



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Efectos de las medidas de restauración post-incendio sobre las propiedades del suelo en ecosistemas dominados por *Pinus sylvestris* L.

HUERTA DEL GALLEGOS, S.¹, CALVO GALVÁN, L.¹, FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.¹ y MARCOS PORRAS, E.¹

¹ Área de Ecología. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León, 24071 León, España.

Resumen

Los incendios forestales ocasionan importantes alteraciones sobre los suelos, por lo que las acciones de protección post-incendio son fundamentales tanto para evitar la degradación del suelo como para protegerlo de la erosión y, por tanto, mantener su capacidad de producción de servicios. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto a corto plazo de medidas de restauración post-fuego con restos de madera sobre propiedades químicas, bioquímicas, y microbiológicas del suelo. Para ello seleccionamos el gran incendio de Cabrera, en la provincia de León, que tuvo lugar en el verano de 2017. Un año después del incendio se realizaron tareas de restauración en sistemas dominados por *Pinus sylvestris* L. A los dos años de la restauración se tomaron muestras de suelo en pinares quemados y restaurados, en pinares quemados sin restaurar, y en pinares no quemados. En cada muestra se analizó el carbono total, nitrógeno total, fósforo disponible, las actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida, y el carbono de la biomasa microbiana. De acuerdo con nuestros resultados, tanto las propiedades químicas como bioquímicas y microbiológicas mostraron una tendencia al aumento en las zonas restauradas respecto a las zonas quemadas sin restaurar, si bien, por lo general este incremento no fue significativo. El empleo de restos de madera como medida de gestión post-fuego ejerce un efecto positivo sobre la recuperación a corto plazo de las propiedades del suelo en pinares de *P. sylvestris*, aunque es necesario más tiempo para que los suelos recuperen sus condiciones iniciales.

Palabras clave

Calidad del suelo, gestión de zonas quemadas, incendios forestales, restos de madera.

1. Introducción

El fuego es una perturbación muy frecuente en la Península Ibérica, donde actúa como un importante agente modificador del paisaje (PAUSAS, 2004). Los incendios forestales ocasionan grandes impactos sobre los ecosistemas, especialmente sobre el suelo, cuyas propiedades se alteran fácilmente como consecuencia de las altas temperaturas (CERTINI, 2005). En este contexto, la combustión de la vegetación y de la materia orgánica modifica en gran medida el contenido en nutrientes del suelo (NEARY et al., 2005). La disponibilidad de nutrientes está muy ligada a las enzimas del suelo, siendo la β -glucosidasa, la ureasa, y la fosfatasa las principales actividades enzimáticas que interfieren en los ciclos del carbono, nitrógeno, y fósforo, respectivamente. Estas enzimas extracelulares tienen principalmente un origen microbiano, y ejercen un papel muy importante en procesos biológicos como la descomposición (MATAIX-SOLERA et al., 2009; MAYOR et al., 2016). De este modo, la actividad enzimática y el contenido de nutrientes del suelo tienen una gran repercusión sobre la recuperación de la actividad microbiana y de la vegetación, siendo importantes referentes del estado del suelo y de su fertilidad (DICK, 1994; HERNÁNDEZ et al., 1997; HEDO et al., 2015). Así pues, la capacidad de funcionamiento dentro del ecosistema y el potencial para sostener la productividad definen la calidad del suelo (DORAN & PARKIN, 1994), siendo la materia orgánica uno de los principales indicadores de calidad debido al papel que juega en el suministro de nutrientes y a la implicación que tiene en muchos de los procesos y funciones del suelo (SCHOENHOLTZ et al., 2000; NEARY et al., 2005; KASCHUK et al., 2010).

