



**Efectos de los incendios en los suelos forestales de la Comunidad Valenciana.
Revisión bibliográfica**

*Effects of wildfires on forest soils of the Valencian Community.
A review of the scientific literature*

Añó Vidal, C. ^{(1)(*)}; Sánchez Díaz, J. ⁽¹⁾; Carbó Valverde, E. ⁽¹⁾

(1) Departamento de Calidad Ambiental y Suelos. Centro de Investigaciones sobre Desertificación -CIDE (CSIC-Universitat de València-GV). Ctra. Moncada-Náquera, Km 4,5. 46113 Moncada (Valencia). *carlos.anyo@uv.es

Resumen

Los incendios pueden modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos afectados por el fuego y aumentar los procesos de escorrentía y erosión. La magnitud de estos cambios dependerá, entre otros factores, de la duración del incendio, la temperatura alcanzada y el tipo de suelo. La importancia de las consecuencias provocadas por el fuego ha generado una extensa bibliografía, fruto de los estudios de diferentes grupos de investigación que han abordado esta temática tanto en el campo como en experimentos controlados de laboratorio. El principal objetivo de este artículo es conocer las aproximaciones metodológicas, resultados y conclusiones a partir de la revisión y análisis de las publicaciones que han estudiado, en la Comunidad Valenciana, las repercusiones de los incendios en las propiedades físicas y químicas del medio edáfico y las consecuencias hidrológicas y erosivas. La información bibliográfica se ha obtenido de Bib-Eron, base de datos en estudios de erosión gestionada por el Departamento de Calidad Ambiental y Suelos (CIDE), que cuenta para el marco territorial de análisis con 123 referencias bibliográficas, editadas entre 1982 y 2022, procedentes de publicaciones periódicas internacionales y nacionales, capítulos de libros, libros y tesis doctorales.

Palabras clave: incendios forestales; quema experimental; propiedades físicas y químicas edáficas; hidrología; erosión.

Abstract

Wildfires may produce changes in physical, chemical, and biological soil properties and increase runoff and erosion processes. The magnitude of these changes depends on several factors including the temperature reached, the duration of heating and soil type. The consequences caused by forest fires have led to an extensive bibliography generated by different research groups that have addressed this issue both in the field and



under controlled laboratory conditions. This paper is a review of the scientific literature dealing with changes imposed by wildfires in physical and chemical soil properties and in the hydrological and erosive behavior of the Valencian Community forest soils. Bibliographic information was collected from Bib-Eron, a bibliographic database on soil erosion. The information included in the database is collected and maintained by the Environmental Quality and Soils Department (CIDE). The analysis was based on the scientific documents encoded in the database. The period under consideration runs from 1982 to 2022 representing a total of 123 works published in international and national journals, book chapters, books, and doctoral thesis.

Key words: wildfires; experimental fire; physical and chemical soil properties; hydrology; erosion.

1. Introducción

Los incendios constituyen una de las perturbaciones más frecuentes e importantes que sufren los ecosistemas forestales mediterráneos. En la Comunidad Valenciana tanto el número de incendios como la superficie quemada se han incrementado sustancialmente desde mediados de la década de los setenta del siglo pasado. Los incendios ocurren con mayor frecuencia, pero la superficie afectada por los mismos muestra una gran variabilidad interanual relacionada con las condiciones climáticas de cada año. De acuerdo con la información proporcionada por la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales (Generalitat Valenciana) entre 1986 y 2019 hubo, en la Comunidad Valenciana, 108 Grandes Incendios Forestales (GIF), aquéllos que afectan a una superficie igual o mayor de 500 hectáreas, que quemaron 350.099 ha; cada vez se quema más superficie forestal en un número limitado de eventos. Las consecuencias de los incendios forestales sobre el sistema edáfico constituyen un asunto de enorme interés en la comunidad científica desde los años ochenta del siglo pasado. El interés se ha mantenido durante las últimas décadas por el aumento de la superficie afectada y la recurrencia de grandes incendios. El objetivo de este trabajo es conocer los métodos, resultados y conclusiones a partir de la revisión y análisis de las publicaciones que estudian, en la Comunidad Valenciana, las consecuencias de los incendios forestales en las propiedades físicas y químicas de los suelos y las repercusiones hidrológicas y erosivas. No hemos revisado el efecto del fuego en las

propiedades biológicas del medio edáfico ya que la producción científica es, en estos momentos y en el marco territorial de la Comunidad Valenciana, limitada. Entre los principales grupos de investigación que han abordado esta temática destacan los que se precisan a continuación.

La Unidad de Desertificación del Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (CSIC) fue pionera en estudiar los efectos de los incendios desde inicios de la década de los ochenta (Sanroque y Rubio, 1982). A partir de 1995 forma parte del Centro de Investigaciones sobre Desertificación —CIDE— y, desde esa fecha, en este centro mixto de investigación (CSIC, UV, GV) el Departamento de Calidad Ambiental y Suelos gestiona, en la provincia de Valencia, las estaciones experimentales de Porta Coelli y La Concordia, localizadas en terrenos forestales cedidos por la Generalitat Valenciana. La estación experimental de Porta Coelli (término municipal de Serra) se ubica en una ladera, con una pendiente media del 20%, afectada por un incendio en 1978. El suelo representativo es un Leptosol rendzínico (FAO-UNESCO, 1988) desarrollado sobre margas arcillo-arenosas y conglomerados del Muschelkalk. Dispone de 4 parcelas experimentales cerradas (40 m de largo y 8 m de ancho cada una) orientadas en el sentido de la pendiente. En funcionamiento desde 1988 estudia principalmente el comportamiento hidrológico y erosivo de distintas especies arbustivas y su eficacia para el control de la erosión. Las características de la instalación y el diseño experimental están descritas en Andreu *et al.* (2010). Una estación posterior

se instaló en 1994 en La Concordia (término municipal de Lliria) con unas características topográficas, edáficas y de cobertura vegetal semejantes. Los suelos son Leptosoles rendzínicos desarrollados a partir de calizas jurásicas. La estación dispone de 9 parcelas cerradas (20 m de largo y 4 m de ancho cada una) y experimenta con diferentes intensidades de fuego para comprobar los efectos sobre las propiedades edáficas. En junio de 1995 se realizó un incendio experimental de alta severidad de fuego (3 parcelas), moderada severidad (3 parcelas) y 3 parcelas control (ausencia de quema). En julio de 2003 se repitió la quema con el fin de analizar la evolución temporal de la escorrentía y los sedimentos, además de poder evaluar las repercusiones de los incendios recurrentes. En junio de 2021 se ha efectuado una nueva quema experimental. El equipamiento y las características de las parcelas experimentales puede consultarse en Rubio *et al.* (2003).

Desde inicios de la década de los noventa integrantes del Departamento de Geografía de la Universitat de València también abordaron el impacto de los incendios forestales estudiando la influencia del fuego sobre los procesos hidrológicos y erosivos, haciendo un seguimiento de la evolución de la infiltración y las tasas de la erosión de los suelos quemados. El análisis siempre lo efectuaron mediante experimentos con lluvia simulada, técnica que permite controlar la duración e intensidad de la precipitación. En un principio, la zona de estudio se restringió a áreas afectadas de la provincia de Valencia comenzando por trabajar en Bolbens y Pedralba, incendiadas, respectivamente, en agosto de 1989 y 1990 (Cerdà, 1995). A mediados de la década pasada investigadores de este departamento pusieron en funcionamiento la estación experimental El Teularet en la Sierra de Enguera (Valencia). Los criterios metodológicos y parte de los objetivos científicos son similares a los anteriores, aunque también han incorporado nuevas líneas de trabajo relacionadas con la hidrofobicidad (Bodí, 2012) y los efectos a largo plazo, 30-35 años después del incendio, del tipo de cubierta vegetal más habitual en la

zona (pino carrasco y encina) en los procesos hidrológicos y erosivos (Cerdà *et al.*, 2017).

El Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante, desde 1985, estableció parcelas experimentales en Albufera (Alicante) para estudiar el efecto del fuego sobre las propiedades químicas del suelo, los flujos de escorrentía y la pérdida de suelo (Mangas *et al.*, 1992; Sánchez Montahud, 1997). Posteriormente, el Departamento de Ecología de la Universidad de Alicante comenzó a trabajar sobre las consecuencias post-incendio, determinando sobre todo tasas de pérdida de suelo. Con el fin de evaluar la escorrentía y la producción de sedimentos después del incendio se instalaron, en otoño de 1995, 9 parcelas experimentales cerradas de 8 m de largo y 2 m de ancho en la Sierra Cortina, término municipal de Benidorm (Alicante), que había sufrido un incendio en agosto de 1993. El suelo representativo se clasificó como Cambisol calcáreo (FAO-UNESCO, 1988), desarrollado sobre margas eocenas (Bautista, 1999). La experimentación en esta zona continuó más adelante, estableciéndose nuevas parcelas para medir la capacidad de infiltración del suelo tanto en laderas quemadas como en otras que no se han visto afectadas por el fuego. En paralelo se instalaron otras parcelas experimentales para estudiar las producciones de escorrentía y sedimentos en áreas que habían sufrido grandes incendios forestales como el de Ontinyent-Bocairent-Moixent de julio de 1994 que quemó cerca de 19.000 ha (Llovet, 2005). Estudios posteriores, metodológicamente similares, examinaron las consecuencias hidrológicas de los incendios en otras zonas de la provincia de Alicante como en la Sierra de Onil (De Luis, 2002). El Departamento de Ecología, desde mediados de los noventa, inició su colaboración con el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) centrandolo, a partir de entonces, su interés investigador, entre otros aspectos, en la recuperación de zonas incendiadas desde la perspectiva de la vegetación como instrumento para controlar los procesos erosivos de los suelos quemados y evitar su degradación (Vallejo y Alloza, 2015).

