

CURSO 2016-2017



EVALUACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS  
PROPIEDADES DEL SUELO POR EL  
EFECTO DE LA SACA DE MADERA EN UN  
BOSQUE MEDITERRÁNEO TRAS SUFRIR  
UN INCENDIO

ALBA LÓPEZ CARAVACA

Tutores:  
Jorge Mataix Solera  
Victoria Arcenegui Baldó

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES (FACULTAD CIENCIAS EXPERIMENTALES)  
DEPARTAMENTO DE AGROQUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE  
Área de Edafología y Química Agrícola y Área de Geodinámica



## **Agradecimientos**

Sin la financiación por parte del Ministerio de Economía y Competitividad al “proyecto POSTFIRE” (CGL2013-47862-C2-1-R)” y del Ayuntamiento de Alcoy, este estudio no habría sido posible.

Gracias a la ayuda y atención que me han dado mis tutores Jorge y Vicky, que a través de su trabajo han hecho más que agradable la realización de este estudio. Además también tengo que agradecer la confianza y la paciencia que me han demostrado.

Agradecer también el apoyo de José María en el laboratorio, con el que he aprendido a desenvolverme mejor en este trabajo.





## Listado de figuras y tablas

### Figuras:

Figura 1. Diagrama del área afectada por el incendio.

Figura 2. Zona de estudio, Parque Natural de la Sierra de Mariola.

Figura 3. Ejemplo de la saca de madera y el aspecto de la zona de estudio justo después de realizar este tratamiento.

Figura 4. Recogida de muestras (Muestreo 7) en una de las parcelas de la zona de la Saca.

Figura 5. Recogida de muestras (Muestreo 7) en una de las parcelas de la zona del Control.

Figura 6. Distribución de la precipitación ( $L/m^2$ ) en los días 4, 5 y 6 de diciembre de 2016.

Figura 7. Distribución de la precipitación ( $L/m^2$ ) en los días 16, 17, 18 y 19 de diciembre de 2016.

Figura 8. Cárcava formada al cabo de un año en la zona donde se canalizaba la extracción de madera (la imagen muestra la situación actual de la cárcava).

Figura 9. Evolución temporal de la estabilidad de agregados (EA) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 10. Evolución temporal de la capacidad de campo (CC) para la zona no tratada

(Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 11. Evolución temporal del contenido en materia orgánica (MO) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 12. Evolución temporal del contenido en nitrógeno (N) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 13. Evolución temporal del contenido en fósforo asimilable (P) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 14. Evolución temporal de la respiración edáfica basal (REB) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

Figura 15. Evolución temporal de la biomasa microbiana (BM) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años.

### Tablas:

Tabla 1. Diferencias entre los tratamientos a lo largo del estudio (4 años).



## **Resumen**

La gestión post-incendio puede ocasionar un impacto en el ecosistema, a veces incluso mayor que el propio incendio. Una técnica ampliamente utilizada es la saca de madera, en la cual se suele utilizar maquinaria pesada. La gestión del bosque quemado puede afectar a las propiedades del suelo; y tras la saca de madera, los suelos son muy vulnerables a la erosión y la degradación, tal y como indican los anteriores estudios realizados en el "Parque Natural de la Sierra de Mariola". El objetivo de este estudio es evaluar la situación de las propiedades del suelo 4 años después de la saca de madera y comparar con los muestreos anteriores realizados. En los últimos muestreos, las propiedades analizadas se han mantenido estables, aunque en la Saca se observan valores menores al Control. En este estudio se observa una cierta degradación que puede deberse a los episodios de lluvias intensas sufridos en diciembre, un mes antes de la recogida de muestras.

Palabras clave: gestión post-incendio, saca de madera, propiedades del suelo, erosión, degradación.