Uno de los principales impactos de la combustión de la materia orgánica es la pérdida de estructura del suelo por la desestabilización de los agregados, lo cual reduce la capacidad de infiltración de agua e incrementa la escorrentía superficial. Además, los procesos erosivos también se ven agravados después del incendio debido a la pérdida de la cubierta vegetal, que deja el suelo desprovisto de protección favoreciendo el transporte de sedimentos tras los episodios de lluvias y, por tanto, potenciando la degradación y la pérdida de nutrientes del suelo (CERDÀ, 1998; MATAIX-SOLERA et al., 2011; PEREIRA et al., 2018). Así pues, entre las principales prácticas de gestión post-incendio se encuentra el uso de tratamientos para la estabilización de la ladera, orientados principalmente a reducir el riesgo de erosión. Una de las técnicas más utilizadas es la aplicación de mulch, que consiste en esparcir sobre la superficie materiales que proporcionen una protección superficial (FERNÁNDEZ & VEGA, 2014). Este acolchado reduce el movimiento de los sedimentos, favoreciendo la estabilización del suelo y contribuyendo a mantener su fertilidad (ZEMA, 2021), ya que su descomposición puede aportar nutrientes y materia orgánica (BAUTISTA et al., 2009). El mulch mitiga el impacto de las gotas de lluvia, disminuyendo la escorrentía superficial y favoreciendo la infiltración de agua en el suelo, por lo que su aplicación es preferible tras del incendio, antes de las primeras lluvias (SANTANA et al., 2014). Además, el uso del mulch incrementa la retención de humedad y disminuye la temperatura del suelo, lo que ejerce un efecto positivo sobre la vegetación, favoreciendo su recuperación y crecimiento (ROBICHAUD et al., 2010; SANTANA et al., 2014).

El acolchado de paja y los fragmentos de restos de madera son los materiales más empleados en esta práctica. El uso de mulch de paja como estrategia de gestión post-incendio es una técnica económica y de fácil aplicación, mientras que la utilización de restos de madera requiere la tala previa de los árboles y el manejo de fragmentos más pesados. Sin embargo, los restos de madera son más resistentes al viento, por lo que cubren el suelo por más tiempo, y son menos propensos a la introducción de especies no nativas que interfieran en la regeneración de la vegetación autóctona (ZEMA, 2021).

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo fue analizar los efectos a corto plazo de la aplicación de restos de madera, empleados como medida de restauración post-incendio, en la recuperación de la calidad del suelo en pinares de *P. sylvestris*. De forma específica, se estudiaron los cambios producidos sobre propiedades químicas (carbono total, nitrógeno total, y fósforo disponible), bioquímicas (actividades enzimáticas β-glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida), y microbiológicas (carbono de la biomasa microbiana) del suelo en zonas quemadas y restauradas respecto a zonas quemadas sin restaurar y zonas no quemadas.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en la Sierra de Cabrera, al suroeste de la provincia de León. Esta zona sufrió un incendio en verano de 2017 (9.939 ha) que afectó principalmente a ecosistemas dominados por *Erica australis* L., *Genista hystrix* Lange, *P. sylvestris*, y *Quercus pyrenaica* Willd. Se trata de una zona montañosa, cuya altitud oscila entre los 836 m y los 1938 m. Los veranos son secos y templados (AEMET-IM, 2011), con temperaturas y precipitaciones medias anuales de 9 °C y 758 mm, respectivamente (NINYEROLA et al., 2005). Las rocas predominantes son pizarras, areniscas, y cuarcitas del periodo Ordovícico (GEODE, 2021), sobre las que se desarrollan suelos ácidos, de textura franco-arenosa y franco arcillo-arenosa, principalmente Leptosoles líticos y Cambisoles húmicos (ITACYL, 2021).

3.2. Restauración con restos de madera

La restauración post-incendio se llevó a cabo en pinares de *P. sylvestris*, que presentaban *E. australis* y *Pterospartum tridentatum* (L.) Willk. como especies dominantes del sotobosque. Un año después del incendio se procedió a la tala y saca de los árboles quemados, dejando los restos de las cortas extendidos sobre el suelo descubierto. La aplicación de los fragmentos de madera se realizó en transectos.

3.3. Muestreos de campo

Los muestreos de campo se realizaron tres años después del incendio, y dos años después de la restauración, durante los meses de junio y julio de 2020. Se seleccionaron 5 transectos en pinares quemados y restaurados, y 5 transectos en pinares quemados sin restaurar. En cada transecto se establecieron, de forma sistemática siguiendo la pendiente, 2 parcelas de 2 m x 2 m. Además, se fijaron aleatoriamente 10 parcelas en pinares no quemados (Figura 1). En cada parcela se tomaron 4 muestras de suelo utilizando un core de 7 cm de diámetro y 3 cm de profundidad, eliminando previamente los restos de vegetación, hojarasca, y ramas. Estas muestras se homogeneizaron en campo para obtener una muestra de suelo compuesta por parcela. Cada muestra de suelo se tamizó (< 2 mm) y se dividió en dos fracciones: una se secó al aire y se conservó en el laboratorio (20 °C) para el análisis de propiedades químicas, y otra se congeló a -18 °C para el análisis de propiedades bioquímicas y microbiológicas.