El estudio de los efectos de los incendios forestales sobre el funcionamiento de los suelos también constituye una línea de investigación fundamental en el Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Desde mediados de los noventa comenzaron a estudiar el fenómeno en una zona quemada en agosto de 1994 ubicada entre los límites municipales de Alcoy y Cocentaina. En 1998 efectuaron una quema controlada en una parcela experimental de 1.500 m² situada en el término de Benifato (Sierra de Aitana); el suelo se clasificó como Haploxeroll cálcico (Soil Survey Staff, 1998). Los resultados de estos trabajos se materializaron en Mataix Solera (1999). A partir de entonces han continuado las investigaciones tendentes a comparar resultados entre zonas quemadas y otras que no han sufrido el incendio (zonas control), investigando los efectos del fuego en diferentes propiedades edáficas (v.gr., estabilidad de agregados o hidrofobicidad). También han considerado la evolución temporal de un buen número de parámetros edáficos. Toda la labor investigadora se ha desarrollado, preferentemente, en sectores de la provincia de Alicante. Además, han aportado innovaciones metodológicas muy interesantes como la utilización de la espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR), método rápido y preciso para estimar las temperaturas registradas en los suelos afectados por incendios (Arcenegui *et al.*, 2010). En los últimos años el Grupo de Edafología Ambiental del Departamento está trabajando en parcelas ubicadas en la Sierra de Mariola (término municipal de Alcoy); zona que sufrió un GIF de moderada severidad en julio de 2012. El principal objetivo es conocer los efectos de la gestión forestal post-incendio, en concreto el arrastre y la extracción de troncos quemados con maquinaria pesada, en las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio edáfico (García Orenes *et al.*, 2017), en las comunidades microbianas relacionadas con el ciclo del nitrógeno (Pereg *et al.*, 2018) y en las costras biológicas del suelo (García Carmona *et al.*, 2020), que tienen un papel muy importante en el control de los procesos hidrológicos y la erosión. El suelo es un Typic Xerorthent (Soil

Survey Staff, 2014) desarrollado sobre margas y, en este tipo de suelo muy vulnerable a la degradación por erosión hídrica, la tala y saca de madera tiene un efecto muy negativo en el ecosistema (García Orenes *et al.*, 2017; Pereg *et al.*, 2018).

2. Metodología

Las repercusiones edáficas provocadas por los incendios forestales han originado una extensa bibliografía, fruto de diferentes líneas de investigación que han estudiado los suelos afectados por el fuego tanto en el campo como en condiciones controladas de laboratorio. La información bibliográfica se ha obtenido de Bib-Eron, base de datos en estudios de erosión gestionada por el Departamento de Calidad Ambiental y Suelos del CIDE. La estructura de la base de datos con los correspondientes campos y su definición puede consultarse en Añó Vidal y Sánchez Díaz (2014). Hemos consultado 79 artículos editados en revistas internacionales (67 referencias) y nacionales (12 referencias), 18 capítulos de libros, 17 Tesis Doctorales y 9 libros. No hemos tenido en cuenta las actas de congresos. El número de referencias que figuran en la bibliografía se han reducido a 77 con el fin de aligerar el apartado; cualquier persona que quiera consultar el listado completo no dude en ponerse en contacto con los autores del artículo. También hemos considerado la información edáfica recogida en la publicación *Los suelos forestales de la Comunitat Valenciana. Catálogo de perfiles representativos* (Sánchez Díaz *et al.*, 2018). En los casos en los que se especifica el tipo de suelo se ha indicado el sistema de clasificación correspondiente.

3. Resultados

El fuego puede afectar a corto, medio o largo plazo, las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio edáfico y, con ello, la respuesta hidrológica y erosiva ante las precipitaciones. Los efectos en estas propiedades depende-

rán, sobre todo, de la temperatura alcanzada durante el incendio y su duración, tal y como ya demostraron Sanroque *et al.* (1985) en uno de los primeros trabajos efectuados en la Comunidad Valenciana, donde analizaron las consecuencias de los incendios en tres zonas de estudio de la provincia de Valencia: Forata, Los Yegüeros y La Peraleja, localizados, respectivamente, en los términos municipales de Yátova, Buñol y Enguera. En el primer caso el suelo representativo es un Cambisol cálcico y, en los otros dos emplazamientos, el suelo se clasificó como Rendzina. Los suelos se clasificaron siguiendo los criterios establecidos por FAO-UNESCO (1974). Por tanto, la severidad del fuego es un factor clave para entender los cambios en las propiedades de los suelos. Los incendios de baja severidad no suelen provocar impactos significativos. Por el contrario, incendios de gran severidad o prolongados, pueden ocasionar importantes modificaciones en el funcionamiento edáfico (Tabla 1).

No existe una única clasificación que establezca una gradación de la severidad del fuego, habiendo diferencias entre diferentes autores en relación con los límites. Entre las distintas propuestas está la de Campo (2012) cuya clasificación recoge los criterios establecidos en las investigaciones desarrolladas en la estación experimental de La Concordia (Figura 1). Este autor diferenció entre incendios de severidad ligera o baja, moderada y alta severidad. En los primeros las temperaturas en la superficie del suelo oscilan entre 100° y 250° C, alcanzando, a 10 mm de profundidad, los 50° C. En los segundos, las temperaturas máximas en la superficie del medio edáfico oscilan entre 300° y 400° C y, a 10 mm de profundidad, entre 100° y 200° C. En los incendios de alta severidad las temperaturas en superficie pueden exceder los 500° C y los 250° C a 10 mm de profundidad. Esta propiedad del fuego es fundamental para entender la respuesta edáfica post-incendio.

Tabla 1. Ejemplos de alteraciones en el suelo dependiendo de la severidad del fuego. Fuente: Jiménez Pinilla (2016).

Table 1. Examples of alterations in the soil depending on the severity of the fire. Source: Jiménez Pinilla (2016).

Temperaturas (°C)	Alteración
40-70	Degradación de proteínas y muerte de tejidos biológicos
48-54	Deshidratación o muerte de determinadas raíces
70-90	Muerte de determinadas semillas
50-121	Muerte de microorganismos edáficos
180-300	Combustión y destilación del mantillo. Combustión de alrededor del 85% del horizonte orgánico
200-250	Puede incrementarse la hidrofobicidad del suelo
200-315	Comienza la destilación de la materia orgánica del suelo
270-300	Destrucción de la hidrofobicidad del suelo
200-400	Comienza la destilación de nutrientes (particularmente N) Volatilización del azufre
>300	Los horizontes orgánicos superficiales del suelo son consumidos
420	Pérdida de agua en los minerales de la fracción arcilla
450	Combustión completa de la materia orgánica
600	Máxima pérdida de fósforo y potasio, oxidación de enlaces metálicos
800	Oxidación de azufre
980	Cambios irreversibles en los minerales de la arcilla
1.240	Volatilización del calcio



Figura 1: E.E. La Concordia (Lliria, Valencia). Quemas experimentales. Junio 1995 (imagen superior) y Julio 2003 (imagen inferior). Fotografías cedidas por Eugenia Gimeno García.

Figure 1: E.S. La Concordia (Lliria, Valencia). Experimental fire. June 1995 (top image) and July 2003 (bottom image). Photographs courtesy of Eugenia Gimeno García.

In press

En prensa

3.1. Efectos del fuego sobre las propiedades químicas y físicas del suelo

La acción del fuego sobre el ecosistema edáfico puede producir alteraciones en sus propiedades. Las consecuencias son variables ya que intervienen un gran número de factores. En un primer momento, el pH del suelo aumenta debido al aporte de óxidos y cationes básicos procedentes de las cenizas. Hay que tener en cuenta que los suelos calcáreos, mayoritarios en la Comunidad Valenciana, presentan una alta capacidad tampón y los cambios en el pH provocado por las cenizas es inferior a la que experimentan los suelos con pH ácido. El tiempo de recuperación del pH inicial es muy variado y será más o menos rápido según el tiempo que permanezcan las cenizas en el suelo. Por ejemplo, en la parcela experimental de la Sierra de Aitana (Benifato) después de 6 meses de la quema controlada no había diferencias significativas entre el pH del suelo quemado y el suelo control (Mataix Solera, 1999). En estas ocasiones, recuperaciones tan rápidas son consecuencia del arrastre por erosión de las cenizas. La **conductividad eléctrica** (CE) del suelo, que indica el contenido en sales solubles, también aumenta por la incorporación y solubilización de las cenizas. Al igual que en el caso de la anterior propiedad edáfica en un plazo relativamente corto, por ejemplo 3 meses en las parcelas experimentales de La Concordia (Andreu *et al.*, 1998) o 4 meses en la parcela de Aitana (Mataix Solera, 1999), la CE vuelve a los valores anteriores al incendio.

