



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

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



Respuesta de la interfaz planta-suelo a la saca temprana de madera post-incendio en pinares de *Pinus halepensis* Mill. del Sureste peninsular

MOYA D. ^{*1, 2}, PEÑA, E. ¹, LUCAS-BORJA M.E. ^{1, 2}, PLAZA-ÁLVAREZ P.A. ¹, GONZÁLEZ-ROMERO J. ¹, FAJARDO A. ¹, BOTELLA R. ¹, DIAZ-MONTERO A. ¹, FERRANDIS P. ^{1, 2} DE LAS HERAS J. ^{1, 2}

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes; Universidad de Castilla-La Mancha; Campus Universitario s/n; 02071 Albacete; Spain

² Instituto Botánico de la Universidad de Castilla-La Mancha, Avda. de la Mancha s/n, 2006 Albacete, Spain.

*Corresponding author: Daniel.Moya@uclm.es

Resumen

Tras un gran incendio forestal, es común ejecutar acciones de emergencia para asistir la recuperación de los ecosistemas forestales dañados, tales como la saca de madera. Para comprobar la efectividad de esta herramienta, hemos seguido tres grandes incendios forestales (2012, 2015 y 2017) del sureste peninsular en bosques con predominio de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Teniendo en cuenta la severidad de quemado y la saca de madera temprana (o no), establecimos 15 parcelas circulares (de superficie variable) dentro de cada tratamiento. Tras muestreos en transectos lineales y subparcelas cuadradas, se han calculado índices de diversidad vegetal, se valoró el reclutamiento de pinos y se analizó la actividad enzimática en la parte más superficial del suelo. Nuestros resultados muestran que un aumento de la severidad de quemado provoca una reducción en la diversidad vegetal, en el reclutamiento y en la actividad enzimática en suelo. Además, se encontró un empobrecimiento del ecosistema en zonas con saca de madera por pérdida de microclimas y reducción en el aporte de materia orgánica, además de posibles daños por la ejecución del tratamiento, especialmente en los ambientes más áridos.

Palabras clave

Regeneración post-incendio; resiliencia; restauración post-incendio; biología de suelo; diversidad vegetal.

1. Introducción

Tradicionalmente, la gestión de bosques tras los incendios en muchas partes del mundo, incluida el área Mediterránea, se ha basado en la corta y retirada de la madera quemada -salvage logging (Alloza and Vallejo, 2004; Castro et al., 2011; Leverkus et al., 2014; Lindenmayer and Noss, 2006; Marques and Mora, 1998; McIver and Starr, 2000; Ne'eman et al., 1995). Esta práctica se ha justificado usando argumentos económicos, por la venta de la madera quemada (Eklund et al., 2009; Prestemon and Holmes, 2008) y ecológicos, ya que la retirada de madera quemada puede reducir el riesgo frente a otras perturbaciones como plagas (Amman and Ryan, 1991) o futuros incendios debido a la acumulación de combustible (Collins et al., 2012; Fraver et al., 2011; Keyser et al., 2009). También se argumentan razones utilitarias relacionadas con la mejor la accesibilidad en las labores de restauración y por estética (Greene et al., 2006; Martínez-Sánchez et al., 1999). Sin embargo, estas razones han sido fuertemente cuestionadas por estudios recientes que han demostrado que los argumentos dependen del contexto y no siempre están justificados y apuntan a que la madera muerta es un elemento fundamental para el funcionamiento de los bosques, su regeneración tras perturbación y para acelerar la recuperación de los servicios ecosistémicos que nos proveen (Castro, 2022).

De hecho, se han encontrado una serie de impactos negativos de la retirada de la madera quemada (Lindenmayer et al., 2008), tales como la modificación del régimen hidrológico (Greene et al., 2006), la perturbación que provoca la propia retirada de la madera muerta sus efectos negativos

potenciales o demostrados sobre la biota que depende de la madera muerta o de las zonas quemadas y el aumento de la erosión (Bautista S et al., 2004; Greene et al., 2006; Karr et al., 2004; Lindenmayer and Noss, 2006; Marques and Mora, 1998). Directamente, esta gestión ha provocado un efecto negativo sobre la regeneración del bosque en diversos sistemas (Bautista S et al., 2004; Castro et al., 2011; Greene et al., 2006; Karr et al., 2004; Marañón, 2011; Martínez-Sánchez et al., 1999; Ne'eman et al., 1995)

Por tanto, las políticas de gestión de la madera muerta necesitan un cambio de planificación para optimizar su eficiencia y permitir un acercamiento a los objetivos propuestos. Tras un gran incendio con zonas de alta severidad de quemado, se deben planificar correctamente las políticas de gestión, ya que ello permitiría un gran ahorro de tiempo y dinero, mitigando los daños causados por la perturbación, tales como apoyo a regeneración natural. En sistemas forestales boreales de Europa y América, ya se han adoptado prácticas de gestión que incluyen la permanencia de los restos quemados (Rodríguez Martínez et al., 2013). En España, se ha aducido que no existe evidencia científica que apoye la retirada de la madera quemada (Bautista S et al., 2004) y se ha revisado esta controversia desde diversos contextos (Alloza and Vallejo, 2004; Valladares, 2005), llegándose a concluir que en la región biogeográfica del Mediterráneo peninsular, la retirada de la madera quemada no tiene alguna utilidad que justifique su práctica, especialmente si no hay un beneficio económico por venta de madera (Rodríguez Martínez et al., 2013).