Figura 1. Pinar quemado y restaurado (izquierda), pinar quemado sin restaurar (centro) y pinar no quemado (derecha).

3.4. Análisis del suelo

En cada muestra de suelo se analizaron propiedades químicas (carbono total, nitrógeno total, y fósforo disponible), bioquímicas (actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida), y microbiológicas (carbono de la biomasa microbiana).

El carbono total y el nitrógeno total se analizaron siguiendo el método de combustión de DUMAS (1831) mediante un analizador elemental EuroVector EA3000 (Eurovector SpA, Radovalle, Italia). El fósforo disponible se midió a una longitud de onda de 882 nm en un espectrofotómetro UV Mini 1240 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón) siguiendo el procedimiento de OLSEN *et al.* (1954).

Las actividades enzimáticas β -glucosidasa (β -D-glucósido glucohidrolasa, EC 3.2.1.21) y fosfatasa ácida (monoésterfósfato fosfohidrolasa, EC 3.1.3.2) se analizaron siguiendo el método descrito por TABATABAI (1994), mientras que el procedimiento de KANDELER & GERBER (1988) se empleó para medir la actividad enzimática ureasa (urea amidohidrolasa, EC 3.5.1.5). Para ello, se incubó el suelo con el sustrato enzimático correspondiente: *p*-nitrofenil- β -D-glucopiranósido para la β -glucosidasa, *p*-nitrofenil fosfato en el caso de la fosfatasa ácida, y urea para la actividad enzimática ureasa. La absorbancia del *p*-nitrofenol (*p*-NP) liberado por las actividades β -glucosidasa y fosfatasa ácida se midió a una longitud de onda de 400 nm, mientras que la absorbancia del amonio (NH_4^+) producido por la actividad ureasa se midió a una longitud de onda de 690 nm con un espectrofotómetro UV-1700 PharmaSpec (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón).

El carbono de la biomasa microbiana fue determinado por el método de fumigación-extracción mediante digestión con dicromato de Walkley-Black (VANCE *et al.*, 1987). Para su cálculo se aplicó la siguiente fórmula: $C_{biomasa\ microbiana} = E_C / K_{EC}$, siendo E_C la diferencia de carbono orgánico entre extractos filtrados fumigados con cloroformo ($CHCl_3$) durante 24 horas y muestras de suelo no fumigadas, y K_{EC} (0.38) un factor de calibración.

3.5. Análisis de datos

Para analizar los efectos de la restauración post-incendio con restos de madera sobre la recuperación de las propiedades del suelo se aplicaron modelos lineales generalizados (GLMs) con una distribución de error quasi-Poisson (función log link) para tener en cuenta la sobredispersión.

La variable predictora se correspondía con el tipo de tratamiento (quemado restaurado, quemado sin restaurar, y no quemado). Las variables respuesta del modelo fueron: (1) carbono total, (2) nitrógeno total, (3) fósforo disponible, las actividades enzimáticas (4) β -glucosidasa, (5) ureasa, y (6) fosfatasa ácida, y (7) el carbono de la biomasa microbiana. Se realizaron comparaciones por pares mediante el test de Tukey para detectar la presencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

El análisis de los datos se llevó a cabo con el software R (R CORE TEAM, 2021) mediante el paquete *multcomp* (HOTHORN *et al.*, 2008).

4. Resultados

La restauración incrementó el contenido de nutrientes del suelo respecto al presente en las zonas quemadas sin restaurar (Figura 2). Sin embargo, este aumento solo fue significativo en el caso del nitrógeno total ($p < 0.001$). Por el contrario, el carbono total no se recuperó en ninguna de las situaciones quemadas ($p < 0.001$). Destacar que el contenido de fósforo disponible en el suelo se incrementó de forma significativa después del incendio, tanto en zonas quemadas restauradas como no restauradas ($p < 0.001$) (Figura 2).