Si la severidad del fuego no es muy alta el aporte de cenizas también enriquece al suelo con un aumento de **nutrientes** (potasio, calcio, magnesio y fósforo disponible). Este aporte puede ser efímero, durando, por ejemplo, en las parcelas de La Concordia entre 4 y 5 meses (Gimeno García *et al.*, 2000) coincidiendo este final con la mayor pérdida de suelo provocado por tormentas con alta capacidad erosiva. También hay que tener en cuenta que una proporción importante de nutrientes se pierden por volatilización en el momento del fuego. En uno de los pri-

meros incendios experimentales efectuados en la Comunidad Valenciana, en concreto en parcelas localizadas en Albaterra (Alicante), Sánchez Montahud *et al.* (1994) observaron que inmediatamente después del incendio aumentaba la materia orgánica, el nitrógeno total, el fósforo disponible y los cationes intercambiables (potasio, sodio y magnesio). El calcio y la **capacidad de intercambio catiónico** (CIC) disminuyeron. Seis meses después los valores se equiparaban a los niveles originales. En las parcelas quemadas de La Concordia solo se observa una disminución de la CIC cuando la temperatura supera los 300°C; así cuando la temperatura alcanza los 700°C la CIC disminuye un 70% en relación con los valores iniciales (Gimeno García, 1999).

El fósforo disponible, inmediatamente después del fuego, se incrementa considerablemente en experimentos en los que la severidad del fuego es moderada o alta. Este hecho se ha observado tanto en las parcelas valencianas de La Concordia (Gimeno García *et al.*, 2000) como en las alicantinas de la Sierra de Aitana (Mataix Solera, 1999). Las causas de este incremento inicial son el aporte procedente de las cenizas, la combustión de la materia orgánica y la mineralización del fósforo orgánico como consecuencia de las temperaturas alcanzadas. El incremento puede mantenerse a medio plazo, por ejemplo, tres años después del incendio que afectó a Cortes de Pallás (provincia de Valencia) en junio de 2012 (Fernández *et al.*, 2019). El **nitrógeno** es uno de los nutrientes más afectados por los incendios ya que es uno de los elementos que más fácilmente se volatiliza. La influencia del fuego en el ciclo del nitrógeno es muy compleja y variable con importantes variaciones según el tipo de investigación efectuada. En general, en incendios con temperaturas superiores a los 200°C, suelen registrarse pérdidas de nitrógeno. En la estación experimental de La Concordia se realizó un seguimiento temporal en los meses posteriores a la quema controlada de 1995 y observaron que los valores medios de nitrógeno total, un año después del incendio, solo eran ligeramente inferiores en las parcelas quemadas respecto

a las parcelas control. Las variaciones, ligeras, del porcentaje de nitrógeno lo atribuyeron a las oscilaciones temporales del contenido en materia orgánica. Por el contrario, en las parcelas quemadas, inmediatamente después de la quema, detectaron un brusco incremento del nitrógeno amoniacal, proporcional a la severidad del fuego. Estos niveles elevados únicamente persistieron durante un mes y, con las primeras lluvias, el descenso fue generalizado. Por su parte, el contenido en nitrógeno nítrico muestra un acusado descenso siete meses después de la quema y un nuevo aumento a los diez meses. Estas oscilaciones fueron más acusadas en las parcelas que recibieron un tratamiento con moderada y alta severidad de fuego. Esta variación temporal de la concentración de nitratos en el suelo, meses después del impacto del fuego, se atribuyó a las fluctuaciones de humedad y temperatura del medio edáfico (Gimeno García, 1999; Gimeno García *et al.*, 2002).

Uno de los efectos más habituales del fuego en las propiedades edáficas es la alteración de la **materia orgánica**. El impacto del fuego afecta tanto a su contenido como a su composición (González Pérez *et al.*, 2004). El grado de alteración estará determinado por la severidad y duración del fuego, el tipo de fuego (de copas, superficial, subterráneo) y, también, por las características específicas de las condiciones locales (v.gr, composición de la vegetación, topografía, contenido de humedad de la materia orgánica). Al participar un número tan elevado de factores las consecuencias del fuego en esta propiedad edáfica son muy variables. Está aceptado que el contenido de materia orgánica del suelo no varía de forma apreciable hasta los 170°C, un ligero descenso se hace evidente a los 220°C mientras que con temperaturas superiores a 460°C la combustión de la materia orgánica es casi total (Campo *et al.*, 2008). Sin duda, la destrucción, por combustión, de la materia orgánica tiene consecuencias inmediatas a corto plazo sobre la estructura del suelo, la estabilidad de los agregados, la porosidad y la capacidad de infiltración y de retención hídrica (Andreu *et al.*, 2001). Estas variables

son muy importantes en los procesos hidrológicos y erosivos. En unos casos, la cantidad de materia orgánica suele disminuir después de un incendio de alta severidad si el fuego ha afectado directamente a los horizontes más superficiales. Sanroque *et al.* (1985) observaron, en suelos quemados de la provincia de Valencia, que el porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial disminuyó entre un 20 y un 30%. En cambio, en incendios de baja o moderada severidad puede aumentar el contenido en materia orgánica consecuencia de la incorporación al suelo de vegetación parcialmente quemada o por la acumulación de materiales carbonizados tras el paso del fuego, tal y como se detectó tanto en las parcelas experimentales de Porta Coelli (Andreu *et al.*, 1996) como en las de La Concordia (Gimeno García, 1999; Campo *et al.*, 2008). El fuego, además de modificar la cantidad de materia orgánica, provoca cambios en sus propiedades. Las modificaciones serán más o menos intensas en función de la temperatura alcanzada y del tiempo que dure el evento. Los efectos del fuego en la composición de la materia orgánica es un tema complejo que aporta pocos estudios (v.gr., Mayor *et al.*, 2016) en el marco territorial de la Comunidad Valenciana.

La **estabilidad de los agregados**, parámetro indicativo de la **estructura del suelo**, es uno de los factores que más influyen sobre la erosionabilidad del medio edáfico, condicionando tanto la infiltración como la resistencia del suelo a la erosión. Por este motivo, el análisis de esta propiedad es fundamental para controlar los procesos erosivos en la gestión posterior al incendio (Campo *et al.*, 2022). En incendios de alta severidad la respuesta de los agregados es compleja de evaluar y existen discrepancias en la literatura científica ya que hay muchos factores implicados (por ejemplo, contenido en materia orgánica, mineralogía de la fracción arcilla o hidrofobicidad) que pueden condicionar diferentes patrones de respuesta. En unos casos se ha detectado una reducción de la estabilidad de los agregados relacionado con la destrucción de la materia orgánica, sobre todo cuando ésta es

el principal agente cementante de los agregados (Sanroque *et al.*, 1985; Cerdà, 1993; Campo *et al.*, 2014). Molina *et al.* (1994) observaron en un suelo quemado, después de un incendio de baja severidad acaecido en marzo de 1990, un descenso en la estabilidad de los agregados, entre septiembre de 1990 y marzo de 1991, coincidiendo con las precipitaciones de otoño. Mientras, en la parcela adyacente sin quemar la estabilidad estructural del suelo no experimentó ninguna variación durante el año posterior al incendio. Las parcelas estaban ubicadas en Andilla (Valencia) y el suelo se clasificó como Calcisol háplico (FAO-UNESCO, 1988). La diferencia se relacionó con el efecto más intenso de los procesos de humectación/secado en el suelo quemado desprovisto de vegetación. El contenido en materia orgánica apenas varió ni en el suelo quemado ni el no afectado.

Al aumentar la severidad del incendio el descenso en la estabilidad de agregados es más acusado tal y como detectaron Mataix Solera *et al.* (2002). Este trabajo se efectuó un año después del incendio de 1994 en tres suelos calcáreos de Alcoy (Alicante) afectados por un fuego de superficie en comparación con otra zona que había sufrido un incendio de copa en una masa de *Pinus halepensis*. En los suelos que sufrieron una severidad del fuego más elevada el contenido en materia orgánica disminuyó y, como consecuencia, la destrucción de agregados. Por tanto, el tipo de incendio y la severidad del fuego afectarán de manera diferente tanto a la materia orgánica como a la estructura del suelo. Sin embargo, en otros casos, algunos autores han encontrado el patrón opuesto: aumento, aunque sea pequeño, en la estabilidad de los agregados en los suelos quemados en comparación con los valores de los suelos de las zonas control sin quemar (Guerrero *et al.*, 2001; Mataix Solera y Doerr, 2004; Llovet *et al.*, 2009; Jiménez Pinilla, 2016). Por ejemplo, Arcenegui *et al.* (2008) concluyeron que la estabilidad de los agregados, en todas las fracciones, era mayor en los suelos quemados, después de estudiar 10 áreas de la provincia de Alicante que habían sufrido incendios entre 2003 y 2006. El

incremento en la estabilidad de agregados en las muestras tomadas en áreas quemadas puede deberse a la combinación de diferentes factores. Por un lado, el tipo de incendio: cuando el fuego no afecta directamente al suelo (incendios de copa) puede aumentar el contenido en materia orgánica al incorporarse material semipirolizado procedente de la vegetación (Arcenegui, 2008). Esta situación explicaría un aumento de la estabilidad de los agregados a medio y largo plazo. Otra posible explicación es la presencia de compuestos hidrofóbicos que puede favorecer un aumento en la estabilidad de los agregados (Mataix Solera y Doerr, 2004; Arcenegui *et al.*, 2008). También, el calentamiento del suelo puede modificar la mineralogía de la fracción arcilla formando agregados más estables (Guerrero *et al.*, 2001). Otra posible interpretación es que el fuego, por la combustión de la materia orgánica, destruya una proporción de los agregados, pero sin afectar a los más resistentes. De este modo, puede que al muestrear en una zona recién quemada solo se estén seleccionando los agregados más resistentes, aquéllos que han resistido la acción del fuego en el suelo. En estos casos el aumento de la estabilidad observado podría ser únicamente aparente, siendo necesario verificar el aumento real de la estabilidad estructural mediante experimentos posteriores en laboratorio (Mataix Solera *et al.*, 2011).