2. Objetivos

Nos proponemos evaluar la facilitación ecológica asociada al mantenimiento de la madera muerta, procedente de masas de pino carrasco tras un gran incendio forestal en el SE de la Península Ibérica. Presumimos que la alta severidad de las quemadas aumenta la α -diversidad pero reduce la densidad y la altura del regenerado de la especie arbórea. En los ecosistemas mediterráneos semiáridos, la saca de madera de alta intensidad después de un incendio puede reducir o potenciar el daño provocado por la perturbación en lugar de mitigarla lo que nos lleva a plantear la hipótesis de que la no intervención relacionada con la remoción de biomasa mitigaría los efectos del fuego, mejorando la calidad biológica del suelo y facilitaría la supervivencia de las plántulas de pino acelerando el proceso de regeneración natural post-incendio. Una adecuada restauración post-incendio podría reducir la vulnerabilidad a nuevos eventos extremos, reduciendo el tiempo que queda para el período de riesgo de inmadurez y acelerando la recuperación para rendir las funciones y servicios ecosistémicos pre-incendio.

3. Metodología

3.1. Zona de estudio

La zona de estudio está situada en el sureste de la Península Ibérica, concretamente en la zona sur de la provincia de Albacete. Hemos incluido en esta ponencia los resultados procedentes del muestreo de tres zonas donde se produjeron grandes incendios forestales en 2012, 2016 y 2017 (Figura 1):

- DONCELES2012: se produjo del 1-6 julio y quemó 6870 ha en el municipio de Hellín, siendo el monte más importante el de Donceles. La precipitación y temperatura media anual es de 286,30 mm y 15,96 °C, respectivamente (datos 1992–2021 de Agencia Española de Meteorología). Los principales accidentes geográficos taludes rocosos formados con caliza dolomítica (300–800 m snm) y perteneciendo al piso bioclimático mesomediterráneo superior. La zona se encuadra bajo clima semiárido frío (BSk) (Kottek et al., 2006) y suelos con bajo contenido de materia orgánica (tipos inceptisoles y aridisoles (Soil Survey Staff, 2014). La serie de vegetación potencial natural corresponde a *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum* (Rivas-Martínez, 1987). La comunidad vegetal pre-incendio estaba conformada por

pinares poco densos de *Pinus halepensis* Mill. Con acompañantes de especies de matorral como *Quercus coccifera* L., *Pistacia lentiscus* L., *Rhamnus lycioides* L. y *Genista spartioides* subsp. *retamoides* (Spach) Rivas Godoy & Rivas Mart (Broom), predominado *Macrochloa tenacissima* (L) Kunth.

- LIETOR2016: a finales de junio quemó casi 700 ha en la Sierra de las Quebradas en el municipio de Liétor. La precipitación y temperatura media anual de es 321,21 mm y 16,60 °C, respectivamente (datos 1992–2021 de Agencia Española de Meteorología). Se dan pocas diferencias de cotas (520–770 msnm), perteneciendo al piso bioclimático mesomediterráneo superior. La zona se encuadra bajo clima semiárido frío (BSk) (Kottek et al., 2006) y suelos con bajo contenido de materia orgánica (tipos inceptisoles y aridisoles (Soil Survey Staff, 2014). La serie de vegetación potencial natural también es una *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum* (Rivas-Martinez, 1987), aunque la vegetación predominante son pinares poco densos (500-700 pies ha⁻¹) de *Pinus halepensis* Mill. con *Quercus coccifera* L., *Salvia rosmarinus* (L.) Schleid, *Brachypodium retusum* (Pers.) Beauv., *Cistus clusii* Dunal, *Lavandula latifolia* Medik., *Thymus vulgaris* L., *Helichrysum stoechas* L., *Plantago albicans* L. y *Macrochloa tenacissima* (L) Kunth.
- YESTE2017: más de 3200 ha se quemaron a finales de julio cerca del Parque Natural de Calares del Mundo y de la Sima, afectando a varios municipios (principalmente Yeste y Molinicos), incluyendo un área quemada en un incendio en 1994 (de más de 14000 ha). La precipitación y temperatura media anual fue de 400-600 mm y 10-14°C, respectivamente (datos 1992–2021 de Agencia Española de Meteorología). La zona es de clima mediterráneo de verano cálido (Csa) (Kottek et al., 2006) y suelos con bajo contenido de materia orgánica (tipos inceptisoles y aridisoles (Soil Survey Staff, 2014)). Las series de vegetación potencial pertenecen a la *Daphno oleoidis-Pineto sylvestris sigmetum*, *Bupleuro rigidi-Querceto rotundifoliae sigmetum* o Berberidi hispanicae-Querceto rotundifoliae sigmetum según la altitud. La comunidad vegetal actual está compuesta por pinares de *P. halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton acompañados de especies arbustivas como *Quercus coccifera* L., *Pistacia lentiscus* L., *Viburnum tinus* L., *Phyllirea angustifolia* L., *Arbutus unedo* L., *Lonicera implexa* Aiton, *Daphne gnidium* L., *Rubia peregrina* L. y *Juniperus oxycedrus* L., entre otros.



Figura 1. Perímetro de los incendios DONCELES2012 (rojo), LIETOR2016 (negro) y YESTE2017 (verde). Las parcelas muestran pies muestreados en zonas no quemadas y con alta severidad, incluyendo con y sin saca de madera (imágenes a izquierda muestran zonas de cada diseño).

3.2. Severidad de quemado y actuaciones post-incendio

Para evaluar daños y efectos de la gestión, calculamos la diferencia del ratio de quemado normalizado (dNBR), relacionando las respuestas de rojo y cercano bandas infrarrojas obtenidas del Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+ (Nivel-3 de <https://earthexplorer.usgs.gov>) para dibujar un mapa de severidad de quema para el perímetro del incendio (Miller and Thode, 2007), el cual fue validado con muestreo de campo (más detalles en (Gómez-Sánchez et al., 2017)). En otoño-invierno después de cada incendio, el servicio forestal de la administración regional (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha) llevó a cabo acciones de emergencia post-incendio (estabilización de laderas y tala de salvamento de madera muerta).