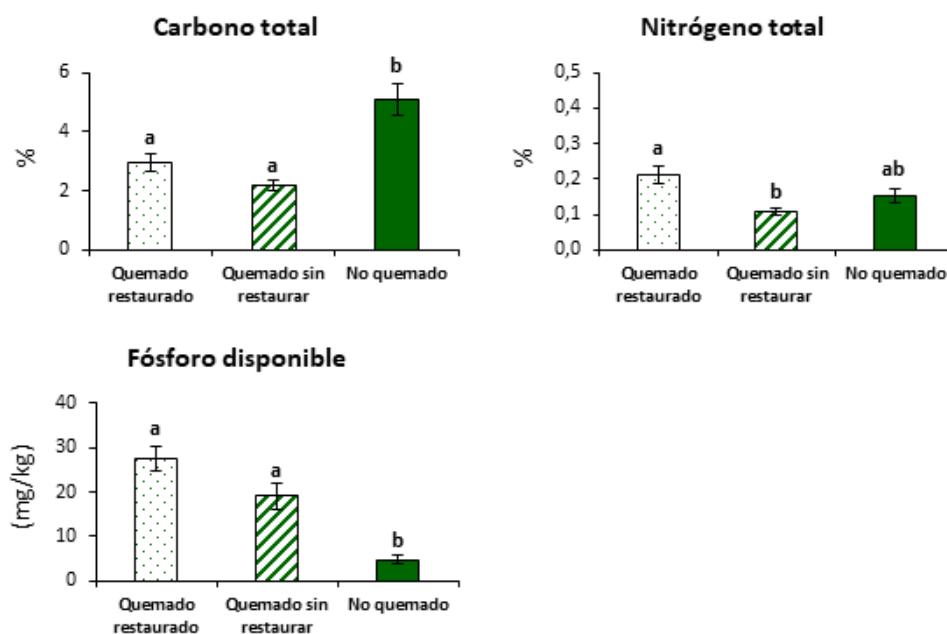


Figura 2. Valor promedio y error estándar de carbono total, nitrógeno total y fósforo disponible para cada tratamiento (quemado restaurado, quemado sin restaurar y no quemado). Las diferentes letras muestran la presencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

Las actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida presentaron valores ligeramente superiores en las zonas quemadas y restauradas respecto a las zonas quemadas sin restaurar, si bien, no se detectaron diferencias significativas. No se observó una recuperación total de la actividad enzimática del suelo tres años después del incendio y dos años después de la restauración ($p < 0.001$) (Figura 3).

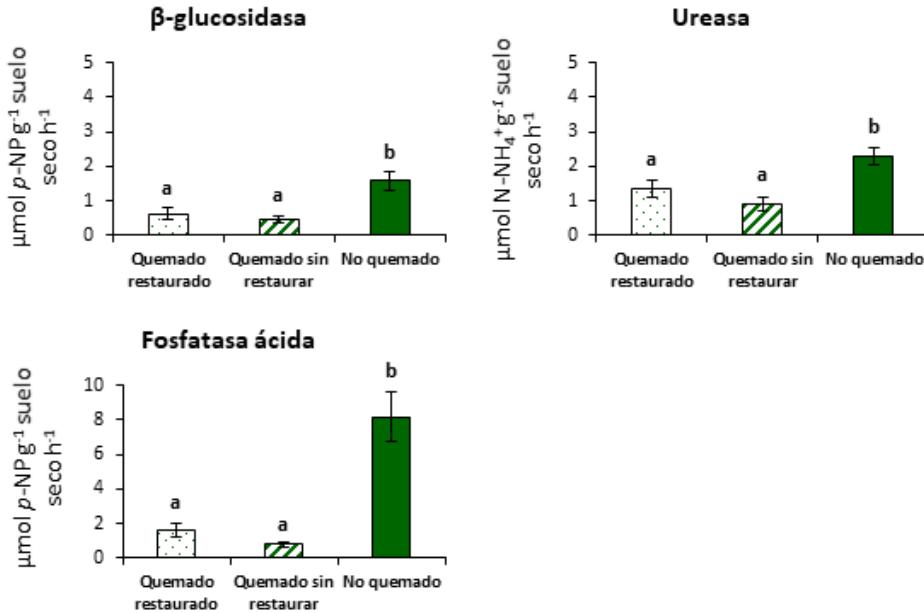


Figura 3. Valor promedio y error estándar de las actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa y fosfatasa ácida para cada tratamiento (quemado restaurado, quemado sin restaurar y no quemado). Las diferentes letras muestran la presencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

Las zonas no quemadas presentaron los valores más altos de carbono de la biomasa microbiana ($p < 0.05$). A pesar de ello, la restauración con restos de madera favoreció la recuperación del carbono microbiano del suelo en pinares quemados. En concreto, las zonas quemadas y restauradas no se diferenciaron significativamente de las quemadas sin restaurar ni de las no quemadas (Figura 4).