## **Abstract**

Post-fire management can have an impact on the ecosystem, sometimes even more severe than the fire. A common practice is salvage logging (SL), in which is usually to use heavy machinery. The extraction of burnt wood can affect soil properties if is done in a short-term after fire and over vulnerable soils to erosion and degradation; as previous studies indicate in "Sierra de Mariola Natural Park". The objective of this study is to evaluate the situation of soil properties 4 years after of the salvage logging and to compare with the previous samplings. In the last samplings, soil properties analyzed remained stables although in SL area the values were lower than Control. In this last sampling we observed some degradation that can be caused by heavy rains event occurred during last December, one month before the soil sampling.

Keywords: post-fire management, salvage logging, soil properties, erosion, degradation.





## Índice

<b>1. Introducción</b>	9
<b>2. Antecedentes</b>	11
<b>3. Objetivos</b>	13
<b>4. Material y métodos</b>	14
4.1. Zona de estudio	
4.2. Recogida de muestras y análisis de laboratorio	
4.3. Análisis estadístico	
<b>5. Resultados</b>	22
5.1. Propiedades físicas (estabilidad de agregados, capacidad de campo y repelencia al agua)	
5.2. Contenido en materia orgánica, nitrógeno y fósforo asimilable	
5.3. Biomasa microbiana y respiración edáfica basal	
<b>6. Discusión</b>	28
<b>7. Conclusiones</b>	31
<b>8. Proyección futura</b>	32
<b>9. Bibliografía</b>	32



## **1. Introducción**

Los incendios forestales desde siempre han estado presentes en el medio ambiente, siendo uno de los principales factores que inducen cambios en las comunidades vegetales mediterráneas, como queda demostrado en los registros fósiles de numerosas especies (Le Houerou, 1977; Naveh, 1975). Los ecosistemas mediterráneos están altamente influenciados por este fenómeno, de tal manera que se considera como una de las principales causas de cambio en los ecosistemas y en las propiedades del suelo (e.g.: Andreu et al., 1994; Cerdà, 1996; Certini, 2005; Llovet et al., 2008). El fuego produce un impacto en la productividad del suelo, sobretodo en las áreas quemadas por fuegos de alta intensidad (Robichaud, 2009), que ocurren generalmente en verano debido a las condiciones climáticas extremas típicas de esta estación. Además, el fuego tiene un gran papel en la modelación paisajística mediterránea (Naveh, 1974; 1975), aunque en muchos casos influenciado por el ser humano, que durante milenios ha utilizado el fuego como una herramienta de gestión del territorio para su uso y aprovechamiento (McNeil, 1992). Como consecuencia se obtiene un paisaje fragmentado y muy heterogéneo espacialmente, influyendo en el régimen natural de los incendios forestales (Prosser, 1990).

La gestión post-incendio puede tener un efecto adicional en el ecosistema, en muchas ocasiones incluso más grave que el propio fuego. La saca de madera es una práctica que consiste en retirar la madera quemada a los pocos meses de haber ocurrido el incendio. Para ello se suele utilizar maquinaria pesada, que por la vulnerabilidad del suelo a la erosión y a la degradación se traducen en una gestión potencialmente agresiva para el suelo (Mataix-Solera et al., 2015, 2016).

González-Ochoa et al. (2004), Martínez-Sánchez et al. (1999), Pausas et al. (2004), Vega et al. (2008), y Griffin et al. (2013), además de otros, estudiaron la dinámica de la vegetación en áreas incendiadas y que les realizaron una posterior saca de madera. Todos ellos concluyen que la saca de madera tiene una influencia negativa, en mayor o menor grado, en la recuperación de la vegetación. Wagenbrenner et al. (2016), Morgan et al. (2014) y Sexton (1998) observaron una reducción en la recuperación de la vegetación en las zonas donde se había practicado la saca de

madera en comparación con las zonas control. La recuperación de la vegetación tras la saca de madera se ve obstaculizada por la compactación del suelo (Page-Dumroese et al., 2006) o por la baja disponibilidad hídrica (Marañón-Jiménez et al., 2013) que se produce como consecuencia del paso de la maquinaria pesada. Numerosos estudios han demostrado que la compactación del suelo puede persistir durante décadas, lo que impide el desarrollo de la vegetación (Wert y Thomas, 1981; Froehlich et al., 1985; Vora, 1988; Reisinger et al., 1992; Brevik, 2013).

