



Metodologías empleadas para el estudio de la erosión edáfica en incendios forestales

Methodologies for studying soil erosion in forest fires

Javier León (1*), David Badía (2), Maite Echeverría (1)

(1) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

(2) Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, Universidad de Zaragoza, Huesca, España

*Corresponding author: fjavierlmiranda@gmail.com

Keywords

Erosion needles
Laser scanner
Rainfall
simulations
Vegetation
transects
Water
repellency

Abstract

One of the most obvious environmental consequences of the wildfires is the modification of the vegetation cover and litter, it developed variations in the hydro-geomorphological behavior on scenarios affected by the fire. Wildfires in semiarid areas increased runoff rates and erosion after fire. Therefore, in semiarid areas replanted with coniferous forests, scrub steppe, degraded soils, steep slopes, soft lithologies and faster storms will result in *flash floods* or sudden flows after wildfires. The fire of August 2008 in the Zuera Mountains (Zaragoza, Spain) affected more than 2,000 hectares of pine forest, on calcareous soils. The storms after the wildfire developed *flash floods* in alluvial fans around 68 m². Some of these alluvial fans have been monitored using erosion needles and laser scanner; soil characterization and vegetation studies with linear transects; infiltrations; rainfall simulations; and water repellency were measured. The results to apply different techniques shown a sediment accumulation around 1 m thick in alluvial fans; high infiltration rates in soils burned covered with ashes; less runoff rates in soils covered with wood-chip; successful regeneration in northern slopes; and a mild water repellency in these soils.

Palabras clave

Agujas de
erosión
Láser escáner
Lluvia simulada
Transectos de
vegetación
Hidrofobicidad

Resumen

Una de las consecuencias ambientales más evidentes tras un fuego forestal es la desaparición de la cubierta vegetal y la hojarasca, lo que supone una intensa alteración del comportamiento hidrogeomorfológico de los escenarios afectados. Entre dichas alteraciones destaca el aumento de la escorrentía y erosión tras el fuego, en un periodo que puede ser relativamente largo en zonas semiáridas, donde además tenemos bosques repoblados de coníferas, matorrales esteparios, suelos degradados, pendientes fuertes, litologías blandas e intensas precipitaciones, y activándose *flash floods* o flujos repentinos. En el incendio de agosto de 2008 en los Montes de Zuera (Zaragoza, España), que afectó a más de 2000 ha de bosque de pinar sobre suelos calcáreos, las primeras lluvias provocaron flash floods en abanicos aluviales de unos 68 m². Algunos de estos abanicos aluviales han sido monitorizados mediante el uso de varillas de erosión y del láser escáner; además, se han caracterizó el suelo y la vegetación (con transectos lineales); infiltraciones; simulaciones de lluvia; y la hidrofobicidad. Los resultados obtenidos tras aplicar diferentes técnicas muestran espesores de sedimento en los abanicos aluviales de 1 m de espesor; altas tasas de infiltración en suelos quemados cubiertos de cenizas; una menor escorrentía en suelos acolchados de astillas; una satisfactoria regeneración vegetal en las laderas de exposición norte; y una leve hidrofobicidad en estos suelos.

Received: 15 October 2015 | Accepted: 16 November 2015

1 INTRODUCCIÓN

Una de las consecuencias ambientales más evidentes tras un fuego forestal es la desaparición parcial o total de la cubierta vegetal y la hojarasca (Shakesby, 2011). La

vegetación es el factor estructural que más influye en el proceso de reconstrucción ambiental tras el incendio. Además, los incendios introducen variaciones en el comportamiento hidrogeomorfológico de los escenarios afectados por el fuego.