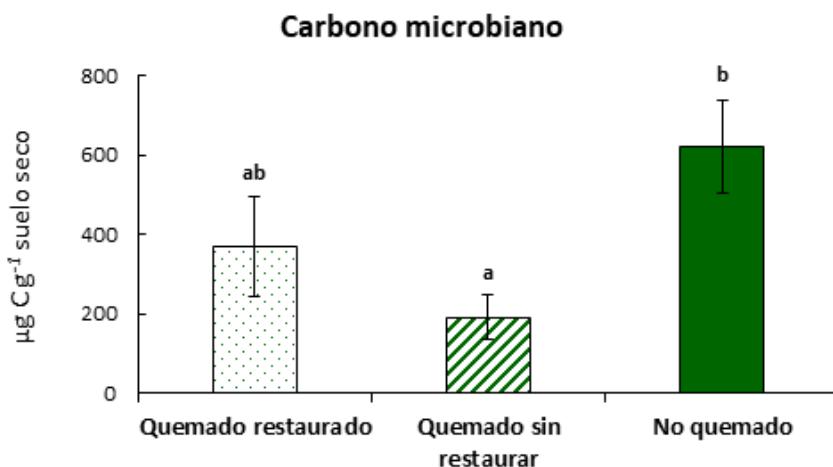


Figura 4. Valor promedio y error estándar de carbono microbiano para cada tratamiento (quemado restaurado, quemado sin restaurar y no quemado). Las diferentes letras muestran la presencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

5. Discusión

En el presente estudio evaluamos cómo la restauración post-incendio con restos de madera influyó en la recuperación de propiedades químicas (carbono total, nitrógeno total, y fósforo disponible), bioquímicas (actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida), y microbiológicas (carbono de la biomasa microbiana) del suelo. De acuerdo con nuestros resultados, los restos de las cortas de los árboles quemados afectan positivamente a las propiedades del suelo. Sin embargo, estas no se recuperaron totalmente a corto plazo ya que el fuego ejerce una mayor influencia que la medida de restauración empleada, y se requiere más tiempo para que el suelo recupere su funcionalidad.

Uno de los principales efectos de los incendios forestales es la pérdida de materia orgánica y nutrientes del suelo (NEARY et al., 2005). Así pues, en este estudio observamos que el porcentaje de carbono total a los tres años del incendio era más bajo en suelos quemados que en suelos sin quemar. La disminución de carbono en el suelo después de los incendios se debe principalmente a los procesos de combustión y a la pérdida de los horizontes orgánicos (CERTINI, 2005; NEILL et al., 2007). El carbono orgánico conforma la mayor parte de las reservas de carbono del suelo, siendo uno de los principales componentes de la materia orgánica, lo cual hace que ambos respondan de forma similar tras el fuego. La combustión de materia orgánica también ocasiona la disminución del nitrógeno total del suelo, ya que las temperaturas elevadas son altamente responsables de las pérdidas de nitrógeno por volatilización (NEARY et al., 2005). Sin embargo, las altas temperaturas también pueden desencadenar la oxidación de la materia orgánica, proceso en el que el nitrógeno orgánico se convierte en formas inorgánicas disponibles, principalmente en amonio. Estos procesos son esenciales para la recuperación de la vegetación y tienen grandes implicaciones sobre la productividad, especialmente en ecosistemas limitados en nitrógeno (CERTINI, 2005). Del mismo modo, la mineralización del fósforo orgánico, proceso mediante el que se forma ortofosfato, es la principal causa del incremento del fósforo disponible del suelo en zonas quemadas (CADE-MENUN et al., 2000), tal y como se observó en el presente estudio.