El aumento de la erosión después de la saca de madera se produce por la reducción de la micro y macro porosidad del suelo (Ares et al., 2005; Horn et al., 2004; Startsev y McNabb, 2000). Wagenbrenner et al. (2016) atribuye este incremento a la circulación de los equipos que provoca una disminución en la velocidad de infiltración, asociado con un incremento en la compactación del suelo.

Se conoce muy poco sobre los efectos que puede tener este tipo de gestión post-incendio en las propiedades del suelo y cómo puede afectar a los ecosistemas. Marañón-Jiménez et al. (2011) relacionó la saca de madera con un descenso en la respiración del suelo, y Serrano-Ortiz et al. (2011) observó un efecto negativo en la capacidad de secuestro de carbono. La saca de madera tiene una afección en la cubierta vegetal (Serrano-Ortiz et al., 2011; Wagenbrenner et al., 2016), y en el microclima del suelo (Lindenmayer y Noss, 2006). También afecta al aporte de materia orgánica, ya que se extraen los árboles muertos que podrían contribuir con aportes aumentando el almacenamiento de carbono orgánico (Smith et al., 2000; DeLuca y Aplet, 2008; Moroni et al., 2010; Seedre et al., 2011). Todos estos factores afectan a las propiedades microbiológicas del suelo, produciendo cambios en las comunidades microbianas y su actividad (Burton et al., 2000; Nadelhoffer, 2000; Tang et al., 2003).

Este estudio es continuación de otro estudio anterior (comenzó hace 4 años) en el que se quería observar los efectos a corto y medio plazo (2 años) que tiene la saca de madera en la zona quemada de la Sierra de Mariola. Para ello se van a comparar dos áreas quemadas en las que en una se ha practicado la saca de madera (6 meses después del incendio) y en otra no se ha realizado ningún tratamiento (control), para ver el impacto que tiene esta gestión post-incendio en la calidad del suelo y la magnitud que tienen estos cambios (Mataix-Solera et al., 2016). Durante los dos

primeros años se observó una degradación progresiva de las propiedades del suelo como consecuencia de una erosión acelerada en la zona de saca de madera (García-Orenes et al., 2017). Se ha seguido muestreando anualmente para valorar la evolución y comprobar si la degradación continúa, se estabiliza o si el suelo se empieza a recuperar. Este es el séptimo muestreo de esa zona, por lo se van a comparar los resultados obtenidos con los de muestreos anteriores.