En determinadas circunstancias, algunos suelos pueden presentar **hidrofobicidad** o **repelencia al agua**. La acumulación de sustancias hidrofóbicas en los primeros centímetros del medio edáfico puede dificultar considerablemente la infiltración, aumentar la escorrentía superficial y acelerar la erosión hídrica. Por tanto, la persistencia y la distribución espacial de la hidrofobicidad es un factor clave en la dinámica de la escorrentía en los suelos quemados. Los suelos ácidos y de textura arenosa son más susceptibles a desarrollar repelencia al agua (Mataix Solera y Doerr, 2004), pero ésta también puede aparecer en suelos calcáreos (Cerdà y Doerr, 2005; Bodí, 2012). En 10 áreas de la provincia de Alicante afectadas por incendios forestales entre

2003 y 2006 se analizaron, en condiciones de laboratorio, 200 muestras superficiales y concluyeron que, inmediatamente después del incendio, el 74% de las muestras quemadas presentaban hidrofobicidad, mientras en las muestras sin quemar solo el 33% fueron clasificadas como hidrofóbicas (Arcenegui *et al.*, 2008). En suelos forestales quemados de la provincia de Alicante, los factores que influyen en la hidrofobicidad son la severidad del fuego, las propiedades intrínsecas del suelo (por ejemplo, contenido en materia orgánica, textura y mineralogía de la fracción arcilla) y el tipo de vegetación y la cantidad de restos vegetales (Arcenegui, 2008). La influencia de tantos factores explica que esta propiedad sea muy variable tanto en el espacio como en el tiempo. En relación con el primer factor, en experimentos de laboratorio se ha demostrado que si la temperatura alcanzada en el suelo es entre 200 y 350°C la hidrofobicidad se intensifica. En cambio, disminuye si la temperatura registrada supera los 350°C y entre los 400 y 500°C se destruyen los compuestos hidrofóbicos, desapareciendo la repelencia al agua (Arcenegui *et al.*, 2007). Estos rangos de temperatura pueden variar de unos suelos a otros.

Otro factor que condiciona la repelencia al agua es la vegetación que marcará un patrón heterogéneo y muy dependiente de la especie vegetal. En general, la forma en que distintas especies vegetales favorecen o no la hidrofobicidad está muy relacionada con el tipo de vegetación, la cantidad de combustible quemado y la mayor o menor presencia de resinas, ceras o aceites aromáticos acumulados en el suelo (Arcenegui, 2008). En la Sierra de la Creu, en el término municipal de Les Useres (Castellón), tras un incendio forestal en 2007 se detectó que el fuego provocó, en un Leptosol Réndzico (FAO, 2006) desarrollado sobre calizas cretácicas, un aumento significativo de la repelencia al agua en muestras tomadas bajo *Rosmarinus officinalis*, mientras en las microparcelas quemadas en las que predominaba *Quercus coccifera* el fuego destruyó la hidrofobicidad (Gimeno García *et al.*, 2011). Actualmente esta investigación es de los po-

cos trabajos que han estudiado las consecuencias de los incendios en los suelos forestales de la provincia de Castellón. En un suelo calcáreo no quemado, Lithic Xerorthent (Soil Survey Staff, 1998) desarrollado sobre calizas jurásicas, de la Sierra de la Taja, cerca de Pino-so (Alicante), Mataix Solera *et al.* (2007) detectaron que el 20% de las 160 muestras analizadas en 2004 presentaban hidrofobicidad y esta propiedad era mayor en muestras tomadas bajo pino carrasco (*Pinus halepensis*) y coscoja (*Quercus coccifera*) en comparación con otras especies vegetales como romero (*Rosmarinus officinalis*) o enebro (*Juniperus oxycedrus*). En otro estudio desarrollado en dos suelos forestales de la provincia de Alicante también se estudió el grado de hidrofobicidad en función del tipo de vegetación y concluyeron que *Pinus halepensis* y *Rosmarinus officinalis* producían más sustancias hidrofóbicas en el medio edáfico que el *Brachypodium retusum* (Arcenegui *et al.*, 2007). En un trabajo desarrollado en condiciones de campo en Gorga (Alicante), después de un incendio en julio de 2011, observaron que el fuego produjo un incremento considerable de la repelencia al agua en parcelas quemadas bajo pinar (100% de las muestras fueron hidrofóbicas) en comparación con el 66% de las muestras tomadas en las parcelas control. En las parcelas bajo matorral el aumento fue menos evidente, sin apenas diferencias significativas (Jiménez Pinilla *et al.*, 2016a).

Un tercer factor fundamental son las propiedades específicas de cada suelo que determinarán la presencia e intensidad de la hidrofobicidad en los suelos quemados. En determinados suelos, el contenido de materia orgánica, la textura y el tipo de mineralogía son algunos de los factores que pueden evitar la aparición de la hidrofobicidad (Arcenegui *et al.*, 2007; Mataix Solera *et al.*, 2008). Así, dos suelos forestales alicantinos muestreados en Rellu (Regosol Calcárico -FAO, 1998-) y en el Parque Natural del Montgó (Luvisol Crómico -FAO, 1998-) mostraron un comportamiento diferenciado en el laboratorio. Antes del calentamiento los dos suelos eran hidrofílicos; después del calentamiento solo el Regosol Calcárico desarrolló

repelencia al agua. Este último suelo presentaba un mayor contenido en materia orgánica y una textura gruesa, con menor presencia de arcilla (Arcenegui *et al.*, 2007). En el norte de la provincia de Alicante se muestrearon 12 emplazamientos forestales, un tercio de ellos correspondientes al Montgó, con un mismo tipo de suelo clasificado como Luvisol crómico (FAO, 2006) o Lithic Rhodoxeralf/Lithic Haploxeralf (Soil Survey Staff, 2006), suelos conocidos en las regiones mediterráneas como *Terra rossa* por su rubefacción. Después de experimentos controlados en laboratorio el estudio concluyó que este tipo de suelo es muy poco susceptible a desarrollar repelencia al agua por un menor contenido en materia orgánica y mayor presencia de arcilla en comparación con otros suelos forestales de la provincia de Alicante y, sobre todo, por la gran presencia de la caolinita en la fracción arcilla (Mataix Solera *et al.*, 2008). Un trabajo posterior desarrollado

en dos áreas forestales quemadas en 2008 en Liber y Pinoso (Alicante) y en tres en Monte Carmel (Israel) confirmó el comportamiento de la *Terra rossa* ante la hidrofobicidad, reafirmando los factores destacados en los estudios precedentes en la preservación del carácter hidrofílico del suelo: contenido en materia orgánica, contenido en arcilla y la mineralogía de la fracción arcilla (Mataix Solera *et al.*, 2013). En la misma provincia de Alicante, en zonas quemadas de Pinoso y La Torre de les Maçanes se observaron pequeñas diferencias en algunas propiedades de los suelos, clasificados, según Soil Survey Staff (2006), en el primer caso como Lithic Xerorthent y Typic Xerorthent en el segundo caso, que controlan, en parte, el desarrollo y persistencia de la hidrofobicidad. Así, en muestras de suelo quemadas en laboratorio éstas variaban, de manera muy significativa, entre hidrofílicas a muy repelentes al agua. La propiedad principal que controló el



Figura 2: Andilla (Los Serranos, Valencia). Cenizas post-incendio. Septiembre 2013. Fotografía de Ester Carbó Valverde.

Figure 2: Andilla (Los Serranos, Valencia). Post-fire ashes. September 2013. Photograph by Ester Carbó Valverde.

En prensa

comportamiento hidrofóbico del suelo fue la textura y, en concreto, el contenido de arena (Mataix Solera *et al.*, 2014).