El fuego también ocasiona importantes efectos sobre la actividad enzimática, la cual suele disminuir después de un incendio (MATAIX-SOLERA et al., 2009; FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2019). Concretamente, en el presente estudio observamos que ni las actividades enzimáticas β -glucosidasa, ureasa, y fosfatasa ácida, ni el carbono de la biomasa microbiana se recuperaron en los suelos quemados a los tres años del incendio. Esto se debe principalmente a la disminución de la comunidad de microorganismos y a la pérdida de vegetación, que son las principales fuentes de enzimas del suelo (MAYOR et al., 2016), lo cual puede a su vez explicar que el carbono de la biomasa microbiana y la actividad enzimática del suelo presenten el mismo patrón de comportamiento (KNELMAN et al., 2015). La desnaturaleza de las propias enzimas como consecuencia de las altas temperaturas también puede reducir la actividad enzimática en suelos quemados (FULTZ et al., 2016). Además, estas enzimas extracelulares catalizan muchas reacciones biológicas (MATAIX-SOLERA et al., 2009), por lo que el incremento de la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno o el fósforo puede contribuir a la reducción de la actividad enzimática del suelo, al requerirse una menor producción de enzimas para la liberación de estos nutrientes (FERNÁNDEZ-GARCÍA et al., 2019).

A pesar de los efectos ocasionados por el fuego sobre las propiedades del suelo, tanto los nutrientes, como la actividad enzimática y el carbono de la biomasa microbiana se incrementaron a los dos años de la aplicación de los restos de madera en las zonas quemadas y restauradas respecto a las zonas quemadas sin restaurar. La incorporación de materiales quemados o parcialmente quemados sobre la superficie no solo actúa como protección, sino que también aporta materia orgánica, incrementando la disponibilidad de nutrientes (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2004), pudiendo llegar incluso a compensar las pérdidas por combustión (ALMENDROS et al., 1990). Esto es debido a la descomposición de los restos depositados sobre la superficie, proceso en el que el carbono orgánico es empleado por los microorganismos del suelo como fuente de energía y los nutrientes

como el nitrógeno y el fósforo son liberados al suelo, lo que aumenta su disponibilidad para las plantas (REICHERT et al., 2015). Además, el acolchado de fragmentos de madera se descompone más lentamente que el de paja debido al mayor contenido en lignina y a una relación C/N más alta, permitiendo una liberación más lenta y gradual de los nutrientes en el suelo (MORGAN et al., 2014). Así pues, estos materiales cubren el suelo por más tiempo, reteniendo humedad, aumentando la infiltración de agua, y disminuyendo la pérdida de suelo por erosión. Esto no solo tiene importantes efectos sobre el contenido de nutrientes del suelo, sino que también influye en la productividad y en el establecimiento y crecimiento de la vegetación (BAUTISTA et al., 2009; ROBICHAUD et al., 2013). De este modo, los cambios en el microclima del suelo y los procesos de descomposición derivados de la restauración con restos de madera ejercen un importante papel sobre los ciclos de nutrientes (RHOADES et al., 2012). Los flujos de nutrientes en el suelo están controlados por los microorganismos, que son los responsables de la descomposición de la materia orgánica, siendo importantes referentes de sostenibilidad y calidad del suelo (FONTÚRBEL et al., 2012). Por lo tanto, un mayor aporte de materia orgánica como consecuencia de la descomposición de los restos de madera podría explicar el incremento del carbono de la biomasa microbiana y de la actividad enzimática observados en zonas restauradas respecto a zonas quemadas sin restaurar.

6. Conclusiones

Este trabajo ofrece un enfoque a corto plazo sobre los efectos de la restauración con restos de madera en la recuperación de propiedades químicas, bioquímicas, y microbiológicas del suelo en pinares de *P. sylvestris*. Por lo general, no se observó recuperación de las propiedades del suelo en las zonas quemadas tres años después del incendio. Sin embargo, tanto los nutrientes, como las actividades enzimáticas y el carbono de la biomasa microbiana del suelo se incrementaron en las zonas restauradas respecto a las zonas quemadas sin restaurar dos años tras la aplicación de los restos de madera. A pesar de ello, este aumento solo fue significativo para el nitrógeno total del suelo, que se recuperó totalmente con la restauración. Además, el carbono microbiano del suelo no presentó diferencias significativas entre las zonas restauradas y las no quemadas. Así pues, una mayor protección superficial induce a cambios en las condiciones de humedad y temperatura, que afectan de forma positiva a los procesos de descomposición de los restos de las cortas de madera, lo que podría ejercer un importante efecto sobre el contenido de nutrientes y de materia orgánica del suelo. Esto favorecería la recuperación de las propiedades químicas, bioquímicas, y microbiológicas en las zonas restauradas respecto a las zonas sin actuar. Sin embargo, son necesarios estudios a medio y largo plazo que permitan hacer un mejor seguimiento de los efectos de estas medidas sobre la calidad de los suelos, y determinen el tiempo necesario para que el suelo se recupere totalmente después de un incendio.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto FIRESEVES (AGL2017-86075-C2-1-R), y por la Junta de Castilla y León mediante el proyecto WUIFIRECYL (LE005P120). El Fondo Europeo de Desarrollo Regional también contribuyó en la financiación del presente estudio. Sara Huerta del Gallego disfruta de un contrato predoctoral concedido por la Junta de Castilla y León y cofinanciado por el Fondo Social Europeo (EDU/574/2018). Víctor Fernández García es beneficiario de una ayuda Margarita Salas del Ministerio de Universidades otorgada por la Universidad de León y financiada por fondos de la Unión Europea – NextGenerationEU.

