terreno acumulado, es decir, el terreno deducido y el terreno capturado tal y como está en el momento de las mediciones. La superposición de ambos modelos nos ha permitido conocer qué cantidad de sedimento se ha almacenado durante el tiempo transcurrido desde su implantación hasta el momento de las mediciones. La comparación de modelos digitales puede realizarse por diferentes métodos, que aportan resultados similares y que suelen ser escogidos en función de la geometría del terreno a estudiar. Los principales métodos son:

- Comparación de las superficies de triangulación de vértices.
- Comparación de perfiles transversales.
- Comparación de red de mallas.

Debido a la geometría de los diques, y para una aproximación mayor de la medición real del terreno original modificado, se restó a los volúmenes de sedimento obtenido el volumen ocupado por los escalones de gaviones aguas arriba. De esta manera, la precisión en el volumen acumulado es máxima y minimizamos los errores por exceso que pudieran ocasionarse en otras metodologías. Según Díaz *et al.* (2014), hay que tener en cuenta la morfología del dique, ya que cuando una parte de éste quede aterrada, por ejemplo, cuando el paramento aguas arriba es escalonado, se debe restar el volumen del dique que queda aterrado, ya que en caso contrario se estaría cometiendo un error de sobredimensionamiento del volumen final de sedimentos.

La cubicación de modelos digitales por medio de programas informáticos es relativamente sencilla y de fácil comparación entre otros métodos y programas. Además, los programas nos permiten visualizar con mucho detalle las zonas que producen volúmenes, para una interpretación adecuada. También permiten delimitar zonas que pudieran considerarse erróneas en las mediciones y la posibilidad de cambiarlas o simplemente descartarlas. Mediante el uso de líneas de contorno pueden aislarse las zonas que se quieran cubicar, de tal manera que, en este caso, se limitaron las cubicaciones a las zonas acumuladas de sedimento por la acción de los diques.

A partir del volumen estimado (V), se calculó la masa de sedimentos (SW), la producción de sedimentos (SY) y la producción total de sedimentos (TSY), con las ecuaciones siguientes:

$$SW = V \cdot BD \quad (\text{Ec. 1})$$

$$SY = SW/T \cdot S \quad (\text{Ec. 2})$$

$$TSY = SY/TE \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo BD la densidad aparente, T el tiempo desde la construcción de los diques, S la superficie de la cuenca de aportación y TE la eficiencia de trampa (Brown & Jarvis, 1943). Para una explicación más detallada de estas ecuaciones puede consultarse Díaz *et al.* (2014) y Díaz-Gutiérrez *et al.* (2018). Los resultados obtenidos por este nuevo método se han comparado con el método geométrico del Prisma (Castillo *et al.*, 2007) mediante el Test de Kruskal-Wallis (nivel de confianza $\beta=95,0\%$), debido a que los datos no siguen una distribución normal. Este análisis fue llevado a cabo con el software SPSS 15.0.