Otra línea de investigación estudia el papel de las cenizas en los suelos afectados por incendios y si éstas pueden ser hidrofóbicas (Figura 2). Así, se han estudiado las variaciones espaciales y temporales de la repelencia al agua, medida en campo, en 4 cuencas de la Sierra de Enguera (Valencia) afectada por cuatro incendios forestales desde 1979, analizando cómo la presencia de la repelencia al agua varía a lo largo del año en función de la humedad del suelo (Bodí *et al.*, 2013) y comprobando que las cenizas afectan a la presencia y persistencia de la hidrofobicidad después de incendios forestales de baja severidad (Bodí, 2012). También se ha trabajado en relacionar la repelencia al agua de las cenizas con el contenido de carbono orgánico total y el color, indicadores del grado de combustión de la vegetación. Este último estudio experimentó en campo y laboratorio con muestras, tomadas en 2008 después de incendios de diferente severidad, en Navalón, Albaida (provincia de Valencia), Líber y Pinoso (provincia de Alicante) y concluyeron que la especie vegetal y la mayor o menor severidad de la combustión son factores que influyen en las propiedades hidrofílicas o hidrofóbicas de las cenizas resultantes (Bodí *et al.*, 2011). Este campo de trabajo ha llevado implícito el estudio pormenorizado de las características físicas y químicas de las cenizas mediante análisis termogravimétrico (Dlapa *et al.*, 2015) o la aplicación de Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier (Dlapa *et al.*, 2013). En Gorga (Alicante), además de estudiar, en laboratorio, la influencia de la humedad relativa del aire en la repelencia al agua en suelos afectados por el fuego (Jiménez Pinilla *et al.*, 2016a), se efectuó un seguimiento durante dos años (Julio 2011-Julio 2013) para analizar cómo repercute la presencia o ausencia de las cenizas en la evolución temporal de la hidrofobicidad del suelo, en este caso Lithic Xerorthent (Soil Survey Staff, 2014), en parcelas quemadas y sin quemar, incorporando también el análisis del mayor o menor impacto en el proceso de di-

ferentes cubiertas vegetales (Jiménez Pinilla *et al.*, 2016b). Más novedoso es el análisis de las consecuencias del fuego sobre el contenido en glomalina, una glicoproteína producida principalmente por los hongos micorrízicos arbusculares, en ocho suelos representativos de la provincia de Alicante (Lozano, 2015). En esta línea de trabajo, aunque los resultados son todavía preliminares, se ha estudiado, en campo y laboratorio, los efectos inmediatos, en parcelas instaladas en Gorga y Gata de Gorgos (Alicante), y a medio plazo, parcelas de Gata de Gorgos, de los incendios forestales sobre el contenido en glomalina del suelo en función de dos tipos de cubierta vegetal (pinar y matorral). También se ha estudiado la relación entre la glomalina y la repelencia al agua (Lozano *et al.*, 2016a y 2016b).

3.2. Consecuencias hidrológicas y erosivas

Los incendios provocan cambios en la capacidad de infiltración del suelo e intensifican los procesos erosivos (García Ruiz y López Bermúdez, 2009). La hidrología del suelo se modifica fruto de la acumulación de sustancias hidrofóbicas en la superficie del medio edáfico, la reducción o destrucción de la materia orgánica, la disminución de la porosidad y estabilidad de los agregados, el sellado del suelo por cenizas y, sobre todo, por la eliminación de la cubierta vegetal (Figuras 3 y 4). El incremento de la escorrentía y la erosión lleva aparejado la pérdida de nutrientes del suelo (Andreu *et al.*, 1996). Un buen número de estudios que comparan entre parcelas quemadas y otras sin quemar (parcelas control) han comprobado que la producción de escorrentía superficial (al disminuir tanto la interceptación como la capacidad de infiltración del medio edáfico) y la pérdida de suelo aumentan tras los incendios. El principal efecto del fuego sobre la erosión y la cantidad de sedimento producido va a depender de la severidad del incendio tal y como ya pusieron de manifiesto Rubio *et al.* (1997) cuando estudiaron las consecuencias del incendio (agosto de 1992) en la Sierra Calderona, entre los límites provinciales de Castellón y Valencia.



Figura 3: Ontinyent (Valencia). Paisaje tras el incendio. 2010. Fotografía de Eugenia Gimeno García.
Figure 3: Ontinyent (Valencia). Post-fire landscape. 2010. Photograph by Eugenia Gimeno García.



Figura 4: Pla de Pavía, Sierra Calderona (Valencia). Paisaje tras el incendio. 2008. Fotografía de Eugenia Gimeno García.
Figure 4: Pla de Pavía, Sierra Calderona (Valencia). Post-fire landscape. 2008. Photograph by Eugenia Gimeno García.

En prensa

In press

Inmediatamente después del incendio las tasas de escorrentía y erosión son muy pequeñas, debido a la capa de cenizas que cubre el medio edáfico. Esta es la principal conclusión de un experimento con lluvia simulada efectuado en la Sierra Calderona (Valencia) después del incendio de agosto de 2004. El efecto protector de las cenizas es mayor en los suelos que, además de cenizas, tienen restos de vegetación quemada y acículas (Cerdà y Doerr, 2008). La capa de cenizas, además de reducir o retrasar la escorrentía superficial debido a su elevada capacidad de almacenamiento de agua, también protegen el suelo del impacto de las gotas de lluvia (*splash*) y de la erosión laminar (Bodí, 2012). En la estación experimental El Teularet (Sierra de Enguera, Valencia) han utilizado el color de la ceniza como indicador de la severidad del fuego y su influencia en la infiltración y la escorrentía. Incendios de alta severidad generan cenizas blancas consecuencia de la combustión total de la vegetación, mientras que los incendios menos severos producen cenizas negras resultado de una combustión parcial de la vegetación. En El Teularet, después de 54 experimentos con simulación de lluvia efectuados en julio y agosto de 2010, detectaron que en los suelos cubiertos con cenizas negras la infiltración fue mayor que en los suelos cubiertos con cenizas blancas y, por tanto, en estas últimas parcelas, la tasa de escorrentía se duplicó (León *et al.*, 2013). Tras la pérdida de las cenizas o su encostramiento hay un aumento sustancial de las tasas de escorrentía y erosión que se van reduciendo con la recuperación de la vegetación en las zonas quemadas. Esta característica se observó en Bolbens (Valencia) después de un seguimiento invernal, mediante simulación de lluvia, entre 1990 y 1995. Así, a lo largo de esos años las tasas de infiltración aumentaron paulatinamente y, al mismo tiempo, disminuyó la escorrentía superficial; el coeficiente de escorrentía pasó del 45% en 1990 al 6% cinco años después (Cerdà, 1998a). Por tanto, a corto plazo las cenizas juegan un papel muy importante en la hidrología de las zonas afectadas por incendios y pueden influir en la buena regeneración de la cubierta vegetal post-incendio.

En Pedralba (Valencia), Calvo y Cerdà (1994) estudiaron la capacidad de infiltración y la erosión después de un incendio forestal ocurrido en julio de 1990. El trabajo se efectuó en cinco parcelas, mediante experimentos de campo con simulación de lluvia repetidas un día, cuatro meses y un año después de finalizar el incendio. En los resultados obtenidos la concentración de sedimentos y la tasa de erosión mostraron una tendencia decreciente a lo largo del periodo de análisis. En el sur de la provincia de Valencia (Canals y Genovés) también se comprobó, con lluvia simulada, que las laderas sur son las que generan mayor cantidad de sedimentos tras los incendios, aspecto que relacionaron con el grado de estabilidad de los agregados (Cerdà *et al.*, 1995). A una conclusión similar, las exposiciones sur aportan mayor escorrentía y pérdidas de suelo, llegaron Andreu *et al.* (2001), en un trabajo efectuado en la Sierra Calderona (provincia de Valencia), y Llovet (2005) en las parcelas experimentales localizadas en Sotorroni, perteneciente al término municipal de Alcoy. En este último experimento los suelos desarrollados sobre margas desde el primer momento aportaron una producción de escorrentía y arrastre de sedimentos muy superiores a los suelos formados a partir de dolomías. En los suelos desarrollados a partir de margas la orientación condicionó la respuesta hidrológica; la degradación post-incendio fue mayor en las laderas sur.

En las parcelas de la estación experimental de La Concordia la escorrentía y las tasas de erosión después de la quema controlada estuvieron muy relacionadas con la severidad del fuego. Así, la pérdida de suelo fue más elevada en la parcela en la que la severidad fue mayor. Un seguimiento temporal (agosto 1995-diciembre 1996) después de la quema detectó que hubo un aumento importante de la tasa de erosión durante los cuatro meses posteriores al incendio, precisamente durante el otoño cuando las precipitaciones fueron más intensas y favorecieron una mayor escorrentía superficial y el consiguiente arrastre de suelo (Gimeno García *et al.*, 2000; González Pelayo *et al.*, 2006). Un análisis pos-

terior a una segunda quema controlada realizada en 2003 también detectó, después de estudiar 37 eventos lluviosos que generaron escorrentía entre 2002 y 2004, la susceptibilidad del suelo ante la erosión justo después del incendio si tienen lugar lluvias torrenciales con alta capacidad erosiva (Campo *et al.*, 2006; Gimeno García *et al.*, 2007; González Pelayo *et al.*, 2010). Este comportamiento se mantuvo pasado el tiempo: durante el periodo 2003-2007 las tasas de erosión en las parcelas quemadas de La Concordia seguían dependiendo de la intensidad de las precipitaciones (González Pelayo, 2011). Cerdà (1998b) concluyó que después de un incendio, en agosto de 1990, localizado al oeste del término municipal de Valencia, la escorrentía y erosión fueron insignificantes, consecuencia de una tasa de infiltración elevada gracias a la presencia de cenizas y a la sequedad del suelo. Por el contrario, cuatro meses más tarde el coeficiente de escorrentía aumentó casi hasta el 60%, con el consiguiente incremento de la tasa de erosión. De este modo, más del 90% de la exportación de sedimentos durante 5 años se produjo durante el otoño posterior al incendio.