Seleccionamos laderas donde comprobamos, mediante ortofotos, que existía vegetación homogénea antes del incendio (cobertura y estructura similares), que no diferían ambientalmente (exposición al norte y terreno consistente, similar pendiente, elevación y calidad del suelo) y que se habían quemado con alta severidad (HS). Además, con similares criterios, seleccionamos zonas control no quemadas y cercanas (UB). En las zonas de alta severidad, se seleccionaron zonas sin tratamiento post-incendio y con salvamento de madera quemada ejecutado de 6 a 9 meses después del incendio (HSSL).

Para reducir el riesgo de pseudoreplicación espacial, se han seleccionado zonas homogéneas por lo que se evita que los efectos de los gradientes ambientales se minimicen en relación con los factores generados por el fuego.

3.3. Diseño Experimental y Muestreo de vegetacion

Este estudio se realizó dos años después de cada incendio, seleccionando al azar 15 pinos carrascos por subárea (UB, HS y HSSL). Desde cada uno, establecimos parcelas circulares con tamaño variable igual a la proyección de copa de manera similar a la "zona de influencia para la facilitación ecológica" (Chu et al., 2008) ya que la competencia es significativa en etapas jóvenes (Martínez-Sánchez et al., 1999; Moya et al., 2015).

Para aquellas zonas con extracción de madera en pie, se generó una distancia con un modelo de regresión relacionándolo con el diámetro basal del tronco (30 cm sobresuelo) del resto de los individuos muestreados y que fue validado con un muestreo de otros 15 individuos en cada subárea control ($PLOT_{radio} = D_{30base} 17.5$; $R^2 = 91.05\%$; $n = 45$). Este modelo permitió definir el tamaño de la parcela en las subáreas HS y HSSL, donde la copa de los pinos había sido totalmente quemada o removida.

En cada parcela circular con centro el tronco de un individuo, se establecieron tres transectos lineales desde el centro hasta el borde (uno en pendiente máxima y luego 120° de uno a otro, para evitar sesgos debido a la orientación) donde se evaluó la abundancia de plantas mediante una técnica de muestreo anidado y el método de intercepción líneal.

La estructura de la vegetación, la composición de especies y la cobertura vegetal total se evaluaron mediante el registro la cobertura (COBveg) y suelo desnudo (SUELOdes). Con los valores obtenidos del transecto lineal se calcularon los índices de alfa diversidad de Shannon (H') y Simpson (D) (Moya et al., 2020) También se incluyó una estimación de densidad y crecimiento en biomasa de árboles jóvenes de pino contando individuos (REG) y registrando su altura en una subparcela cuadrada (1 m^2) ubicada en el medio de cada transecto lineal.

3.4. Muestreo de suelos y análisis de indicadores

Para incluir todos los factores en el muestreo de suelo tomamos 3 muestras en 3 parcelas de cada sitio y severidad de incendio al tiempo que se realizaron los muestreos de vegetación. Dentro de la parcela, las muestras de suelo fueron recolectadas al azar, tomando la capa superior (5 cm) tras retirar la hojarasca. Después de retirar restos de plantas y escombros, las muestras se pasaron por un tamiz de 2 mm y se mantuvieron a 4°C para evitar ninguna influencia sobre los parámetros analizados en el laboratorio (Moya et al., 2019). Se realizó una caracterización fisicoquímica para caracterizar textura (Gee and Or, 2002), además de pH y conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}) que se midieron en agua desionizada (1:2,5 y 1:5 p:p, respectivamente) a 20°C .

Para caracterizar la calidad del suelo se incluyeron algunos indicadores como la respiración basal del suelo (BSR, mg CO₂-C kg⁻¹ suelo por h) y el carbono de biomasa microbiana (Cmic, mg kg⁻¹ suelo). Siguiendo a (Muñoz-Rojas and Barcenas-Moreno, 2019), la BSR se midió con un respirómetro de múltiples sensores (Micro-Oxymax, Columbus, OH, EE. UU.) y Cmic se determinó mediante técnicas de fumigación-extracción (Vance et al., 1987). Además, se incluyeron cuatro actividades enzimáticas como indicadores bioquímicos: ureasa (UR, μmol NH₄⁺ g⁻¹h⁻¹), deshidrogenasa (DHA, μg INTF g⁻¹), fosfatasa (PHP, μmol PNP g⁻¹ h⁻¹) y β-glucosidasa (GLU, μmol PNP g⁻¹ h⁻¹) que fueron analizadas según (Moya et al., 2019).

3.5. Análisis estadístico

Evaluamos los efectos de la gestión post-incendio en áreas de alta severidad de quemado tanto en la interfaz planta como suelo. En un primer paso realizamos un análisis de correlación mediante la realización de una estadística multivariante análisis de métodos siguiendo el método de Pearson con la que se preseleccionaron variables para ejecutar un análisis de componentes principales (PCA, método de rotación varimax) que estableció una matriz de correlación estandarizada generando valores de covarianza de una lista basada en casos completos. El PCA redujo las variables utilizadas empleando combinaciones lineales, representando parte de la variabilidad contenida en el original pero con una reducción de datos.

Con las variables seleccionadas realizamos modelos lineales generalizados (GLM), que incluyen método de regresión paso a paso (hacia atrás) con las que ejecutar análisis de varianza de una vía (ANOVA). La significancia de diferencias se obtuvieron con la honestidad de Tukey de mayor diferencia significativa (método HSD) con un valor p crítico de 0,05.