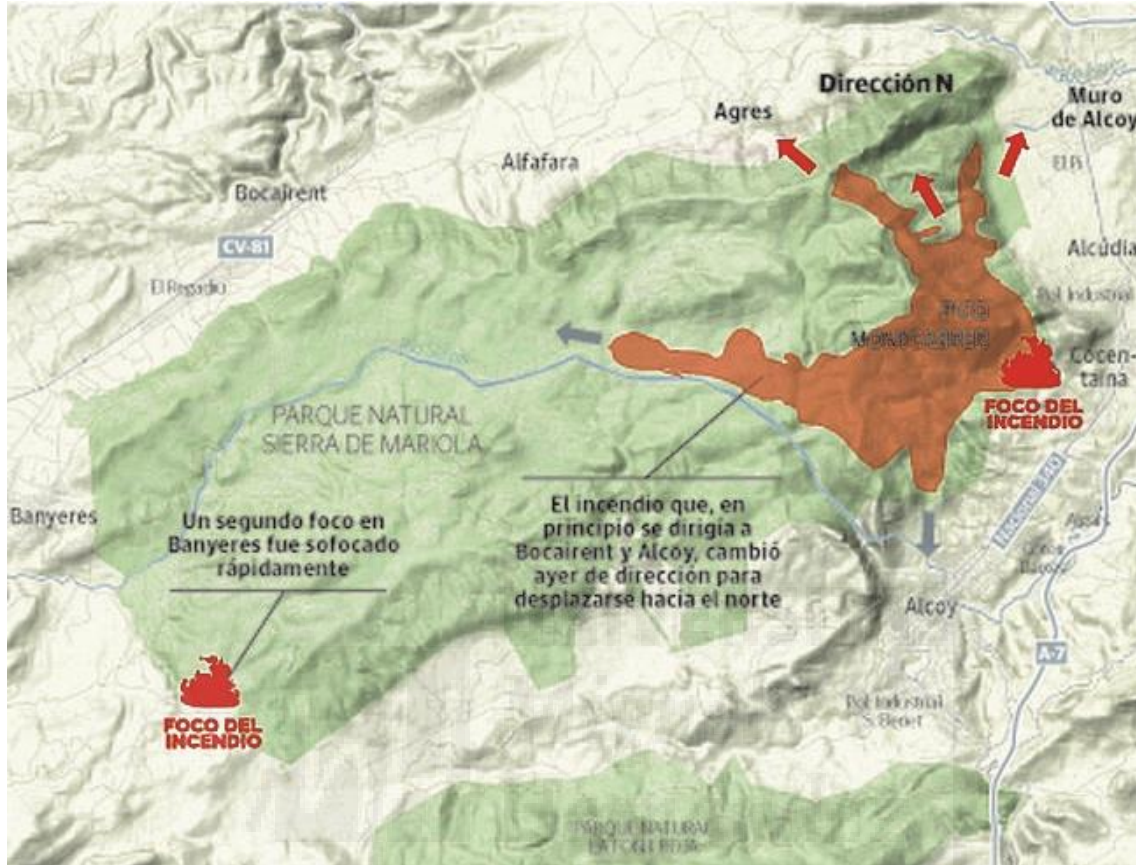
La importancia del estudio radica en que es totalmente necesaria una estrecha colaboración entre investigación y gestión dado que así el trabajo será más eficiente en cuanto a las medidas de restauración post-incendio. Además el estudio permite la posibilidad de cuantificar el impacto de algunas medidas “clásicas” que se realizan en zonas quemadas y que han sido muy poco estudiadas (Mataix-Solera et al., 2016).

## **2. Antecedentes**

El 12 de julio de 2012 se produjo un incendio forestal que arrasó 545,93 has en “El Parque Natural de la Sierra de Mariola”. Se considera un gran incendio forestal (GIF) cuando se superan las 500 ha. El incendio afectó principalmente a la zona definida como ZEC, en la que también entra la ZEPA y varias microrreservas botánicas y parajes naturales de Alcoy y Cocentaina. Fue el mayor incendio forestal sufrido en la Sierra de Mariola desde su declaración como Parque Natural.

Seis meses después del incendio se llevó a cabo la extracción de madera quemada en parte de la zona afectada, para ello se utilizó maquinaria pesada para el arrastre de los troncos, lo que produjo una progresiva degradación de las propiedades del suelo, tanto físicas (estabilidad de agregados, densidad aparente), como químicas (reducción de contenido en materia orgánica en más de un 50%, pérdida de nutrientes), y microbiológicas (disminución de actividad y biomasa microbiana) (Mataix-Solera et al., 2015). Tres años después de la actuación, la cobertura vegetal era muy baja (<50% aproximadamente) y la hipótesis era que el suelo sigue erosionándose y degradándose. El suelo de por sí se trataba de un tipo de suelo muy frágil (Xerorthents sobre sustrato margoso), pero dado que la actuación tuvo lugar a

los escasos 6 meses después del incendio y que la manera de hacerla fue muy agresiva, se vio favorecida dicha degradación.



**Figura 1.** Diagrama del área afectada por el incendio. Fuente: [www.lasprovincias.es](http://www.lasprovincias.es), 2017.