En la provincia de Alicante se han realizado diferentes experimentos, mediante simulación de lluvia, para estudiar los efectos en la infiltración y el arrastre de sedimentos ocasionados por el fuego. Los resultados son dispares. En las parcelas de Albufera se efectuó una quema experimental en 1989 con fuego de corta duración y baja severidad. La escorrentía y producción de sedimentos después del incendio fueron muy pequeñas en comparación con los valores alcanzados los años previos a la quema (Sánchez Montahud *et al.*, 1994; Sánchez Montahud, 1997). En las parcelas de Benidorm la variabilidad de la erosión después del incendio fue muy alta, sin poder precisar un patrón de comportamiento (Bautista, 1999). En experimentos posteriores realizados también en Benidorm compararon zonas no quemadas de otras recién quemadas, no habiendo cambios significativos en la infiltración, aunque el inicio de la escorrentía fue más rápido en las parcelas quemadas. La

capacidad de infiltración disminuyó de manera considerable en las zonas afectadas por el fuego tras el periodo otoñal, aumentando el arrastre de sedimentos. En general, la pérdida de suelo por escorrentía superficial fue superior en la ladera quemada respecto a la zona no afectada por el fuego, aunque las diferencias no son muy llamativas (Llovet, 2005).

En la Sierra de Onil (Alicante) se efectuó un experimento con lluvia simulada sobre un Typic calcixeroll (Soil Survey Staff, 1990) desarrollado a partir de margas miocenas (García Cano *et al.*, 2000). En tres laderas contiguas se delimitó, en cada una de ellas, una parcela control con la vegetación original no alterada. A continuación, se delimitaron en las mismas laderas dos parcelas con las mismas dimensiones (30 x 30 m) en las que realizaron tres quemas controladas en octubre de 1996. Tanto en las parcelas quemadas como en las no alteradas se seleccionaron microparcelas (2 x 2 m) donde se efectuaron las simulaciones de lluvia en condiciones de precipitación torrencial. La escorrentía, en las parcelas quemadas, se produjo de forma casi inmediata tras comenzar la simulación, con un coeficiente medio del 23%. En las parcelas no quemadas el promedio global del coeficiente de escorrentía fue del 4%. En las parcelas no alteradas por la quema experimental, a pesar de la gran intensidad de la lluvia, la pérdida de suelo es inapreciable, mientras en las parcelas quemadas alcanzó valores muy elevados entre 300 y 8.420 Mg ha⁻¹. La severidad del incendio determinó los resultados: la parcela con mayor erosión fue en las que se alcanzó una temperatura más elevada (De Luis *et al.*, 2003). Además, las parcelas con mayor erosión tuvieron una peor recuperación vegetal posterior al incendio (De Luis *et al.*, 2005).

En la Sierra de Xortà (Alicante) se realizó un trabajo, a escala de cuenca, para estudiar los efectos hidrológicos y erosivos de un incendio, muy severo, acaecido en agosto de 1998. La medición de la escorrentía y de los sedimentos se efectuó entre 1999 y 2005 (Mayor *et al.*, 2007). El seguimiento temporal se llevó a cabo en dos cuencas, una que-

mada (2,1 ha) y otra no quemada (22,9 ha) en las que el suelo dominante es un Cambisol Calcárico (FAO, 2001) desarrollado sobre margas. Topográficamente, las dos cuencas son muy abruptas. Después del incendio se registraron 31 eventos con escorrentía en la cuenca quemada y solo 13 en la no quemada. A pesar del distinto tamaño de las cuencas, tanto la escorrentía como la producción de sedimentos fueron significativamente más elevadas en la cuenca quemada durante los tres primeros años, disminuyendo progresivamente a partir de ese momento. Sin embargo, en el quinto año después del incendio las diferencias en cuanto a la escorrentía anual y la producción de sedimentos entre las dos cuencas era de dos órdenes de magnitud. Además, la recuperación de la vegetación fue muy lenta en la cuenca quemada. En el sexto año tras el fuego la cubierta era todavía inferior (78%) en relación con la cuenca no quemada (97%). Las diferencias se achacaron a la severidad del incendio y a la sequía que experimentaron las cuencas durante los dos primeros años. El seguimiento puso también de manifiesto la importancia que tienen las tormentas individuales de gran intensidad para desencadenar episodios extraordinarios de arroyada post-incendio. Así, cuando el suelo todavía estaba desprovisto de vegetación, dos tormentas ocasionaron dos terceras partes de la escorrentía total generada después del incendio y, un único episodio tormentoso, produjo más del 75% de los sedimentos recogidos durante todo el periodo de estudio.

La magnitud de las tasas de erosión es muy variable. Las primeras estimaciones de pérdidas de suelos en la Comunidad Valenciana se realizaron aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE en su acrónimo en inglés), modelo cuantitativo indirecto de tipo paramétrico. Un buen ejemplo es el trabajo realizado en tres emplazamientos del interior de la provincia de Valencia (Forata, La Peraleja y Los Yegüeros) comparando áreas quemadas con las zonas control, con unas tasas de erosión entre 16 y 84 veces mayores en las zonas incendiadas (Sanroque *et al.*, 1985). La

aplicación más reciente (Giovanardi, 2016) en once cuencas de la Muela de Cortes de Pallás (Valencia) estimó la producción de sedimentos para el periodo 1985-1998. La estimación de las tasas de erosión con la USLE no fue igual en cada cuenca, pero, en la mayor parte de los casos, la sobrestimación fue considerable, ya que la producción de sedimentos después de los incendios se incrementó más de cuatro veces. Por tanto, aplicando la USLE los resultados finales están sobredimensionados, exagerando las tasas reales de erosión. Este hecho, en gran medida, estimuló, desde comienzos de la década de los noventa del siglo pasado, el estudio mediante parcelas experimentales, tanto abiertas como cerradas, o las experimentaciones con lluvia simulada cuyos resultados han matizado los valores tan elevados de pérdida de suelo que se han estimado aplicando la USLE. En estos últimos casos las tasas de erosión son mucho más bajas y no suelen ser superiores a 10 Mg ha⁻¹ (Bodí, 2012).

Por último, la recuperación de las tasas de escorrentía y erosión previas al incendio también varían dependiendo de la zona de estudio. Así, en una investigación sobre la evolución de la erosión durante 11 años después de un incendio en Serra Grossa (Valencia), Cerdà y Doerr (2005) concluyeron que las tasas, con matices, se recuperaron a los dos años. Sin embargo, la recuperación puede ser mayor y, de este modo, puede durar 6-7 años en la Sierra de Xortà (Mayor *et al.*, 2007) u 8 años en las parcelas de la estación experimental de La Concordia (Gimeno García *et al.*, 2007). Sin lugar a duda, la rapidez con que se recupere la vegetación es uno de los factores más importantes para determinar tanto la intensidad como la duración de los procesos erosivos. La recolonización vegetal puede reducir, en poco tiempo, la escorrentía y la erosión a niveles próximos a los anteriores al incendio. La Figura 5 muestra un ejemplo de regeneración post-incendio en la Sierra de Alcotas (provincia de Valencia). El suelo es un Leptosol Léptico (Crómico) (FAO, 2006) desarrollado sobre calizas jurásicas (Sánchez Díaz *et al.*, 2018).



Figura 5: Higuieruelas (Valencia). Regeneración post-incendio. 2014. Fotografía de Juan Sánchez Díaz.
Figure 5: Higuieruelas (Valencia). Post-fire regeneration. 2014. Photograph by Juan Sánchez Díaz.

4. Conclusiones

Los efectos que provocan los incendios forestales en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Comunidad Valenciana y sus repercusiones hidrológicas y erosivas han sido estudiados, durante las últimas cuatro décadas, por diferentes grupos de trabajo que han contribuido a la mejora del conocimiento científico. Las investigaciones se han efectuado principalmente, desde un punto de vista territorial, en las provincias de Alicante y Valencia; solo dos publicaciones reflejan las consecuencias de los incendios en los suelos forestales de Castellón. Esta distribución territorial de la producción científica está condicionada, en gran medida, por la propia ubicación física de los centros de investigación. En los últimos años han comenzado a estudiarse el impacto del

fuego a corto, medio y largo plazo en las propiedades bioquímicas y microbiológicas del medio edáfico, aunque los resultados no son concluyentes y la información publicada es todavía muy escasa. Los incendios alteran las propiedades químicas (pH, salinidad, balance de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico) de los suelos quemados. Estos cambios están provocados, en gran medida, por la combustión de la materia orgánica y por el aporte de cenizas. Las alteraciones son transitorias, recuperando el estado previo al fuego en unas semanas o meses, dependiendo de la mayor o menor severidad del incendio. El fuego afecta al contenido y composición de la materia orgánica. La intensidad en las modificaciones que puede experimentar este componente esencial del suelo dependerá, sobre todo, del tipo de fuego y de la duración y severidad del incendio.

Las consecuencias del fuego en la estructura del medio edáfico y en la hidrofobicidad son las dos principales propiedades físicas estudiadas en la Comunidad Valenciana, tanto en suelos afectados por incendios como en quemadas en parcelas experimentales o quemadas controladas en laboratorio. En relación con el comportamiento de los agregados en incendios de alta severidad no hay unanimidad en la literatura científica. En unas ocasiones se ha observado una disminución de la estabilidad de los agregados debido, principalmente, a la desaparición de la materia orgánica del suelo. En otras investigaciones, desarrolladas sobre todo en la provincia de Alicante, la respuesta de los agregados en los suelos quemados es diferente, con un aumento en su estabilidad. En estos casos los factores implicados son diversos: por ejemplo, aumento del contenido en materia orgánica, cambios en la mineralogía de la fracción arcilla o presencia de sustancias hidrofóbicas. En relación con la repelencia al agua en suelos afectados por el fuego no hay grandes discrepancias científicas. Los principales factores que influyen en la mayor o menor presencia de la hidrofobicidad son la severidad del incendio; el tipo de vegetación y la cantidad de restos vegetales quemados; las propiedades específicas de cada tipo de suelo (contenido en materia orgánica, textura y mineralogía de la fracción arcilla) y la naturaleza hidrofílica o hidrofóbica de las cenizas generadas por el incendio.