Los análisis estadísticos se realizaron con RStudio v. 1.3.1073 (RStudio Team, 2021) y Statgraphics Centurion XV, versión 15.1.02 (StatPoint, Inc., 2005).

4. Resultados

Se realizó un PCA sobre las variables estudiadas para explicar su estructura varianza-covarianza a través de combinaciones lineales y reducción de dimensiones a los componentes principales. El PCA redujo la dimensión a una solución de cinco componentes (valores propios > 1), pero elegimos un modelo simplificado para la componente biplot (ejes componente1 y componente2 que explicaron un 45,69%, Figura 2). El primer componente explicó el 28,47% de la variabilidad (eigenvalue=3,99), mientras que el segundo explicó el 17,22% (eigenvalue=2,41). La influencia de gestión y sitio se alineó con SUELOdes y GLU (en sentido contrario) en la componente2. La respuesta de la comunidad vegetal, principalmente el reclutamiento de pinos (REG) y los patrones de diversidad de plantas (H', COBveg) se relacionaron directamente con UR (dependiendo parcialmente del sitio) e inversamente con el resto de los indicadores de calidad de suelo (BSR, SOM, Cmic), las actividades enzimáticas PHP y DHA y la diversidad de Simpson (D).

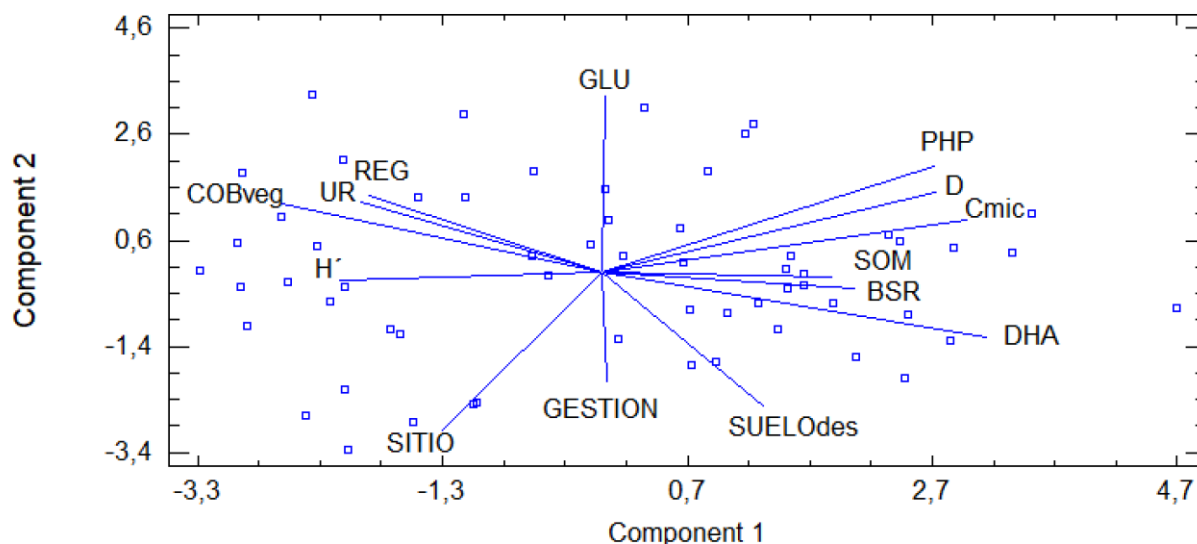


Figura 2. Análisis de Componentes Principales que reduce las variables a un biplot donde la primer componente explicó el 28,47% (Component 1) y el segundo un 17,22% (Component 2). Las variables incluidas son: gestión post-incendio (GESTION), sitio (SITIO), suelo desnudo (SUELOdes), diversidad de Shannon (H') y Simpson (D), cobertura vegetal (COBveg), respiración basal de suelo (BSR), materia orgánica de suelo (SOM), carbono microbiano (Cmic) y actividades enzimáticas (ureasa (UR), deshidrogenasa (DHA), fosfatasa (PHP) y β -glucosidasa (GLU)).

Se trata de un sistema profundamente determinado por el fuego ya que no presenta grandes diferencias entre sitios a pesar de las diferencias de sitio. La mayoría de variables no se ve significativamente afectada o no presenta patrones claros de cambio.

La estructura de la comunidad vegetal se ve alterada por la quema pero la gestión de saca de madera temprana implica una reducción de COBveg en los incendios de zonas más secas (DONCELES2012 y LIETOR2016), aunque el efecto no es significativo en la otra zona (YESTE2017) (Figura 3A). El tratamiento no afecta a la densidad y crecimiento del reclutamiento de la especie arbórea, pino carrasco, en LIETOR2016 pero sin embargo, se reduce REG y Hmedia en DONCELES2012 con la aplicación de la saca de madera y también se ve negativamente afecta la Hmedia de YESTE2017, aunque el reclutamiento es mayor tras gestión (Figura 3B y 3C, respectivamente).

Simultáneamente, la calidad de suelo también se ve alterada por la quema y la gestión de saca de madera temprana, siendo significativa en las actividades enzimáticas GLU y PHP (Figura 4A y 4B, respectivamente). Los valores de GLU se reducen por efecto de la gestión en DONCELES2012 y YESTE2017, aunque el efecto no es significativo en LIETOR2016. En el caso de PHP, no se evidencia efectos en YESTE2017 pero se observa una reducción provocada por el tratamiento en las otras dos zonas.