3. Resultados y discusión

El cálculo del volumen de sedimentos ofrece resultados diferentes dependiendo de la metodología y del dique medido (*Tabla 1*). Todos los diques excepto uno presentan mayores valores de volumen de sedimentos utilizando el método de los modelos digitales del terreno e interpolando los lechos originales (variaciones entre 0,03 y 28%). En el dique n.º 29 ocurre lo contrario, con una diferencia del 11,21%. El volumen medio retenido por dique aplicando la metodología MDT es $V_{MDT}=19,10 \text{ m}^3$, con una desviación típica de $12,88 \text{ m}^3$. Más del 90% de los diques retienen entre 5 y 50 m^3 de sedimento. El volumen según el método del Prisma es $V_P=14,90 \text{ m}^3$, con una desviación típica de $10,05 \text{ m}^3$. El método del Prisma (Castillo *et al.*, 2007), al igual que hacen otros autores (Boix-Fayos *et al.*, 2008), asemeja el volumen de sedimentos retenidos aguas arriba del dique a un prisma con sección rectangular. Se basan en los estudios de Lien (2003) y May & Gresswell (2003), que consideran que las ramblas suelen formar cauces con sección transversal en U (Díaz *et al.*, 2014). Estas metodologías no consideran la geometría de los diques instalados en Cabezas de Bonilla, pues el paramento aguas arriba es escalonado, con gaviones de 0,50-0,60 m de altura, lo que modifica el terreno original al encajarse estos sobre el lecho. Además, en la metodología MDT la definición de los taludes laterales y la superficie de sedimento es muy detallado y preciso lo que posibilita una cubicación más exacta en función de la geometría de cada dique. Para cada uno de los diques se ha obtenido un lecho único y propio. Respecto a los volúmenes totales, por el método MDT se obtiene $V_{TMDT}=190,94 \text{ m}^3$ de sedimento, mientras que por el método del Prisma el volumen es $V_{TP}=148,99 \text{ m}^3$. En la *Tabla 1* se muestran las diferencias en los volúmenes obtenidos por las dos metodologías en cada dique. Las tasas de erosión obtenidas (*Tabla 1*) muestran valores que oscilan entre 0,49 y las $6,72 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. La producción de sedimentos media (SY) es de $3,03 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de acuerdo con la aplicación MDT, un 20,8% superior que con la aplicación del método del Prisma ($2,40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$). Existe cierta relación entre los resultados obtenidos y el nivel de aterramiento de la hidrotecnia, obteniéndose tasas superiores en diques con un nivel de aterramiento alto.

Tabla 1. Resultados obtenidos en 10 diques representativos de la restauración de Sierra de Ávila y comparación entre metodologías

Nº DIQUE	V _{MDT} ¹ (m ³)	V _P ¹ (m ³)	SW _{MDT} ² (t)	SW _P ² (t)	S (ha)	T (años)	SY _{MDT} ³ (t·año ⁻¹ ·ha ⁻¹)	SY _P ³ (t·año ⁻¹ ·ha ⁻¹)	TE (t.p.u.)	TSY _{MDT} ⁴ (t·año ⁻¹ ·ha ⁻¹)	TSY _P ⁴ (t·año ⁻¹ ·ha ⁻¹)
1	31,49	22,86	43,02	31,23	0,1842	52	4,49	3,26	0,9956	4,51	3,27
2	3,94	3,86	6,43	6,30	0,0875	52	1,41	1,38	0,9979	1,41	1,39
20	46,1	37,59	69,30	56,50	0,4120	52	3,23	2,64	0,9903	3,26	2,66
28	24,76	20,22	39,37	32,15	0,2125	52	3,56	2,91	0,9950	3,58	2,92
29	9,94	11,21	15,90	17,92	0,1280	52	2,39	2,69	0,9970	2,40	2,70
30	19,18	13,88	31,33	22,68	0,0897	52	6,72	4,86	0,9979	6,73	4,87
41	14,63	9,26	20,47	12,95	0,1254	52	3,14	1,99	0,9970	3,15	1,99
42	12,48	11,05	15,73	13,92	0,0986	52	3,07	2,72	0,9977	3,08	2,72
50	5,47	3,94	6,51	4,69	0,2540	52	0,49	0,35	0,9940	0,49	0,36
73	22,96	15,12	33,51	22,06	0,3540	52	1,82	1,20	0,9916	1,84	1,21
Media	19,10	14,90	28,16	22,04	0,1946	-	3,03	2,40	0,9954	3,05	2,41
Desv. Tip.	12,88	10,05	19,39	15,23	0,11	-	1,73	1,25	0,0027	1,74	1,25

V=Volumen de sedimentos; SW=Masa de sedimentos; S=Superficie de la cuenca de aportación; T=Tiempo desde la construcción del dique; SY=Producción de sedimentos; TE=Eficiencia de trampa; TSY=Producción total de sedimentos; los subíndices significan: MDT=Método de modelos digitales del terreno; P=Método del Prisma.