A lo largo del estudio anterior se hicieron varias actividades, tanto de muestreo y análisis como de divulgación. Dado el interés de conocer cómo evolucionaría esta zona, este es el séptimo muestreo que se hace en ella (cuatro años después).

El calendario de las actividades que se han realizado en esta zona es el siguiente:

- 01/02/2013. Día de la extracción de madera. Muestreo 1 suelos
- 12/03/2013. Muestreo 2 suelos\*
- 01/09/2013. Muestreo 3 suelos
- 06/11/2013. Seguimiento vegetación

- 16/05/2014. Muestreo 4 suelos y seguimiento vegetación. Adicionalmente se envían muestras a Eslovaquia y Australia para realizar más analíticas en colaboración con colegas de otros centros.
- 23/10/2014. Muestreo 5 suelos y seguimiento vegetación
- 23/12/2015. Muestreo 6 suelos
- 15/01/2016. Experimentos con lluvia simulada en campo
- 13/03/2016. Actividad divulgativa día del árbol
- **16/01/2017. Muestreo 7 suelos**
- 25/03/2017. Actividad divulgativa día del árbol

\*El Muestreo 2, al realizarse apenas un mes después del Muestreo 1, únicamente se tomaron muestras de las parcelas de saca ya que se consideró el mismo control del Muestreo 1. Por lo tanto, en los análisis estadísticos (desarrollado en un apartado posterior de este estudio) se compara la saca del Muestreo 2 con el control del Muestreo 1.

### **3. Objetivos**

Este estudio tiene como principal objetivo comparar los resultados obtenidos en el muestreo 7, a los 4 años del tratamiento, con los obtenidos anteriormente. Se quiere observar la evolución del suelo a lo largo de estos años para determinar la magnitud del impacto de la saca de madera en la calidad del suelo. Para ello se analizan distintos parámetros en cada una de las zonas quemadas (zonas control y zonas de saca de madera) y se determina si el suelo se sigue degradando, si permanece estable o si ha empezado a mejorar.







*Brachypodium retusum*, etc. El suelo de la zona de estudio se clasifica como un Xerorthent típico según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), y está desarrollado sobre margas, tanto el suelo como el material parental son muy vulnerables a los procesos de erosión y degradación. El suelo tiene un 4,6 % de contenido en materia orgánica en los primeros 5 cm, un 44 % de carbonatos, y su textura se compone por 45% arena, 39% limo y 17% arcilla. El pH es ligeramente alcalino (8,4) y una conductividad eléctrica de 115,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El incendio tuvo lugar en julio de 2012, que se prolongó durante 4 días y afectó a un total de 546 ha. Se considera un gran incendio forestal (GIF) cuando se superan 500 has. Mayoritariamente se vio afectada la zona definida como ZEC, compuesta por ZEPA y varias microrreservas botánicas y parajes naturales de Alcoy y Cocentaina. Este incendio fue el de mayores proporciones sufrido en la Sierra de Mariola desde que se declaró Parque Natural. Seis meses después del incendio, en febrero de 2013, se procedió a la saca de madera que consistió en la completa extracción de la madera quemada usando maquinaria pesada, mediante corta de troncos y arrastre sobre el suelo con cadenas hasta los caminos.



**Figura 3.** Ejemplo de la saca de madera (imagen de la izquierda) y el aspecto de la zona de estudio justo después de realizar este tratamiento (imagen de la derecha). Foto: J. Mataix-Solera, 2013.

## 4.2 Recogida de muestras y análisis de laboratorio

El día 16 de enero de 2017 se llevó a cabo la recogida de muestras del séptimo muestreo, siguiendo el mismo diseño de muestreo que en los anteriores. En la zona de estudio hay diseñadas seis parcelas de 2x2 metros, tres de las cuales son la zona control, dónde no se ha realizado ningún tratamiento y las otras tres representan la saca de madera. En cada parcela se han recogido tres muestras, por lo que hay un total de 18 muestras (de las cuales se obtendrían sub-réplicas en función de la metodología analizada). Con el fin de obtener unos resultados comparables, todas las parcelas de los dos tratamientos se marcaron en zonas con condiciones similares en cuanto a orientación, pendiente, vegetación previa, etc.