Las investigaciones sobre la erosión del suelo en entornos mediterráneos comienzan en torno a 1960 (SanRoque & Rubio, 1982; Díaz-Fierros et al., 1987), pero estos trabajos tuvieron un mayor desarrollo durante 1990, debido a un incremento de las superficies afectada por incendios forestales (Moreno et al., 1998; Pausas, 2004) con un promedio de 600.000 ha quemadas al año (Lloret & Zedler, 2009). Esta inquietud por la aplicación de técnicas destinadas a analizar los efectos ambientales de los incendios forestales, ha dado lugar a la proliferación de trabajos ligados a diferentes aspectos como el impacto y la severidad del fuego (Keeley, 2009); el papel jugado por las cenizas y la reducción de la protección del suelo por la vegetación (Cerdà & Doerr, 2008; León et al., 2013); el impacto de las gotas de lluvia en suelos quemados (Cerdà et al., 1997) y su degradación por pérdida de la estabilidad de los agregados (Mataix-Solera et al., 2011); o aquellos trabajos ligados a medidas de restauración y rehabilitación en entornos afectados por incendios forestales (Cerdà & Robichaud, 2009) y de control de la erosión en laderas tras aplicar técnicas de acolchado –paja, astillas, mixto-, y aerosiembra (Bautista et al., 1996; Badía & Martí, 2000; Cerdà & Doerr, 2008; Robichaud et al., 2008; León et al., 2012).

En ámbitos semiáridos, la presencia de un incendio acarrea un aumento de los valores de escorrentía superficial y erosión en el periodo inmediato al fuego (Sempere et al., 1994). Por todo ello, en ámbitos semiáridos de bosques repoblados de coníferas, matorrales esteparios, suelos degradados, fuertes pendientes, litologías blandas y precipitaciones tormentosas, la puesta en marcha de *rills*, *gullies* y *flash floods* resultan frecuentes tras un incendio (León et al., 2015a). Es en estos entornos donde se han empleado técnicas destinadas al análisis de los efectos de la erosión hídrica, con trabajos de medición del sedimento acumulado con agujas de erosión (Sancho et al., 1991) y más recientemente con láser escáneres (Angás & Serreta, 2010); o el uso de infiltrómetros de diferente tipología, para medir la capacidad de infiltración de un determinado suelo (Cerdà, 1995; León et al., 2014a); además, en aquellos entornos semiáridos donde la precipitación no permite la instalación de parcelas para medir la cantidad de sedimento exportada, se aplican los simuladores de lluvia (Cerdà et al., 2009; León et al., 2012); otros trabajos muy ligados a la hidrología del suelo evalúan el papel hidrofóbico o hidrofílico de un suelo (Doerr & Shakesby, 2009; Jordán et al., 2010) y, por último, el estudio de la capacidad de regeneración vegetal permite en mayor o menor medida controlar los procesos de *splash* y flujo

superficial (Neary et al., 1999; León et al., 2015b).

El objetivo de este artículo es mostrar alguna de las técnicas más empleadas, en el análisis del comportamiento hidrológico de suelos afectados por incendios forestales, incorporando mejoras técnicas en algunas herramientas y la descripción de una técnica desarrollada en los últimos años para la cuantificación de los sedimentos provocados por *flash floods* en abanicos aluviales, mediante el empleo del láser escáner.

2 METODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra situada en el sector central de la Depresión del Ebro, al norte de la ciudad de Zaragoza, en los Montes de Castejón-Zuera (zona central del incendio, UTM 30T, X671106, Y4644584), donde se quemaron 2.800 hectáreas en el año 2008 de bosque de pinar, matorral y tierras de labor (León et al., 2015c).

La vegetación en el área del incendio de Castejón-Zuera, se caracteriza por una mezcla entre bosque de pinar (*Pinus halepensis* Mill.), coscojar (*Quercus coccifera* L.), matorral – aliaga, retama y romero- (*Genista scorpius* L., *Retama sphaerocarpa* L., *Rosmarinus officinalis* L.) y tierras de labor. Los suelos (*Rendzic Phaeozem*) son extremadamente calizos, con un horizonte Ah móllico, de textura franco arcillosa (Badía et al., 2013). El clima es mediterráneo continental, con una precipitación media anual de 450 mm y una variación de las temperaturas medias extremas entre -7.1 °C y 36.5 °C. La evapotranspiración media anual es aproximadamente de 1406 mm (usando FAO56 método de Penman Monteith) y se ve incrementada por los fuertes vientos, implicando que el déficit hídrico de la zona sea uno de los más altos de Europa. Las unidades geomorfológicas de este área (entre 200 y 748 m) son plataformas carbonatadas, relieves acolinados degradados en yeso y valles de fondo plano rellenos de limos y cantos de caliza y yeso.