Test de Kruskal-Wallis: ¹p=0,3578; ²p=0,3410; ³p=0,2505; ⁴p=0,3258 (no hay diferencias significativas entre medianas).

Teniendo en cuenta que la tasa de erosión tolerable en Europa varía de 0,3 a 1,4 t·ha⁻¹·año⁻¹ (Verheijen *et al.* 2009) se puede decir que en la zona las erosiones son altas. Con este tipo de metodologías, las cifras de erosión media obtenidas son sólo un umbral mínimo (Díaz *et al.*, 2014), pues los diques no retienen la totalidad de los sólidos en suspensión, ya que una fracción desconocida de los limos y las arcillas escapan a través de los huecos de los gaviones o los vertederos de los diques. Fifield (2004) indica que la eficiencia de las estructuras de retención de sedimentos en obras con movimientos de tierras es siempre menor del 100%; Makusic (2007) ha obtenido con trampas de sedimentos una eficiencia creciente del 37% al 99% según es mayor el periodo de retorno usado para su diseño.

En la zona de estudio, las hidrotecnias realizadas son de dimensiones pequeñas y situadas sobre cárcavas y barrancos con cuencas de aportación relativamente pequeñas. Esto hace que las eficiencias de trampa (TE) estimadas superen el 99,4% (Brown & Jarvis, 1943) (Tabla 1). Los valores medios respecto a la TSY sufren cierta variación, cifrándose en 3,05 t·ha⁻¹·año⁻¹ en la metodología MDT y 2,41 t·ha⁻¹·año⁻¹ en el método del Prisma.

La comprobación en gabinete de las mediciones realizadas y los cálculos por comparación de modelos digitales suponen un avance en el estudio detallado de ciertas zonas críticas como el fondo de las cuñas o los escalones aterrados. Por otro lado, los umbrales de erosión admisibles (Verheijen *et al.*, 2009; Hudson, 1982) son superados por un mayor número de diques (90%) según los cálculos realizados por MDT, frente al 70% del método del Prisma. Esto muestra la importancia de la utilización de métodos más fiables en la estimación de las tasas de erosión.

A pesar de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre métodos (test de Kruskal-Wallis) (*Tabla 1*), los V y SW obtenidos por MDT son mayores que con el método del Prisma (Castillo *et al.*, 2007). V_{MDT} es un 21,97% superior que V_P , lo cual es debido a que el método MDT es topográficamente más detallado y preciso, ya que conlleva un mayor número de mediciones sobre el terreno de precisión centimétrica, frente a la sencillez del otro método. En este caso, la producción total de sedimentos por el método de los MDT es un 20,83% mayor que por el método del Prisma.

4. Conclusiones

MDT se presenta como un método muy preciso, cuando se lleva a cabo con un detalle adecuado al objeto de estudio. Posee una gran efectividad para el cálculo e interpretación de las tasas de erosión. Para su obtención, existen diferentes posibilidades en los trabajos de campo destacando, por su versatilidad y su sencillo manejo, el GPS de doble frecuencia y mediciones en tiempo real. Su ventaja frente a otros métodos es la optimización del tiempo que se invierte en las mediciones de campo. Por otro lado, la cubicación por comparación de MDTs permite obtener excelentes precisiones en los resultados y una adaptación óptima a las características de las obras de ingeniería, las cárcavas y la orografía en la que se insertan. Además, permite un control periódico de los volúmenes de sedimento almacenado con un error centimétrico. De esta manera en sucesivas investigaciones se pueden determinar erosiones en función del tiempo transcurrido, según especies vegetales usadas o tipos de obras empleadas, siendo su máximo rendimiento realizando mediciones desde que se instala una obra de ingeniería hasta que se da por concluida su vida útil.