**Figura 4.** Recogida de muestras (Muestreo 7) en una de las parcelas de la zona de la Saca. Foto: J. Mataix-Solera, 2017.





**Figura 5.** Recogida de muestras (Muestreo 7) en una de las parcelas de la zona del Control. Foto: J. Mataix-Solera, 2017.

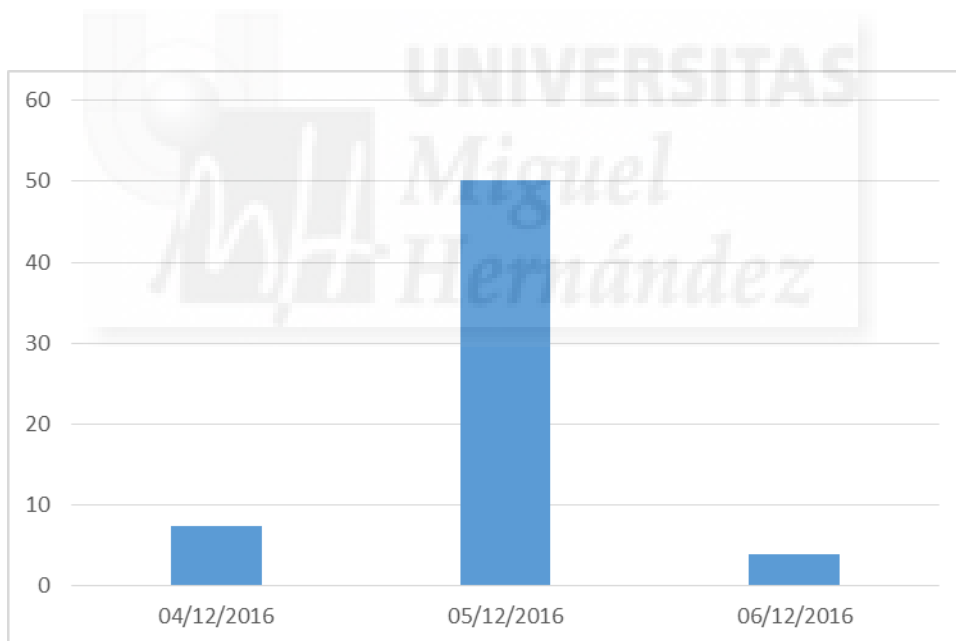
En todas las muestras de suelo tomadas en campo, se analizaron los siguientes parámetros en laboratorio:

- Estabilidad de Agregados (EA)
- Repelencia al agua (Hidrofobicidad)
- Capacidad de Campo (CC)
- Materia Orgánica (MO)
- Contenido en Nitrógeno (N)
- Contenido en Fósforo asimilable (P)
- Biomasa Microbiana (BM)
- Respiración Edáfica Basal (REB)