En general, en las zonas quemadas respecto a las sin quemar se ha medido, con métodos diferentes, un aumento considerable en la producción de escorrentía superficial, al disminuir la interceptación y la capacidad de infiltración del medio edáfico, y también un aumento de la pérdida de suelo, tanto a escala de parcela como de cuenca. La magnitud de las tasas dependerá de la severidad del incendio. En los momentos iniciales posteriores al incendio las tasas son pequeñas gracias al papel protector que ejerce la capa de cenizas que cubre el suelo, aunque esta protección de las cenizas es temporal y de corta duración. El encostramiento o la eliminación de las cenizas aumentarán sustancialmente los coeficientes de escorren-

tía y las tasas de erosión durante los primeros meses después de los incendios, sobre todo cuando éstos se han producido en verano. Las características de las lluvias de otoño pueden favorecer, con un número reducido de eventos tormentosos muy intensos, una mayor escorrentía superficial y la consiguiente pérdida de suelo. El ritmo de recuperación de la vegetación en las zonas quemadas marcará la reducción de las tasas de escorrentía y erosión a niveles previos al incendio

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales de la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural (Generalitat Valenciana).

Bibliografía

- Andreu, V., Rubio, J.L., Forteza, J., Cerni, R. (1996). Postfire effects on soil properties and nutrient losses. *International Journal of Wildland Fire*, 6 (2), 53-58. <https://doi.org/10.1071/WF9960053>
- Andreu, V., Gimeno-García, E., Rubio, J.L. (1998). Effect of forest fire intensity in the evolution of some soil chemical properties. En: C.A. Brebbia, J.L. Rubio, J.L. Usó, (Eds.), *Risk Analysis*. Wit Press, Southampton, 17-27.
- Andreu, V., Imeson, A.C., Rubio, J.L. (2001). Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44 (1), 69-84. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00177-6)
- Andreu, V., Gimeno-García, E., González-Pelayo, O., Campo, J., Rubio, J.L. (2010). Respuesta hidrológica y erosiva de un suelo forestal mediterráneo en recuperación de diferentes impactos. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 165, 29-53. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165002>
- Añó Vidal, C., Sánchez Díaz, J. (2014). Distribución geográfica e institucional de la producción científica sobre erosión hídrica en España (1955-2004). *Cuaternario y Geomorfología*, 28 (1-2), 51-61.
- Arcenegui, V. (2008). Hidrofobicidad en suelos afectados por incendios forestales y desarro-

llo de una nueva técnica para estimar las temperaturas alcanzadas en suelos quemados. Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández, Elche, 73 pp.

- Arcenegui, V., Mataix Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mayoral, A. M., Morales, J. (2007). Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. *European Journal of Soil Science*, 58 (6), 1254-1259. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00917.x>
- Arcenegui, V., Mataix Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix Beneyto, J., García Orenes, F. (2008). Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 74 (3), 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.12.008>
- Arcenegui, V., Mataix Solera, J., Zornoza, R., Pérez Bejarano, A., Mataix Beneyto, J., Gómez, I. (2010). Estimation of the maximum temperature reached in burned soils using near-infrared spectroscopy: Effects of soil sample pre-treatments. *Geoderma*, 158 (1-2), 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.007>
- Bautista, S. (1999). Regeneración post-incendio de un pinar (*Pinus halepensis*, Miller) en ambiente semiárido. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, 238 pp.
- Bodí, M.B. (2012). Efectos de las cenizas y la repelencia al agua en la hidrología de suelos afectados por incendios forestales en ecosistemas mediterráneos. Tesis Doctoral, Universitat de València, Valencia, 187 pp.
- Bodí, M.B., Mataix Solera, J., Doerr, S.H., Cerdà, A. (2011). The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma*, 160 (3-4), 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009>
- Bodí, M.B., Muñoz Santa, I., Armero, C., Doerr, S.H., Mataix Solera, J., Cerdà, A. (2013). Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena*, 108, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.002>
- Calvo, A., Cerdà, A. (1994). An example of the changes in the hydrological and erosional response of soil after a forest fire, Pedralba (Valencia), Spain. En: M. Sala, J.L. Rubio, (Eds.), *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, 99-110.
- Campo, J. (2012). Efectos de incendios experimentales repetidos en la agregación del suelo y su evolución temporal. Tesis Doctoral, Universitat de València, Valencia, 649 pp.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González-Pelayo, O., Rubio, J.L. (2006). Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. *Geomorphology*, 82 (3-4), 376-387. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.014>
- Campo, J., Gimeno-García, E., Andreu, V., González-Pelayo, O., Rubio, J.L. (2008). Aggregation of under canopy and bare soils in a Mediterranean environment affected by different fire intensities. *Catena*, 74 (3), 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.05.002>
- Campo, J., Gimeno-García, E., Andreu, V., González-Pelayo, O., Rubio, J.L. (2014). Cementing agents involved in the macro- and microaggregation of a Mediterranean shrubland soil under laboratory heating. *Catena*, 113, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.002>
- Campo, J., Cammeraat, E.L.H., Gimeno-García, E., Andreu, V. (2022). Soil and organic carbon redistribution in a recently burned Mediterranean hillslope affected by water erosion processes. *Geoderma*, 406, 115539. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115539>
- Cerdà, A. (1993). Incendios forestales y estabilidad de los agregados. *Cuadernos de Geografía*, 53, 1-16.
- Cerdà, A. (1995). Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos. Geoforma Ediciones, Logroño, 151 pp.
- Cerdà, A. (1998a). Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrological Processes*, 12 (7), 1031-1042. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19980615\)12:7<1031::AID-HYP636>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980615)12:7<1031::AID-HYP636>3.0.CO;2-V)
- Cerdà, A. (1998b). Post-fire dynamics of erosional processes under Mediterranean climatic conditions. *Z. Geomorph. N. F.*, 42 (3), 373-398. <https://doi.org/10.1127/zfg/42/1998/373>
- Cerdà, A., Imeson, A.C., Calvo, A. (1995). Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, southeast Spain. *Catena*, 24 (4), 289-304. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00031-2](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00031-2)

- Cerdà, A., Doerr, S.H. (2005): Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*, 14 (4), 423-437. <https://doi.org/10.1071/WF05044>
- Cerdà, A., Doerr, S.H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74 (3), 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.010>
- Cerdà, A., Lucas, M.E., Úbeda, X., Martínez Muriello, J.M., Keesstra, S. (2017). Pinus halepensis M. versus Quercus ilex subsp. Rotundifolia L. runoff and soil erosion at pedon scale under natural rainfall in Eastern Spain three decades after a forest fire. *Forest Ecology and Management*, 400, 447-456. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.038>
- De Luis, M. (2002). Fuego y lluvias torrenciales: Implicaciones hidrológicas y consecuencias en la regeneración forestal. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, 478 pp.
- De Luis, M., González Hidalgo, J.C., Raventós, J. (2003). Efectos erosivos de una lluvia torrencial en suelos afectados por quemas experimentales de diferente severidad. *Cuaternario y Geomorfología*, 17 (3-4), 57-67.
- De Luis, M., Raventós, J., González Hidalgo, J.C. (2005). Fire and torrential rainfall: effects on seedling establishment in Mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, 14 (4), 413-422. <https://doi.org/10.1071/WF05037>
- Dlapa, P., Bodí, M., Mataix Solera, J., Cerdà, A., Doerr, S.H. (2013). FT-IR spectroscopy reveals that ash water repellency is highly dependent on ash chemical composition. *Catena*, 108, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.011>
- Dlapa, P., Bodí, M., Mataix Solera, J., Cerdà, A., Doerr, S.H. (2015). Organic matter and wettability characteristics of wildfire ash from Mediterranean conifer forests. *Catena*, 135, 369-376. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.018>
- FAO (1998). World reference base for soil resources. World Soil Resources Report 84. FAO, Roma, 146 pp.
- FAO (2001). Lecture notes of major soils of the world. World Soil Resources Reports 94. FAO, Roma, 334 pp.
- FAO (2006). World reference base for soil resources. World Soil Resources Report 103. FAO, Roma, 128 pp.
- FAO-UNESCO (1974). Soil map of the world. FAO-UNESCO, París, 59 pp.
- FAO-UNESCO (1988). Soil map of the world. Revised legend. World Soil Resources Reports 60. FAO, Roma.
- Fernández García, V., Miesel, J., Baeza, M.J., Marcos, E., Calvo, L. (2019). Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire. *Applied Soil Ecology*, 135, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.002>
- García Cano, M.F., Cortina, J., De Luis, M., Raventós, J., Sánchez Montahud, J.R., González Hidalgo, J.C. (2000). Degradación del suelo asociado a la erosión en un aulagar quemado afectado por lluvia torrencial. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 9, 145-154.
- García Carmona, M., Arcenegui, V., García Orenes, F., Mataix Solera, J. (2020). The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. *Journal of Environmental Management*, 262, 110287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110287>
- García Orenes, F., Arcenegui, V., Chrenková, K., Mataix Solera, J., Moltó, J., Jara Navarro, A.B., Torres, M.P. (2017). Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: A two year monitoring research. *Science of the Total Environment*, 586, 1057-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.090>
- García Ruiz, J.M., López Bermúdez, F. (2009). La erosión del suelo en España. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza, 441 pp.
- Gimeno-García, E. (1999). Efectos de la intensidad del fuego sobre las propiedades químicas del suelo y sus consecuencias en los procesos de erosión hídrica. Incendios experimentales en zonas forestales mediterráneas. Tesis Doctoral, Universitat de València, Valencia, 476 pp.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J. L. (2000). Changes in organic matter, nitrogen, phosphorous and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science*, 51 (2), 201-210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00310.x>
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J. L. (2002). Changes in soil nitrogen as a result of fire and water erosion in a semiarid Mediterranean environment. En: Third International Congress of the European Society for Soil Conser-