5. Bibliografía

- Amores, M.; 2013. *Inventario y evaluación de los diques de la restauración hidrológico-forestal de Cabezas de Bonilla*. Proyecto fin de carrera. Universidad Católica de Ávila. Ávila.
- Azcarretazábal, D.; 1964. *Proyecto de repoblación forestal y restauración de laderas en la cuenca del río Corneja (Embalse de Santa Teresa). Tramo II. TM de Cabezas de Bonilla (Ávila)*. Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid.
- Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martínez-Mena, M.; Barrera, G.G. & Castillo, V.; 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.*, 22: 4922-4935. <https://doi.org/10.1002/hyp.7115>
- Brown, C.B. & Jarvis, C.S.; 1943. Discussion of sedimentation in reservoirs. By J. Witzig, *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 69:1493–1500.
- Castillo, V.; Mosch, W.; Conesa, C.; González, G.; Navarro, J.A.; López-Bermúdez, F.; 2007. Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion

- control in a semiarid mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70: 416-427. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.11.009>
- Conesa, C.; García, R.; 2007. Litofacies de relleno y modelo de sedimentación de los diques de retención en el tramo inferior de la Rambla del Cárcavo (Cuenca del Segura). *Rev. Cuaternario & Geomorfología*, 21(3-4): 77-100.
- Díaz, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2014. Topographical surveying for improved of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badland restoration site (Central Spain). *Journal of Soil and Sediments*, 14(12): 2045-2056. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0958-5>
- Díaz-Gutiérrez, V.; Mongil-Manso, J.; Navarro-Hevia, J.; Ramos-Díez, I.; 2018. Check dams and sediment control: final results of a case study in the upper Corneja River (Central Spain). *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2042-z>
- Fifield, J.S.; 2004. *Designing for effective sediment and erosion control on construction sites*. Forester Communications Inc., Santa Bárbara.
- Hudson, N.; 1982. *Conservación del suelo*. Editorial Reverté. Barcelona.
- Lien, H.P.; 2003. Design of slit dams for controlling stony debris flow. *International Journal of Sediment Research*, 18: 74-87.
- Makusic, M.S.; 2007. *Effects of Design Changes on Sediment Retention Basin Efficiency*. NC State Theses and Dissertations.
- May, C.; Gresswell, R.; 2003. Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon coast range, USA. *Earth Surface Processes Landforms*, 28: 409-424. <https://doi.org/10.1002/esp.450>
- Mongil, J.; Navarro, J.; Cruz, V.; Díaz, V.; 2013. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 38: 107-113.
- Mongil-Manso, J.; Navarro-Hevia, J.; Díaz-Gutiérrez, V.; Cruz-Alonso, V.; Ramos-Díez, I.; 2016. Badlands forest restoration in Central Spain after 50 years under a Mediterranean-continental climate. *Ecological Engineering*, 97: 313-326. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.020>
- Muñoz-Barco, M.A.; 2016. *Nueva metodología topográfica para la estimación del volumen de sedimentos almacenados en diques de retención. Caso de estudio en Cabezas de Bonilla (Ávila)*. Trabajo fin de grado. Universidad Católica de Ávila. Ávila.
- Navarro, J.; De Araújo, J.C.; Mongil, J.; 2014. Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(12): 1563-1575. <https://doi.org/10.1002/esp.3541>
- Quiñonero, J.M.; Nadeu, E.; Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; 2016. Evaluation of the effectiveness of forest restoration and check-dams to reduce catchment sediment yield. *Land Degradation & Development*, 27: 1018-1031. <https://doi.org/10.1002/ldr.2331>
- Ramos-Díez, I.; Navarro-Hevia, J.; San Martín, R.; Mongil-Manso, J.; 2017. Final analysis of the accuracy and precision of methods to calculate the sediment retained by check dams. *Land Degradation & Development*, 28(8): 2446-2456. <https://doi.org/10.1002/ldr.2778>
- Romero, A.; 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34: 83-99. <https://doi.org/10.18172/cig.1208>

- Romero, A.; Marín-Sanleandro, P.; Ortiz-Silla, R.; 2012. Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams. South-eastern Spain. *Catena*, 99: 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.006>
- Verheijen, F.G.A.; Jones, R.J.A.; Rickson, R.J. & Smith, C.J.; 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Sci Rev*, 94: 23-38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>