2.2 TÉCNICAS EMPLEADAS

Para el análisis de la **infiltración** se empleó un infiltrómetro de anillo simple (Figura 1) de acuerdo al modelo usado por Link (2000). Este infiltrómetro consiste en un anillo de hierro de 15 cm de diámetro y se clava 5 cm en el suelo. Una capa de agua de 5 cm es mantenida por un flotador que lleva ensamblada una válvula directamente desde el tanque. Las mediciones de la velocidad de infiltración

fueron tomadas cada 30 segundos, hasta alcanzar la estabilidad (Ries & Hirt, 2008). A este tipo de sistemas se le han añadido mejoras para el cálculo de la tasa de infiltración, mediante la aplicación de un doble anillo para permitir una infiltración vertical.



Figura 1. Detalle del modelo de infiltrómetro empleado.

Respecto a la **lluvia simulada**, a partir de la cual se intenta reproducir la transformación de la lluvia en *splash* o salpicadura (León et al., 2014c), la arroyada o escorrentía (León et al., 2012), provocando la formación de costras (León et al., 2013), y alimentando los procesos de infiltración (Calvo-Cases et al., 1991; Iserloh et al., 2013; León et al., 2014b, 2015c). En la actualidad se han realizado muchas mejoras en el empleo de esta herramienta incorporando nuevas tipologías de boquillas y electroválvulas para evitar goteos, bombas electrónicas que mantienen un flujo constante, caudalímetros para tener un mayor control del caudal en todo momento, y sistemas de calibración (*laser disdrometer*) para la mejora del control de las características específicas de la tipología de la lluvia –tamaño de gota, velocidad de caída, energía cinética (León et al., 2014a, b). La simulación de lluvia se ha llevado a cabo sobre microparcels quemadas, control y cubiertas de astillado, para evaluar el acolchado como técnica postincendio destinada a la restauración ambiental.



Figura 2. Agujas de erosión (izquierda) y láser escáner (derecha).

Con respecto a la medición de los **aluvionamientos** aportadas tras eventos de precipitación en abanicos aluviales, han sido muchos los científicos que han realizado mediciones con agujas de erosión (Sala, 1982; Benito et al., 1992; León et al., 2015c), microperforadores (Sancho et al., 1991) y recientemente empleando el láser escáner (Nadal-Romero et al., 2014; León et al., 2015c). La utilización de

las agujas de erosión es una de las técnicas más simples y efectivas para medir pequeños cambios en la altitud de la superficie del terreno (Sancho et al., 1991). Este método consiste en introducir parcialmente en el suelo una aguja o varilla y medir cada cierto intervalo de tiempo la altura del extremo superior con respecto a la superficie topográfica. En los dos abanicos aluviales se construyó una malla de cuadrados de 50 cm de lado, mediante cuerdas y varillas fijas en los vértices, de la que se obtuvieron tres mediciones a lo largo del periodo de trabajo, con varillas de 70 cm de largo y 6 mm de grosor (Figura 2, izquierda). Con respecto a la aplicación del láser escáner, se empleó el aparato *Leica Scan Station*, que permite una resolución inferior a 2 mm. Este aparato se apoya, para obtener una georreferenciación de los puntos, en una estación total GPS (*Leica TS02 estación total*) y, además, se emplearon 4 balizas de control, para obtener una mayor precisión a la hora de la georreferenciación (Figura 2 derecha).



Figura 3. Transectos de vegetación en 2008 (izquierda) y 2011 (derecha).

Por último, para registrar la **evolución de la vegetación** tras el incendio se realizaron transectos de vegetación (Figura 3), de 10 m de longitud con puntos intermedios cada 50 cm, replicados a dos metros. Se dividió el transecto en distintos segmentos de ladera –superior, medio y basal- y contrastando la exposición –umbría y solana- (León et al., 2015b). Las mejoras introducidas a la hora de evaluar la regeneración vegetal han ido desde la instalación de estructuras o pértigas con sistemas fotográficos que tras un análisis posterior permiten realizar un seguimiento informático (Llovería et al., 2006) y más recientemente los sensores y dispositivos Lidar (Cabrera et al., 2014), para realizar un seguimiento de la vegetación, sobre todo de especies arbóreas.

Tabla 1. Datos obtenidos con el infiltrómetro y el simulador de lluvia.