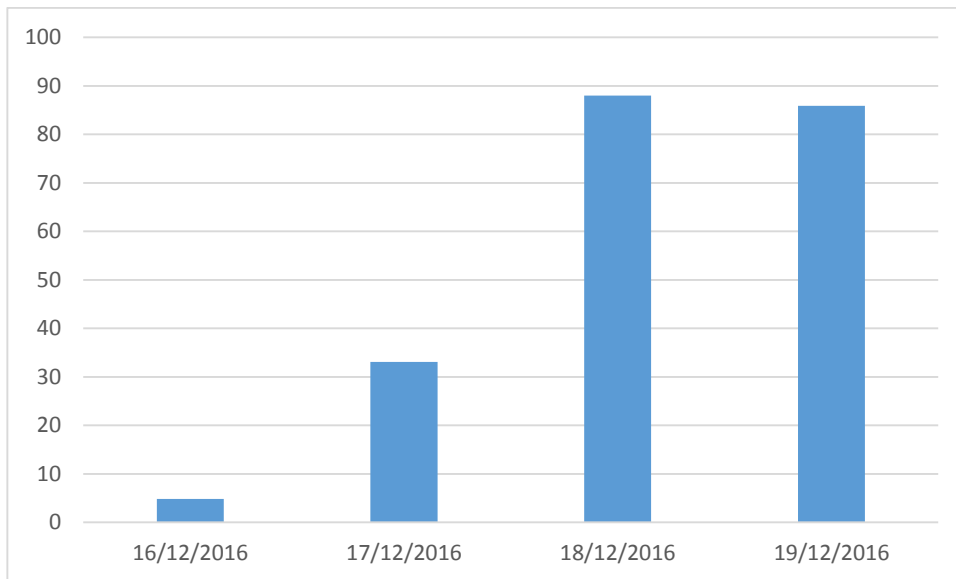
El primer muestreo se hizo inmediatamente después de que tuviese lugar la saca de madera (2013), y a partir de ese momento cada seis meses. Suman hasta el momento siete muestreos, realizados en las proximidades de las áreas marcadas para

respetar la cobertura vegetal. Se recogen tres muestras de suelo (0-5 cm de profundidad) por parcela en el horizonte mineral del suelo A. La profundidad a la que se realizan las muestras viene determinada por un promedio de la profundidad a la que se estima que afecta este tipo de tratamiento (saca de madera). La profundidad a la que se ve afectada el suelo en determinadas zonas donde los troncos han sido arrastrados y apilados es mayor, pero no es representativa; por ello, estas zonas deben ser evitadas a la hora de instalar las parcelas, de manera que se escojan las áreas más representativas del tratamiento realizado.

Debemos remarcar que durante el pasado mes de diciembre (2016), tuvieron lugar dos episodios de lluvias intensas en los periodos comprendidos del 4 al 6, con un total de 61,3 L/m<sup>2</sup>, y del 16 al 19, alcanzándose los 211,8 L/m<sup>2</sup>. Las lluvias se distribuyeron como se muestra en las Figuras 6 y 7.

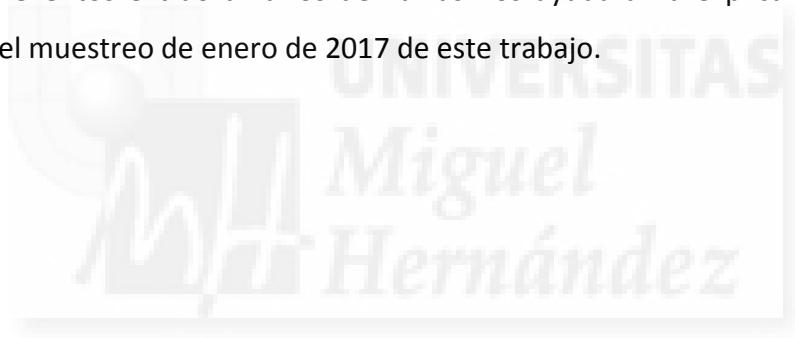


**Figura 6.** Distribución de la precipitación (L/m<sup>2</sup>) en los días 4, 5 y 6 de diciembre de 2016. Fuente: [www.avamet.org](http://www.avamet.org), 2017.



**Figura 7.** Distribución de la precipitación (L/m<sup>2</sup>) en los días 16, 17, 18 y 19 de diciembre de 2016. Fuente: [www.avamet.org](http://www.avamet.org), 2017.

Estos eventos extraordinarios de lluvias nos ayudarán a explicar parte de los resultados del muestreo de enero de 2017 de este trabajo.







**Figura 8.** Cárcava formada al cabo de un año en la zona donde se canalizaba la extracción de madera (la imagen muestra la situación actual de la cárcava). Foto: J. Mataix-Solera, 2017.