- vation. Man and Soil at the Third Millennium. Geofoma Ediciones, Logroño, 1557-1572.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J. L. (2007). Influence of vegetation recovery on water erosion at short and medium-term after experimental fires in a Mediterranean shrubland. *Catena*, 69 (2), 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.003>
- Gimeno-García, E., Pascual Aguilar J.A., Llovet, J. (2011). Water repellency and moisture content spatial variations under *Rosmarinus officinalis* and *Quercus coccifera* in a Mediterranean burned soil. *Catena*, 85 (1), 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.001>
- Giovanardi, F.S. (2016). Evaluación del efecto de los incendios en los procesos erosivos mediante sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. Tesis Doctoral, Universidad de León, León, 160 pp.
- González-Pelayo, O. (2011). Dinámica de la humedad del suelo. Propiedades físicas y escorrentía en laderas mediterráneas afectadas por incendios forestales. Tesis Doctoral, Universitat de València, Valencia, 268 pp.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-García, E., Rubio, J.L. (2006). Hydrological properties of a Mediterranean soil burned whit different fire intensities. *Catena*, 68 (2-3), 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.006>
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Gimeno-García, E., Campo, J., Rubio, J.L. (2010). Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning in a Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia, Spain. *Geomorphology*, 118 (3-4), 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.014>
- González Pérez, J.A., González Vila, F.J., Almen-dros, G., Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter - a review. *Environment International*, 30 (6), 855-870. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Guerrero, C., Mataix Solera J., Navarro Pedreño, J., García Orenes, F., Gómez, I. (2001). Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Research and Management*, 15 (2), 163-171. <https://doi.org/10.1080/15324980151062823>
- Jiménez Pinilla, P. (2016). Avances en el estudio de suelos mediterráneos afectados por incendios forestales. Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández, Elche, 220 pp.
- Jiménez Pinilla, P., Doerr, S.H., Ahn, S., Mataix Solera J., Jordán, A., Zavala, L.M., Arcenegui, V. (2016a). Effects of relative humidity on the water repellency of fire-affected soils. *Catena*, 138, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.012>
- Jiménez Pinilla, P., Lozano, E., Mataix Solera J., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M. (2016b). Temporal changes in soil water repellency after a forest fire in a Mediterranean calcareous soil: Influence of ash and different vegetation type. *Science of the Total Environment*, 572, 1252-1260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.121>
- León, J., Bodí, M. B., 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.018>
- Llovet, J. (2005). Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, Alicante, 217 pp.
- Llovet, J., Ruiz Valera, M., Josa, R. y Vallejo, V.R. (2009). Soil responses to fire in Mediterranean forest landscapes in relation to the previous stage of land abandonment. *International Journal of Wildland Fire*, 18 (2), 222-232. <https://doi.org/10.1071/WF07089>
- Lozano, E. (2015). Sensibilidad de la glomalina a los efectos provocados por el fuego en el suelo y su relación con la repelencia al agua en suelos forestales mediterráneos. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández, Elche, 174 pp.
- Lozano, E., Chrenková, K., Arcenegui, V., Jiménez Pinilla, P., Mataix Solera J., Mataix Beneyto, J. (2016a). Glomalin-related soil protein response to heating temperature: a laboratory approach. *Land Degradation & Development*, 27 (5), 1432-1439. <https://doi.org/10.1002/ldr2415>
- Lozano, E., Jiménez Pinilla, P., Mataix Solera J., Arcenegui, V., Mataix Beneyto, J. (2016b). Sensitivity of glomalin-related soil protein to wildfires: Immediate and medium-term changes. *Science of the Total Environment*, 572, 1238-1243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.071>
- Mangas, V.J., Sánchez Montahud, J.R., Ortiz, C (1992). Effects of a fire on runoff and erosion on Mediterranean forest soils in SE-Spain. *Pirineos*, 140, 37-51. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1992.v140.171>
- Mataix Solera, J. (1999). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, Alicante, 330 pp.

En prensa

In press

- Mataix Solera, J., Gómez, I., Navarro Pedreño, J., Guerrero, C., Moral, R. (2002). Soil organic matter and aggregates affected by wildfire in a *Pinus halepensis* forest in a Mediterranean environment. *International Journal of Wildland Fire*, 11 (2), 107-114. <https://doi.org/10.1071/WF02020>
- Mataix Solera, J., Doerr, S. H. (2004). Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*, 118 (1-2), 77-88. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00185-X)
- Mataix Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Mayoral, A.M., Morales, J., González, J., García Orenes, F., Gómez, I. (2007). Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes*, 21 (17), 2300-2309. <https://doi.org/10.1002/hyp.6750>
- Mataix Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Jordan, M. M., Dlapa, P., Tessler, N., Wittenberg, L. (2008). Can terra rossa become water repellent by burning? A laboratory approach. *Geoderma*, 147 (3-4), 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.013>
- Mataix Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109 (1-2), 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>
- Mataix Solera, J., Arcenegui, V., Tessler, N., Zornoza, R., Wittenberg, L., Martínez, C., Jordán, M.M. (2013). Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. *Catena*, 108, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.006>
- Mataix Solera, J., Arcenegui, V., Zavala, L.M., Pérez, A., Jordán, A., Morugán, A., Gil Torres, J. (2014). Small variations in soil properties control fire-induced water repellency. *Spanish Journal of Soil Science*, 4 (1), 51-60. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.03>
- Mayor, A. G., Bautista, S., Llovet, J., Bellot, J. (2007). Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *Catena*, 71 (1), 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.006>
- Mayor, A.G., Valdecantos, A., Vallejo, V.R., Keizer, J.J., Bloem, J., Baeza, J., González Pelayo, O., Machado, A.I., de Ruiter, P.C. (2016). Fire-induced pine woodland to shrubland transitions in Southern Europe may promote shifts in soil fertility. *Science of the Total Environment*, 573, 1232-1241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.243>
- Molina, M.J., García Fayos, P., Sanroque, P. (1994). Short-term changes on aggregate stability and organic matter content after forest fires in a calcareous soil in Valencia (Spain). En: M. Sala, J.L. Rubio, (Eds.), *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, 43-52.
- Pereg, L., Mataix Solera, J., McMillan, M., García Orenes, F. (2018). The impact of post-fire salvage logging on microbial nitrogen cyclers in Mediterranean forest soil. *Science of the Total Environment*, 619-620, 1079-1087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.147>
- Rubio, J.L., Forteza, J., Andreu, V., Cerni, R. (1997). Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: A case study (Valencia, Spain). *Soil Technology*, 11 (1), 67-78. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00116-X](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00116-X)
- Rubio, J.L., Andreu, V., Gimeno García, E. (2003). Caso práctico: Diseño y funcionamiento de una estación experimental para el estudio del efecto de los incendios forestales sobre el suelo, los procesos erosivos y la vegetación. En: *La ingeniería en los procesos de desertificación*. Grupo TRAGSA, Madrid, 249-274.
- Sánchez Díaz, J., Carbó Valverde, E., Añó Vidal, C. (2018). Los suelos forestales de la Comunitat Valenciana. Catálogo de perfiles representativos. Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. Generalitat Valenciana, Valencia, 309 pp.
- Sánchez Montahud, J.R. (1997). Estimación de las pérdidas erosivas inducidas por las técnicas de preparación del suelo previa a la reforestación en el sur de la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, Alicante, 218 pp.
- Sánchez Montahud, J.R., Mangas, V.J., Ortiz, C., Bellot, J. (1994). Forest fire effect on soil chemical properties and runoff. En: M. Sala, J.L. Rubio, (Eds.), *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, 53-65.
- Sanroque, P., Rubio, J.L. (1982). El suelo y los incendios forestales. Diputación de Valencia, Valencia, 63 pp.
- Sanroque, P., Rubio, J.L., Mansanet, J. (1985). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo, en la composición florística y en la erosión hídrica de zonas forestales de

Valencia (España). *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 22 (2), 131-147.

Soil Survey Staff (1990). *Keys to Soil Taxonomy*, 4th ed. USDA. Soil Management Support Services. Blacksburg, Virginia, 423 pp.

Soil Survey Staff (1998). *Keys to Soil Taxonomy*, 8th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service. Washington DC, 326 pp.

Soil Survey Staff (2006). *Keys to Soil Taxonomy*, 10th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service. Washington DC, 332 pp.

Soil Survey Staff (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA. Natural Resources Conservation Service. Washington DC, 360 pp.

Vallejo, V.R., Alloza, J.A. (2015). Postfire ecosystem restoration. En: D. Paton, (Ed.), *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier Inc., 229-246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00012-9>

Recibido el 1 de diciembre de 2021

Aceptado el 16 de febrero de 2022

En prensa

In press

En prensa

In press