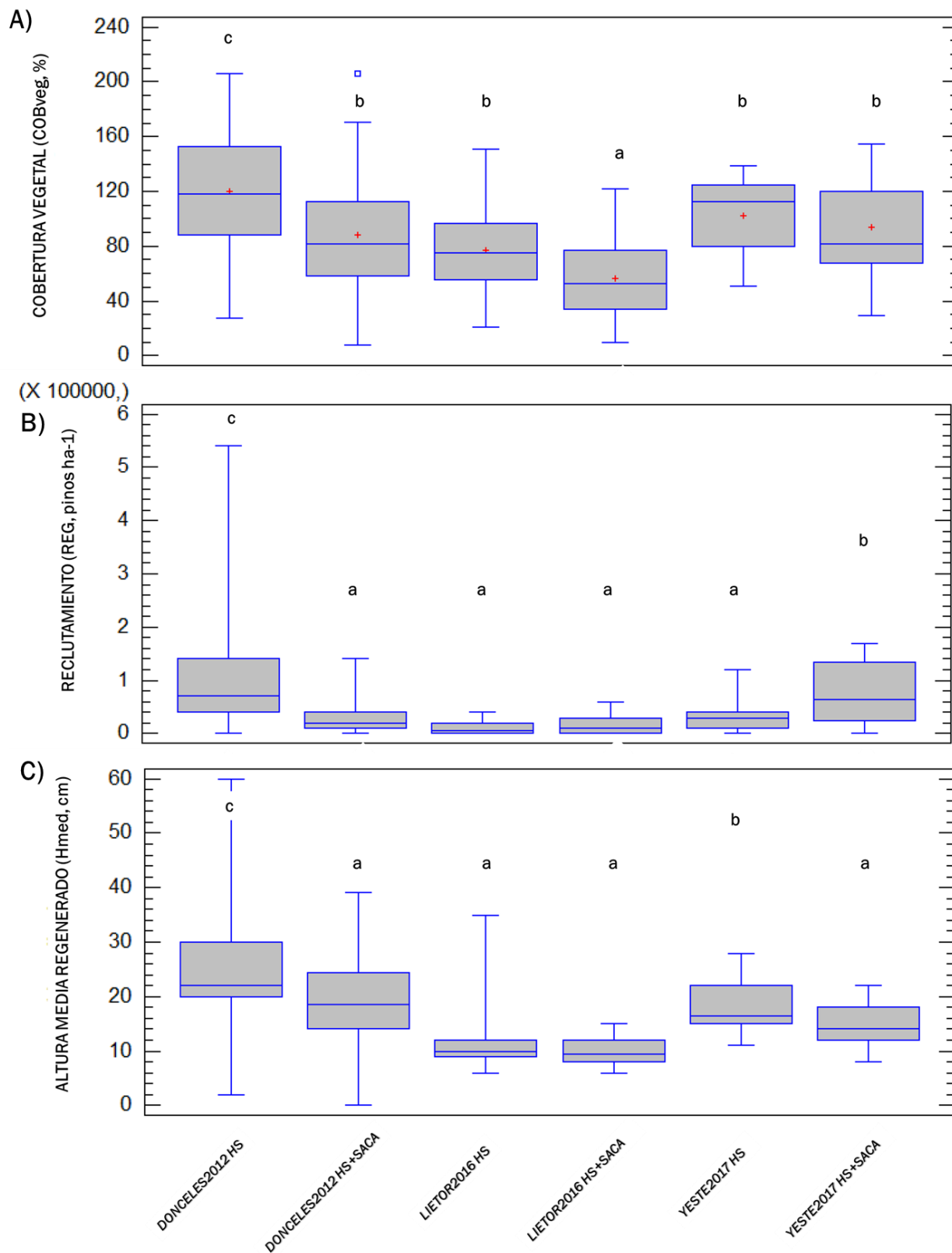


Figura 3. Gráfico de barras y bigotes con resultados del Análisis de Varianza de las variables relacionadas con estructura de la comunidad vegetal en las tres zonas quemadas en alta severidad, sin (HS) y con saca de madera post-incendio (HS+SACA): A) cobertura vegetal total, B) reclutamiento de regenerado natural de pino carrasco, C) altura media de las

plántulas regeneradas. Las letras indican la significancia (Tukey HSD, $p\text{-value} > 0.05$). desnudo (SUELOdes), diversidad de Shannon (H')