SUELOS QUEMADOS (<i>Rendzic Phaeozem</i>)			
Infiltración (mmh^{-1})		Escorrentía (mmh^{-1})	
Con cenizas	Sin cenizas	Con astillas	Sin astillas
2302,7 ± 83,5	1704,1 ± 83,5	4,36 ± 3,85	9,39 ± 5,81

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados alcanzados mediante las diferentes técnicas se resumen en: i) la acumulación de sedimentos finos y gruesos presenta en torno a 1 m de espesor en los abanicos aluviales (Figura 4); ii) las tasas de infiltración obtenidas con el infiltómetro de anillo simple reflejan una diferencia de $1704,1 \pm 83,5 \text{ mmh}^{-1}$ en suelos quemados sin presencia de cenizas y $2302,7 \pm 83,5 \text{ mmh}^{-1}$ en suelos quemados con cenizas (Tabla 1); iii) las tasas obtenidas con el simulador de lluvia detectaron una mayor eficacia del acolchado, ya que se redujo en un 46,4 % la tasa de escorrentía ($9,39 \pm 5,81 \text{ mmh}^{-1}$ en suelos quemados sin astillas y $4,36 \pm 3,85 \text{ mmh}^{-1}$ en suelos quemados con astillas) (Tabla 1); y iv) los resultados mostrados en los transectos de vegetación sugieren una rápida y satisfactoria regeneración vegetal en las laderas de exposición norte, en contra de las laderas de exposición sur, presentando las umbrías el doble de recubrimiento, destacando los tramos basales de las laderas donde se obtuvieron los recubrimientos más rápidos y mayores, con especies como el *Quercus coccifera* en ambas exposiciones, el *Lithospermum arvense* en solana y el *Rhamnus lyciodes* en umbría (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de especies representativas identificadas.

Especies identificadas (n=245)	Exposición	
	N	S
<i>Brachypodium phoenicoides</i> L.	2.4	4.9
<i>Brachypodium retusum</i>	2.0	2.0
<i>Centaurea linifolia</i> L.	-	0.8
<i>Erodium moschatum</i>	2.0	-
<i>Helianthemum marifolium</i> Mill	0.4	0.4
<i>Lactuca serriola</i> L.	2.9	-
<i>Lithospermum arvense</i> L. subsp. <i>arvense</i>	0.8	9.8
<i>Lonicera etrusca</i>	0.4	0.4
<i>Phillyrea angustifolia</i> L.	0.8	-
<i>Pinus halepensis</i> Mill	2.0	0.4
<i>Pistacea lentiscus</i> L.	0.4	-
<i>Quercus coccifera</i> L.	24.5	24.1
<i>Rhamnus alternus</i> L. subsp. <i>alternus</i>	6.1	-
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	-	0.4
<i>Rubia peregrina</i> L. subs. <i>peregrina</i>	7.8	1.6
<i>Taraxacum officinale</i>	2.4	-

Las cenizas negras aumentaron la infiltración y redujeron el flujo superficial, como sucede en otros estudios (Cerdà y Doerr, 2008; Woods & Balfour, 2008; Cerdà & Robichaud, 2009; Moody et al., 2009; Shakesby, 2011; Ebel et al., 2012).

El acolchado con astillas redujo la erosión, disminuyendo en un 45% para estos suelos. Esta reducción de la escorrentía se observa también en otros estudios donde se aplican diferentes tipos de acolchado –paja o astillas– (Badía & Martí 2000; Bautista et al. 1996; Cerdà & Doerr, 2008; Woods & Balfour, 2008; Cerdà & Robichaud 2009; Fernández et al. 2011; León et al., 2013).