8. Bibliografía

- AEMET-IM; 2011. *Iberian Climate Atlas. Air Temperature and Precipitation (1971–2000)*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino e Instituto de Meteorología de Portugal: Lisboa. 1-80.
- ALMENDROS, G.; GONZÁLEZ-VILA, F.J.; MARTIN, F.; 1990. Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest. An experimental approach to the effects of fire on humic substances. *Soil Sci.* 149 158–168.
- BAUTISTA, S.; ROBICHAUD, P.R.; BLADÉ, C.; 2009. Post-fire mulching. En: CERDÀ, A.; ROBICHAUD, P.R. (Eds.), *Fire effects on soils and restoration strategies*. Science Publishers: Enfield. 353-372.
- CADE-MENUN, B.J.; BERCH, S.M.; PRESTON, C.M.; LAVKULICH, L.M.; 2000. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. II. The effects of clear-cutting and burning. *Can. J. For. Res.* 30 1726–1741.
- CERDÀ, A.; 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrol. Process.* 12 1031–1042.
- CERTINI, G.; 2005. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia* 143 1–10.
- DICK, R.P.; 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. En: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America: Madison. 107–124.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B.; 1994. Defining and assessing soil quality. En: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America: Madison. 3-31.
- DUMAS, J.B.A.; 1831. Procedes de l'analyse Organic. *Ann. Chem. Phys.* 247 198–213.
- FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J.A.; 2014. Efficacy of bark strands and straw mulching after wildfire in NW Spain: Effects on erosion control and vegetation recovery. *Ecol. Eng.* 63 50-57.
- 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. *Appl. Soil Ecol.* 135 147–156.
- FONTÚRBEL, M.T.; BARREIRO, A.; VEGA, J.A.; MARTÍN, A.; JIMÉNEZ, E.; CARBALLAS, T.; FERNÁNDEZ, C.; DÍAZ-RAVIÑA, M.; 2012. Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. *Geoderma* 191 51-60.
- FULTZ, L.M.; MOORE-KUCERA, J.; DATHE, J.; DAVINIC, M.; PERRY, G.; WESTER, D.; SCHWILK, D.W.; RIDOUT-HANZAK, S.; 2016. Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest. *Appl. Soil Ecol.* 99 118–128.
- GEODE; 2021. *Mapa geológico digital continuo de España*. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible online: http://mapas.igme.es/gis/rest/services/Cartografia_Geologica/IGME_Geode_50/MapServer (accedido el 28 de octubre de 2021).

GONZÁLEZ-PÉREZ, J.A.; GONZÁLEZ-VILA, F.J.; ALMENDROS, G.; KNICKER, H.; 2004. The effect of fire on soil organic matter-A review. *Environ. Int.* 30 855–870.

HEDO, J.; LUCAS-BORJA, M.E.; WIC, C.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; DE LAS HERAS, J.; 2015. Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands. *Solid Earth* 6 243–252.

HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C.; REINHARDT, I.; 1997. Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 25 109–116.

HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P.; 2008 Simultaneous inference in general parametric models. *Biom. J.* 50 346–363.

ITACYL; 2021. *Portal de Suelos. Visor de Datos de Suelos.* Disponible online: http://suelos.itacyl.es/visor_datos (accedido el 28 de octubre de 2021).

KANDELER, E.; GERBER, H.; 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biol. Fertil. Soils* 6 68–72.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M.; 2010. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biol. Biochem.* 42 1–13.