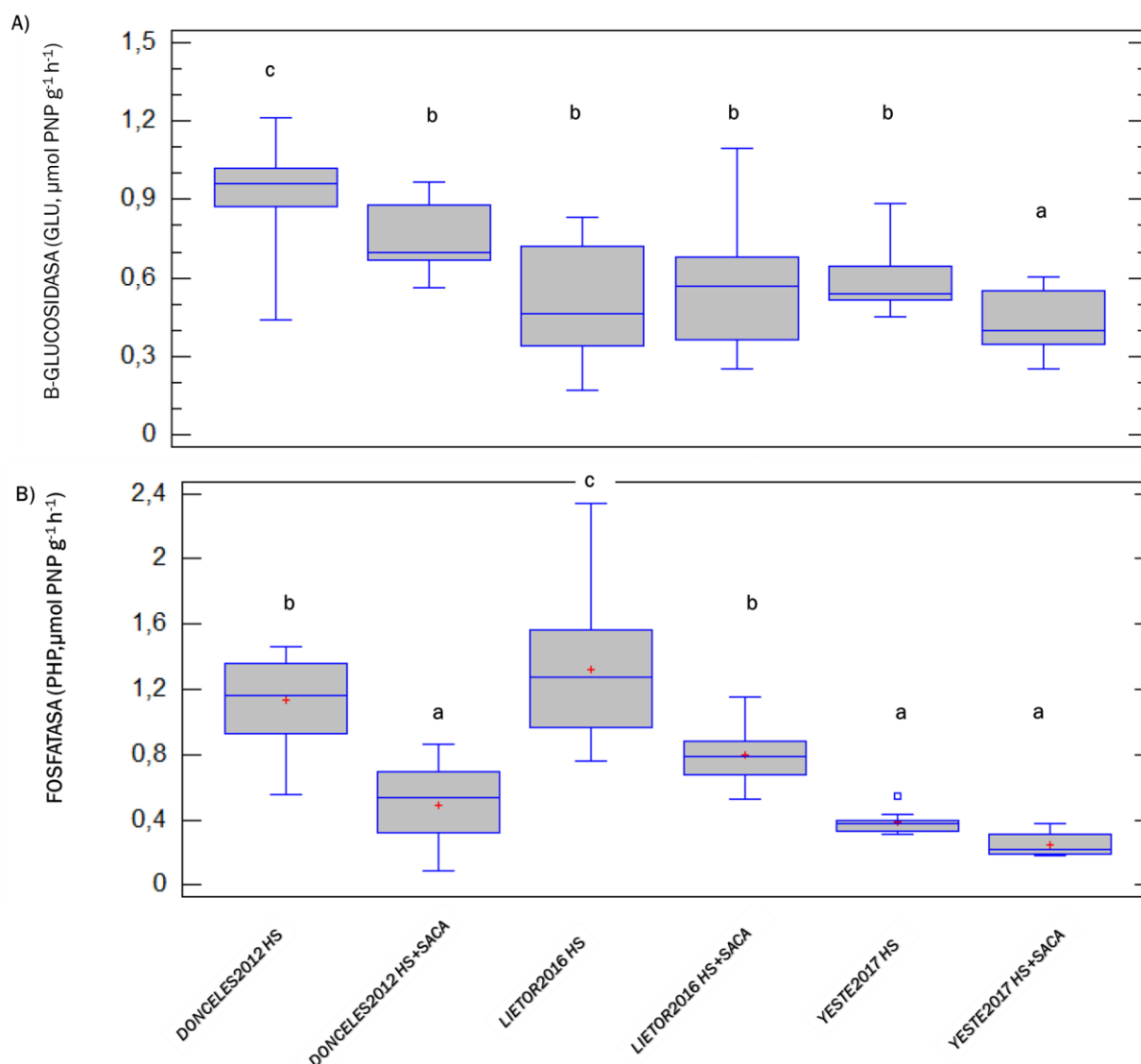


Figura 4. Gráfico de barras y bigotes con resultados del Análisis de Varianza de las variables relacionadas con la calidad de suelo, en concreto las actividades enzimáticas en las tres zonas quemadas en alta severidad, sin (HS) y con saca de madera post-incendio (HS+SACA): A) β -glucosidasa (GLU), B) fosfatasa (PHP).

5. Discusión

La alta severidad de quemado tiene un impacto potente sobre la estructura de la comunidad (cobertura, hojarasca, cambio de composición taxonómica y de biotipos, pérdida de dominancia del arbolado,...), dejando mucho suelo desprotegido que aumenta con la extracción de madera muerta, herramienta que reduce la regeneración y crecimiento de la masa natural (Moya et al., 2020, 2019). En este estudio, con los resultados obtenidos de los análisis realizados a las muestras de suelo y vegetación afectado por la alta severidad de incendio y la gestión aplicada, se puede observar un deterioro de diversas propiedades estudiadas, aunque no hay un patrón claro.

El efecto directo de los incendios forestales en las propiedades del suelo y la gestión, afecta indirectamente a otros procesos por lo que muchos de ellos pueden estar relacionados entre sí (Zavala et al., 2014). La gestión de la restauración post-incendio debe considerar la promoción de la

diversidad vegetal así como opción para prevenir, mitigar y reducir la degradación del suelo (Pereira et al., 2018).

Las acciones de emergencia después del incendio generalmente se implementan para recuperar el suelo como enmiendas orgánicas, paja, trituración, tratamientos, tratamientos de carreteras y senderos y tala de salvamento (Vega et al., 2013), aunque no siempre son positivos para el suelo.

La recolección de madera ha demostrado tener un impacto significativo en las comunidades microbianas del suelo dependiendo de la planificación de la actividad, compactación del suelo forestal o características pre-incendio siendo los suelos arenosos más resistentes que los suelos arcillosos (García-Carmona et al., 2021; Lucas-Borja et al., 2020). Los microorganismos son más sensibles al efecto del fuego y cambios, así los suelos a los que se les aplicó saca de madera en Sierra de Mariola tuvieron una recuperación más lenta de la respiración basal y de la comunidad microbiana (García-Orenes et al., 2017). La actividad microbiana se recupera muy lentamente después del fuego debido a las bajas tasas de mineralización de carbono y a la disponibilidad, lo que podría aumentar gravemente la vulnerabilidad (Hinojosa et al., 2016).

La actividad de la fosfatasa es vulnerable a la severidad de quemado y a cambios en las características del suelo ((Fontúrbel et al., 2012; Moya et al., 2019), como se comprueba en este estudio. De manera similar la actividad glucosidasa ha disminuido en las muestras a las que se les aplicó la saca (Bautista S et al., 2004)

En las últimas dos décadas la saca de madera ha sido una práctica común después de los incendios, pero estudios recientes han reportado que este tratamiento puede ser negativo para la regeneración del ecosistema como el aumento de la escorrentía superficial y erosión del suelo (Castro et al., 2011; Donato et al., 2006; Lindenmayer et al., 2008)

Cabe señalar que los incendios forestales pueden afectar a las propiedades del suelo y su ciclo de nutrientes, pero una restauración adecuada puede estabilizar y mitigar los efectos negativos (Mataix-Solera et al., 2002), siendo objetivo la aceleración de sus funciones (Goberna et al., 2012).