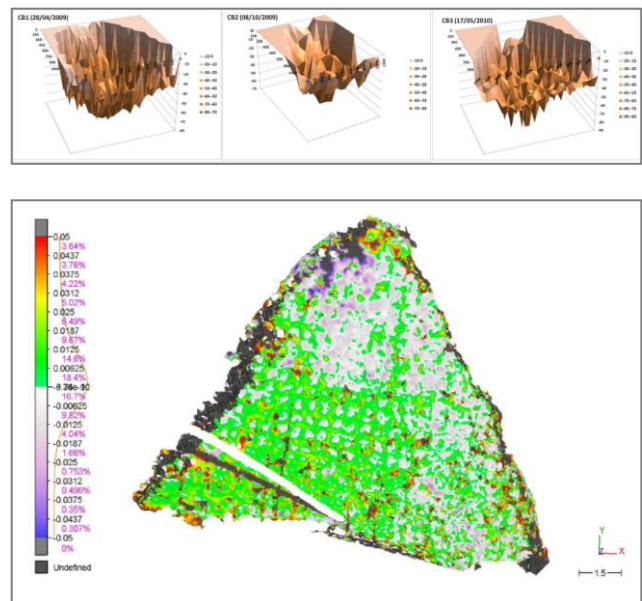


Figura 4. Representación de la profundidad alcanzada por las cenizas en cm, con varillas de erosión (arriba) y con el láser escáner (abajo)

Las alteraciones en la cubierta vegetal tras el incendio y la aparición de una capa hidrofóbica en el primer centímetro de espesor (León et al., 2014d) en estos suelos incrementan el efecto del *splash* y limitan la infiltración, incrementando los flujos Hortonianos y la erosión (Mataix-Solera & Doerr 2004; Doerr & Shakesby 2009; Jordan et al. 2010).

4 CONCLUSIONES

Los incendios forestales producen una activación de la escorrentía superficial, facilitando *flash floods* en ambientes extremos, como el entorno mediterráneo afectado por fuegos frecuentes, lluvias intensas, en zonas de pendientes fuertes, y suelos con bajos coeficientes de infiltración. La morfogénesis tras un incendio en ámbito

semiárido es tremendamente activa a partir de tormentas intensas (>30-35 mm/día en escasas horas), que producen la apertura de formas de incisión lineal, *rills* y *gullies*, así como *fast floods*, que transfieren tanto sedimento como cenizas desde las laderas hacia niveles de base locales (alrededor de 35 m³ en cada uno de los abanicos aluviales seleccionados). En algunos casos, obstáculos antrópicos como la construcción de pistas forestales, representan nuevos niveles de base para estas avenidas rápidas. La medición de material acumulado en estos abanicos aluviales con láser escáner es más precisa que la llevada a cabo con las varillas de erosión, ya que la toma de datos se realiza bajo parámetros constantes (metodología y operador).

La capa de cenizas en estos suelos calcáreos y quemados, juega un importante papel en la respuesta hidrológica del suelo, controlando los procesos de infiltración, ya que, actúa como un acolchado, protegiendo al suelo y aumentando la infiltración, durante el tiempo que perduren esa capa protectora.

El empleo de una capa de acolchado de astillas sobre estos suelos afectados por incendios actuó reduciendo las tasas de escorrentía a la mitad, resultando ser muy efectivas. Siendo recomendable realizar una selección de aquellas áreas que son más vulnerables y susceptibles a la erosión y más sensibles a las pérdidas de suelo antes de utilizar un determinado tipo de acolchado.

En cuanto a la regeneración vegetal, los resultados mostrados sugieren un rápido y satisfactorio recubrimiento vegetal en las laderas de exposición norte, en contra de lo que sucede en las laderas de exposición sur, presentando las umbrías el doble de recubrimiento en las sucesivas mediciones tras el fuego. Con respecto a la relación entre segmento de pendiente y regeneración vegetal, hay que destacar que en los tramos basales de las laderas cóncavas es donde se obtuvieron los recubrimientos más rápidos y mayores, donde el suelo es capaz de almacenar mayor aporte de nutrientes y de agua.

ACKNOWLEDGEMENTS

Esta investigación fue apoyada por el Ministerio de Ciencia e Innovación BES-2008-003056, el proyecto CETSUS (CGL2007-66644-C04-04 / HIDCLI) y el grupo de

Investigación sobre Geomorfología y Cambio Climático (DGA, 2011). También agradecer a Paloma Ibarra y a Clara Martí su asesoramiento y ayuda en la clasificación vegetal.