KNELMAN, J.E.; GRAHAM, E.B.; TRAHAN, N.A.; SCHMIDT, S.K.; NEMERGUT, D.R.; 2015. Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community structure, microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest. *Soil Biol. Biochem.* 90 161–168.

MATAIX-SOLERA, J.; CERDÀ, A.; ARCENEGUI, V.; JORDÁN, A.; ZAVALA, L.M.; 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth Sci. Rev.* 109 44–60.

MATAIX-SOLERA, J.; GUERRERO, C.; GARCÍA-ORENES, F.; BÁRCENAS, G.M.; TORRES, M.P.; 2009. Forest fire effects on soil microbiology. En: CERDÀ, A.; ROBICHAUD, P. (Eds.), *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers: Enfield. 133–175.

MAYOR, Á.G.; GOIRÁN, S.B.; VALLEJO, V.R.; BAUTISTA, S.; 2016. Variation in soil enzyme activity as a function of vegetation amount, type, and spatial structure in fire-prone Mediterranean shrublands. *Sci. Total Environ.* 573 1209–1216.

MORGAN, P.; MOY, M.; DROSKE, C.A.; LENTILE, L.B.; LEWIS, S.A.; ROBICHAUD, P.R.; HUDAK, A.T.; 2014. Vegetation response after post-fire mulching and native grass seeding. *Fire Ecol.* 10 49–62.

NEARY, D.G.; RYAN, K.C.; DEBANO, L.F.; 2005. *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soil and Water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-Vol.4. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station: Ogden.

NEILL, C.; PATTERSON, W.A.; CRARY, D.W.; 2007. Responses of soil carbon, nitrogen and cations to the frequency and seasonality of prescribed burning in a Cape Cod oak-pine forest. *For. Ecol. Manag.* 250 234–243.

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2005. *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y Aplicaciones en Bioclimatología y Geobotánica*. Universidad Autónoma de Barcelona: Bellaterra. 1-44.

OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; FRANK, S.W.; DEAN, L.A.; 1954. *Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate*. The United States Department of Agriculture (USDA) Circular. US Government Printing Office: Washington.

PAUSAS, J.G.; 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin). *Clim. Chang.* 63 337–350.

PEREIRA, P.; FRANCOS, M.; BREVIK, E.C.; UBEDA, X.; BOGUNOVIC, I.; 2018. Post-fire soil management. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 5 26-32.

R CORE TEAM; 2021. *R: A Language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. <http://www.R-project.org/>.

REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F.; BERVALD, C.M.P.; BRUNETTO, G.; KATO, O.R.; SCHUMACHER, M.V.; 2015. Fragmentation, fiber separation, decomposition, and nutrient release of secondary-forest biomass, mechanically chopped-and-mulched, and cassava production in the Amazon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 204 8-16.

RHOADES, C.C.; BATTAGLIA, M.A.; ROCCA, M.E.; RYAN, M.G.; 2012. Short- and medium-term effects of fuel reduction mulch treatments on soil nitrogen availability in Colorado conifer forests. *For. Ecol. Manag.* 276 231-238.

ROBICHAUD, P.R.; ASHMUN, L.E.; SIMS, B.D.; 2010. *Post-fire treatment effectiveness for hill slope stabilization*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-240. USDA Forest Service: Fort Collins.

ROBICHAUD, P.R.; JORDAN, P.; LEWIS, S.A.; ASHMUN, L.E.; COVERT, S.A.; BROWN, R.E.; 2013. Evaluating the effectiveness of wood shred and agricultural straw mulches as a treatment to reduce post-wildfire hillslope erosion in southern British Columbia, Canada. *Geomorphology* 197 21-33.

SANTANA, V.M.; ALDAY, J.G.; BAEZA, M.J.; 2014. Mulch application as post-fire rehabilitation treatment does not affect vegetation recovery in ecosystems dominated by obligate seeders. *Ecol. Eng.* 71 80-86.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A.; 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *For. Ecol. Manag.* 138 335–356.

TABATABAI, M.A.; 1994. Soil enzymes. En: WEAVER, R.W.; ANGLE, J.S.; BOTTOMLEY, P.J.; BEZDICEK, D.F.; SMITH, S.; TABATABAI, M.A.; WOLLUM, A.G. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbial and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America: Madison. 775–833.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S.; 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19 703–707.

ZEMA, D.A.; 2021. Postfire management impacts on soil hydrology. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 21 100252.