6. Conclusiones

Podemos afirmar que el fuego afecta el ecosistema, provocando pérdida de cubierta vegetal, cambios en la estructura y componentes del suelo. Se observa que la aplicación de gestión de saca de madera temprana no siempre ha provocado efectos significativos, incluso ha sido positiva para unas propiedades y para otras no. Para proyección futura, se propone realizar seguimiento (a corto, medio y largo plazo) del efecto de las actividades de restauración, mediante un conjunto de indicadores de análisis periódico para poder concluir realmente cómo afecta el fuego y las herramientas de mitigación o restauración a las propiedades estudiadas.

7. Agradecimientos

Nuestro agradecimiento por el apoyo realizado por el personal del Servicio Forestal Regional de Castilla-La Mancha (Jose Luis Fernandez Miguel Angel Rodriguez, Ana Gonzalez, Beatriz Serantes y Elena Gomez). Este estudio ha sido financiado con fondos del Instituto Español de Investigación y Tecnología Agraria CSIC-INIA (VIS4FIRE) y MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (ENFIRES: PID2020-116494RR-C43) y fondos autonómicos de la Junta de Comunidades Castilla-La Mancha (PRESFIRE, SBPLY/19/180501/000130).

8. Bibliografía

Alloza, J.A., Vallejo, V.R., 2004. Integración de la restauración forestal de zonas quemadas en la planificación forestal: un ejemplo de I+D en restauración forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 13–20.

Amman, G., Ryan, K., 1991. Insect Infestation of Fire-Injured Trees in the Greater Yellowstone Area. The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography.

Bautista S, Gimeno T, Mayor AG, Gallego D, 2004. Los tratamientos de la madera quemada tras los incendios forestales, Vallejo VR, Alloza JA (eds) La gestion del bosque mediterraneo. Fundacion Centro de Estudios Ambientales del Mediterraneo, Valencia.

Castro, J., 2022. La madera muerta no es basura: por qué retirarla perjudica el bosque [WWW Document]. The Conversation. URL <http://theconversation.com/la-madera-muerta-no-es-basura-por-que-retirarla-perjudica-el-bosque-175127> (accessed 3.10.22).

Castro, J., Allen, C.D., Molina-Morales, M., Marañón-Jiménez, S., Sánchez-Miranda, Á., Zamora, R., 2011. Salvage Logging Versus the Use of Burnt Wood as a Nurse Object to Promote Post-Fire Tree Seedling Establishment. *Restoration Ecology* 19, 537–544. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00619.x>

Chu, C.-J., Maestre, F.T., Xiao, S., Weiner, J., Wang, Y.-S., Duan, Z.-H., Wang, G., 2008. Balance between facilitation and resource competition determines biomass–density relationships in plant populations. *Ecology Letters* 11, 1189–1197. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01228.x>

Collins, B.J., Rhoades, C.C., Battaglia, M.A., Hubbard, R.M., 2012. The effects of bark beetle outbreaks on forest development, fuel loads and potential fire behavior in salvage logged and untreated lodgepole pine forests. *Forest Ecology and Management* 284, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.027>

Donato, D.C., Fontaine, J.B., Campbell, J.L., Robinson, W.D., Kauffman, J.B., Law, B.E., 2006. Post-Wildfire Logging Hinders Regeneration and Increases Fire Risk. *Science* 311, 352–352. <https://doi.org/10.1126/science.1122855>

Eklund, A., Wing, M.G., Sessions, J., 2009. Evaluating Economic and Wildlife Habitat Considerations for Snag Retention Policies in Burned Landscapes. *Western Journal of Applied Forestry* 24, 67–75. <https://doi.org/10.1093/wjaf/24.2.67>

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, Fire effects on soil properties* 191, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.037>

Fraver, S., Jain, T., Bradford, J.B., D'amato, A.W., Kastendick, D., Palik, B., Shinneman, D., Stanovick, J., 2011. The efficacy of salvage logging in reducing subsequent fire severity in conifer-dominated forests of Minnesota, USA. *Ecological Applications*. 21(6): 1895-1901. 21, 1895–1901.

García-Carmona, M., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Roldán, A., Pereg, L., Caravaca, F., 2021. Salvage logging alters microbial community structure and functioning after a wildfire in a Mediterranean forest. *Applied Soil Ecology* 168, 104130. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104130>

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>

Gee, W.G., Or, D., 2002. Particle-Size Analysis, in: Dane, J., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Book Series: 5. Part 4. Soil Science Society of America, USA., pp. 255–293.

Goberna, M., García, C., Insam, H., Hernández, M.T., Verdú, M., 2012. Burning Fire-Prone Mediterranean Shrublands: Immediate Changes in Soil Microbial Community Structure and Ecosystem Functions. *Microb Ecol* 64, 242–255. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9995-4>

Gómez-Sánchez, E.G., Heras, J. de las, Borja, M.E.L., Moya, D., 2017. Ajuste de metodologías para evaluar severidad de quemado en zonas semiáridas (SE peninsular): incendio Donceles 2012. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección* 103–113.

Greene, D.F., Gauthier, S., Noël, J., Rousseau, M., Bergeron, Y., 2006. A Field Experiment to Determine the Effect of Post-Fire Salvage on Seedbeds and Tree Regeneration. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4, 69–74.