REFERENCES

- Angás J, Serreta A. 2010. Valorización y difusión del patrimonio arqueológico mediante un entorno web 3D. Documentación de Santa María de Iguacel (XI dC) mediante láser escáner 3D, *Virtual Archaeology Review* vol. 1, 1: 63-67.
- Badía D, Martí C. 2000. Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro valley, NE Spain, *Arid Soil Research and Rehabilitation* 14: 219-232.
- Badía D, Martí C, Aznar JM, León J. 2013. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments, *Geoderma* 193-194: 13-21.
- Bautista S, Bellot J, Vallejo VR. 1996. Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem, *Arid Land Research and Management* 10: 235-242.
- Benito G, Gutierrez M, Sancho C. 1992. Erosion rates in badlands areas of the central Ebro Basin (Ne-Spain), *Catena* Vol. 19, Iss. 3-4: 269-286.
- Cabrera J, Lamelas MT, Montealegre AL, de la Riva J. 2014. Estimación de variables dasométricas a partir de datos LIDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill, XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Alicante.
- Calvo-Cases A, Harvey AM, Payá-Serrano J, Alexander RW. 1991. Response of badland surfaces in South East Spain to simulated rainfall, *Cuaternario y Geomorfología* 5: 3-14.
- Cerdà A. 1995. Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos, *Geoforma Ediciones, Logroño*, pp. 151.
- Cerdà A, Doerr SH. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period, *Catena* 74: 256-263.
- Cerdà A, Robichaud PR. 2009. Fire effects on soils and restoration strategies, *Land Reconstruction and Management*, Vol. 5, Oxford, pp. 41-295.
- Cerdà A, Ibáñez S, Calvo A. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain, *Soil Technology* 11: 163-170.
- Cerdà A, Giménez-Morera A, Bodí MB. 2009. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1822-1830.
- Díaz-Fierros VF, Benito-Rueda E, Pérez-Moreira R. 1987. Evaluation of the U.S.L.E. for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (N.W. Spain), *Catena* 14: 189-199.
- Doerr SH, Shakesby RA. 2009. Soil water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments. In: Cerdà A, Mataix-Solera J (Eds.), *Efectos de los Incendios Forestales Sobre los Suelos en España*, Cátedra Divulgación de la Ciencia, Universitat de València, Valencia, pp. 59-76.
- Ebel BA, Moody JA, Martin DA. 2012. Hydrologic conditions controlling runoff generation immediately after