Hinojosa, M.B., Parra, A., Laudicina, V.A., Moreno, J.M., 2016. Post-fire soil functionality and microbial community structure in a Mediterranean shrubland subjected to experimental drought. *Science of The Total Environment* 573, 1178–1189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.117>

Karr, J.R., Rhodes, J.J., Minshall, G.W., Hauer, F.R., Beschta, R.L., Frissell, C.A., Perry, D.A., 2004. The Effects of Postfire Salvage Logging on Aquatic Ecosystems in the American West. *BioScience* 54, 1029–1033. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[1029:TEOPSL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[1029:TEOPSL]2.0.CO;2)

Keyser, T.L., Smith, F.W., Shepperd, W.D., 2009. Short-term impact of post-fire salvage logging on regeneration, hazardous fuel accumulation, and understory development in ponderosa pine forest of the Black Hills, SD, USA 18, 451–458.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

Leverkus, A.B., Lorite, J., Navarro, F.B., Sánchez-Cañete, E.P., Castro, J., 2014. Post-fire salvage logging alters species composition and reduces cover, richness, and diversity in Mediterranean plant communities. *Journal of Environmental Management* 133, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.014>

Lindenmayer, Burton P, Franklin, J. F., 2008. *Salvage Logging and Its Ecological Consequences*. Island Press.

Lindenmayer, D.B., Noss, R.F., 2006. Salvage logging, ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conserv Biol* 20, 949–958. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00497.x>

Lucas-Borja, M.E., Ortega, R., Miralles, I., Plaza-Álvarez, P.A., González-Romero, J., Peña-Molina, E., Moya, D., Zema, D.A., Wagenbrenner, J.W., de las Heras, J., 2020. Effects of wildfire and logging on soil functionality in the short-term in *Pinus halepensis* M. forests. *Eur J Forest Res* 139, 935–945. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01296-2>

Marañón, S., 2011. Efecto del manejo de la madera quemada después de un incendio sobre el ciclo del carbono y nutrientes en un ecosistema de montaña mediterránea (<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>). Universidad de Granada.

Marques, M.A., Mora, E., 1998. Effects on erosion of two post-fire management practices: clear-cutting versus non-intervention. *Soil and Tillage Research* 45, 433–439. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(97\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(97)00039-1)

Martínez-Sánchez, J., Ferrandis, P., de las Heras, J., María Herranz, J., 1999. Effect of burnt wood removal on the natural regeneration of *Pinus halepensis* after fire in a pine forest in Tus valley (SE Spain). *Forest Ecology and Management* 123, 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00012-2)

Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Guerrero, C., Gómez Lucas, I., Marco, B., Mataix, J., 2002. Effects of an experimental fire on soil microbial populations in a Mediterranean environment, in: *Man and Soil at the Third Millenium*. pp. 1607–1614.

Mclver, J.D., Starr, L., 2000. Environmental effects of postfire logging: literature review and annotated bibliography. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-486. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 72 p 486. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-486>

Miller, J.D., Thode, A.E., 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

Moya, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M.E., de las Heras, J., 2019. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire. *Journal of Environmental Management* 235, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>

Moya, D., Heras, J.D. las, López-Serrano, F.R., Ferrandis, P., 2015. Post-Fire Seedling Recruitment and Morpho-Ecophysiological Responses to Induced Drought and Salvage Logging in *Pinus halepensis* Mill. *Stands. Forests* 6, 1858–1877. <https://doi.org/10.3390/f6061858>

Moya, D., Sagra, J., Lucas-Borja, M.E., Plaza-Álvarez, P.A., González-Romero, J., De Las Heras, J., Ferrandis, P., 2020. Post-Fire Recovery of Vegetation and Diversity Patterns in Semiarid *Pinus halepensis* Mill. Habitats after Salvage Logging. *Forests* 11, 1345. <https://doi.org/10.3390/f11121345>

Muñoz-Rojas, M., Barcenas-Moreno, G., 2019. Microbiology, in: Pereira, P., Ubeda, X., Mataix-Solera, J., Rein, G., Cerda, A. (Eds.), *Fire Effects on Soil Properties*. CSIRO Publishing, pp. 157–174.

Ne'eman, G., Lahav, H., Izhaki, I., 1995. Recovery of vegetation in a natural east Mediterranean pine forest on Mount Carmel, Israel as affected by management strategies. *Forest Ecology and Management* 75, 17–26. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03544-K](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03544-K)

Pereira, P., Francos, M., Brevik, E.C., Ubeda, X., Bogunovic, I., 2018. Post-fire soil management. Current opinion in environmental science & health.

Prestemon, J.P., Holmes, T.P., 2008. Timber salvage economics. *The Economics of Forest Disturbances: Wildfires, Storms, and Invasive Species*, 167–190.

Rivas-Martínez, S., 1987. Memoria del Mapa de Series de Vegetación de España 1: 400.000. ICONA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, Spain.

Rodríguez Martínez, N., Bordas Martínez, P., Piñeiro Nevado, J., García de Castro, N., Martín, P., Méndez Iglesias, M., 2013. Meta-análisis de los efectos de la retirada de la madera quemada sobre la regeneración de los bosques mediterráneos: un paso hacia una gestión basada en la evidencia. Meta-analysis of the effects of burnt wood removal on Mediterranean forest regeneration: a step towards an evidence-based management. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-1.15>

RStudio Team, 2021. RStudio: Integrated Development for R. RStudio [WWW Document]. RStudio Support. URL <http://www.rstudio.com> (accessed 2.2.21).

Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Valladares, F., 2005. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante: Ecosistemas 14.

Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

Vega, J.A., Fontúrbel, T., Merino, A., Fernández, C., Ferreiro, A., Jiménez, E., 2013. Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. *Plant Soil* 369, 73–91. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1532-9>

Zavala, L.M., Celis, R. de, Jordán, A., 2014. How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 40, 311–332. <https://doi.org/10.18172/cig.2522>