- wildfire, *Water Resources Research* 48: 3. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011470>.
- Fernández C, Vega JA, Gras JM, Jiménez E, Fonturbel T. 2011. Effectiveness of three post-fire treatments at reducing soil erosion in Galicia (NW Spain), *International Journal of Wildland Fire* 20: 104–114.
- Iserloh T, Ries JB, Arnáez J, Boix-Fayos C, Butzen V, Cerdà A, Echeverría MT, Fernández-Gálvez J, Fister W, Geißler C, Gómez JA, Gómez-Macpherson H, Kuhn NJ, Lázaro R, León FJ, Martínez-Mena M, Martínez-Murillo JF, Marzen M, Mingorance MD, Ortigosa L, Peters P, Regüés D, Ruiz-Sinoga JD, Scholten T, Seeger M, Solé-Benet A, Wengel R, Wirtz S. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics, *Catena* 110: 100-112
- Jordán A, Gonzalez FA, Zavala LM. 2010. Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain), *Hydrological Processes* 24: 736–748.
- Keeley JE. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage, *International Journal of Wildland Fire* 18: 116-126.
- León J, Echeverría MT, Badía D, Martí C, Álvarez C. 2012. Effectiveness of Wood chips cover at reducing erosion in two contrasted burnt soils, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, SI 1: 0–11.
- León J, Bodí MB, Cerdà A, Badía D. 2013. The contrasted response of ash to wetting: The effects of ash type, thickness and rainfall events, *Geoderma*, 209-210: 143-152.
- León J, Echeverría MT, Martí C, Badía D. 2014a. Can ash control infiltration rate after burning? An example in burned calcareous and gypseous soils in the Ebro Basin (NE Spain), *Catena*. doi:10.1016/j.catena.2014.05.024
- León J, Cerdà a, Seeger M, Badía D. 2014b. Applications of rainfall simulators to study areas affected by forest fires, *FLAMMA* 5(3): 116-120. ISSN 2171-665X.
- León J. Seeger M, Badía D, Peters P, Echeverría MT. 2014c. Thermal shock and splash effects on burned gypseous soils from the Ebro Basin (NE Spain), *Solid Earth* 5: 1817-1844.
- León J. 2014d. Hydrogeomorphological behavior after forest fires in semi-arid scenarios, PhD Thesis, Universidad de Zaragoza, España.
- León J, Echeverría MT, Serreta A, Badía D. 2015a. Debris flows y fuegos en ámbitos semiáridos, In: de la Riva J, Ibarra P, Montorio R, Rodrigues M (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, XXIV Congreso de la AGE, Zaragoza, pp. 134.
- León J, Echeverría MT, Badía D. 2015b. Regeneración vegetal tras un incendio en ámbitos subhúmedos y semiáridos de la depresión del Ebro, In: de la Riva J, Ibarra P, Montorio R, Rodrigues M (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, XXIV Congreso de la AGE, Zaragoza, pp. 134.
- León J, Badía D, Echeverría MT. 2015c. Soil erosion after forest fires in Zaragoza (NE-Spain), *Cuadernos de Investigaciones Geográficas* 41(1): 165-180. ISSN 0211-6820.
- Link M. 2000. Das Einring-Infiltrometer mit schwimmergeregelter Überstauhöhe – Ein neues Gerät zur Messung von Infiltrationsraten in Böden, *Geoök* 21: 121–132.
- Lloret F, Zedler PH. 2009. The effect of forest fires in vegetation. In: Cerdà A, Robichaud PR (Coord.), *Fire effects on Soils and Restoration Strategies*, Edit. Science Publishers, Enfield, pp. 257-295.
- Llovería RM, Cabello FP, Martín AG, de la Riva J. 2006. Evaluación de las consecuencias del fuego en quemas controladas mediante radiometría de campo, *Cuadernos de investigación geográfica*, 43-56.
- Mataix-Solera J, Doerr SH. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in south-eastern Spain, *Geoderma* 118: 77–88.
- Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, Jordán A, Zavala L. 2011. Fire effects on soil aggregation: a review, *Earth-Science Reviews* 109: 44-60.
- Moody JA, Kinner DA, Úbeda X. 2009. Linking hydraulic properties of fire affected soils to infiltration and water repellency, *Journal of Hydrology* 379 (3–4): 291–303.
- Moreno JM, Vázquez A, Vélez R. 1998. Recent history of forest fires in Spain. In: Moreno JM (Ed.), *Large Fires*, Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, pp. 159-185.
- Nadal-Romero E, Revuelto J, López-Moreno JI, Errea M, García-Ruiz JM. 2014. Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de procesos geomorfológicos en una zona acarcavada, In: Schnabel S, Gómez A (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, Cáceres, pp. 339-341.
- Neary DG, Klopatek CC, DeBano LF, Ffolliott PF. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis, *Forest Ecology and Management* 122: 51-71.
- Pausas JG. 2004. Changes in fire and climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin), *Climatic Change* 63: 337-350.
- Ries JB, Hirt U. 2008. Permanence of soil surface on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain, *Catena* 72: 282-296.
- Robichaud P, Wagenbrenner J, Brown R, Wohlgemuth P, Beyers J. 2008. Evaluating the effectiveness of contour-felled log erosion barriers as a post-fire runoff and erosion mitigation treatment in the western United States, *International Journal of Wildland Fire* 17: 255-273.
- Sala M. 1982. Metodología para el estudio y medición de los procesos de erosión actuales, *Notes de Geografía Física* 8: 39-56.
- Sancho C, Benito G, Gutiérrez M. 1991. *Agujas de Erosión y Perfiladores Microtopográficos*, Cuadernos Técnicos Sociedad Española Geomorfología, 2. Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 28.
- Sanroque P, Rubio J. 1982. El suelo y los incendios forestales. Diputación de Valencia, Valencia, pp. 57-63.
- Sempere D, Urbano A, Lavabre J, Dolz J. 1994. Consecuencias hidrológicas de los incendios forestales, *Ingeniería del Agua* 1, 4: 33-48.
- Shakesby R. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth-Science Reviews*. 105: 71-100.
- Woods SW, Balfour VN. 2008. The effect of ash on runoff and erosion after a severe forest wildfire, Montana, USA, *International Journal of Wildland Fire* 17: 535–548.