Las muestras de suelo se dejaron secar y seguidamente se tamizaron, para analizar la estabilidad de agregados entre 4-0,25 mm y para el resto de análisis físico-químicos a menos de 2 mm. Para todas las muestras se determinaron los siguientes parámetros: repelencia al agua (hidrofobicidad), capacidad de campo (CC), materia orgánica (MO), contenido en nitrógeno (N), contenido en fósforo asimilable (P), biomasa microbiana (BM), respiración edáfica basal (REB) y estabilidad de agregados (EA).

- Estabilidad de agregados (EA): La estabilidad de agregados se mide siguiendo el método de Roldán et al. (1994), basado en el método de Benito y Díaz-Fierros (1989). Este método analiza la proporción de agregados que permanecen estables después de someter la muestra de suelo (tamizada entre 4-0,25 mm) a una lluvia artificial de energía conocida ( $270 \text{ J m}^{-2}$ ).

- Repelencia al agua (RA, hidrofobicidad): La repelencia al agua del suelo se determina con el tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) (Wessel, 1988). Se ponen aproximadamente 10 g de suelo (<2 mm) en un disco de plástico (50 mm de diámetro), y se deja durante 24 horas en el laboratorio en una atmósfera controlada (20°C, 50% de humedad relativa) para establecer las mismas condiciones en todas las muestras (Doerr et al., 2002). Para cada muestra se realiza un promedio entre tres gotas y este valor es el WDPT de la muestra, que se clasifica de acuerdo con Bisdorf et al. (1993) y Doerr et al. (1998): sin repelencia (WDPT < 5 s), ligeramente repelente al agua (WDPT: 5-60 s), fuertemente repelente al agua (WDPT: 60-600 s), severamente repelente al agua (WDPT: 600-3600 s) y extremadamente repelente al agua (WDPT > 3600 s).
- Capacidad de campo (CC): La capacidad de campo se analiza siguiendo el método de Forster (1995).
- Materia orgánica (MO): La materia orgánica se determina por el método de oxidación del dicromato potásico (Nelson y Sommers, 1982).
- Contenido en nitrógeno (N): El contenido en nitrógeno total se determina por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982).
- Contenido en fósforo asimilable (P): El contenido en fósforo asimilable se analiza siguiendo el método de Burriel-Hernando (Díez, 1982).
- Biomasa microbiana (BM): La biomasa microbiana se determina por el método de fumigación-extracción (Vance et al., 1987).
- Respiración edáfica basal (REB): La respiración edáfica basal se mide en un respirómetro de sensor múltiple (Micro-Oxymax, Columbus, OH, USA).

### 4.3 Análisis estadístico

Los valores siguen una distribución normal para todas las propiedades del suelo que se han analizado, por lo que se ha utilizado el test Kolmogorov-Smirnov de  $p < 0,05$ . Para comparar los efectos de los tratamientos post-incendio (Control y Saca) se ha realizado el test t-Student para cada muestreo de manera independiente. Además, para ver la variabilidad temporal de los valores obtenidos en cada muestreo se ha realizado ANOVA para cada uno de los tratamientos. Los grupos de variabilidad se han establecido siguiendo el test post-hoc Tukey  $p < 0,05$ , asumiendo la misma varianza.

## 5. Resultados

En la Tabla 1 se muestra la comparativa estadística entre tratamientos para cada uno de los muestreos realizados. Podemos comprobar como en el último muestreo, objeto de este trabajo, a los 4 años desde la realización del tratamiento de saca de madera se siguen observando diferencias significativas para todos los parámetros excepto para la estabilidad de agregados entre Control y Saca.

**Tabla 1.** Diferencias entre los tratamientos a lo largo del estudio. Significancia: \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ ; ns: no significativo ( $p > 0,05$ ).

Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Muestreo 6	Muestreo 7
EA	ns	***	***	***	***	***	ns
CC	**	ns	**	***	**	***	***
MO	ns	ns	***	***	***	*	*
N	ns	ns	**	***	***	***	***
P	ns	ns	**	ns	***	*	***
BM	ns	*	***	***	***	*	***
REB	ns	**	ns	**	***	*	***

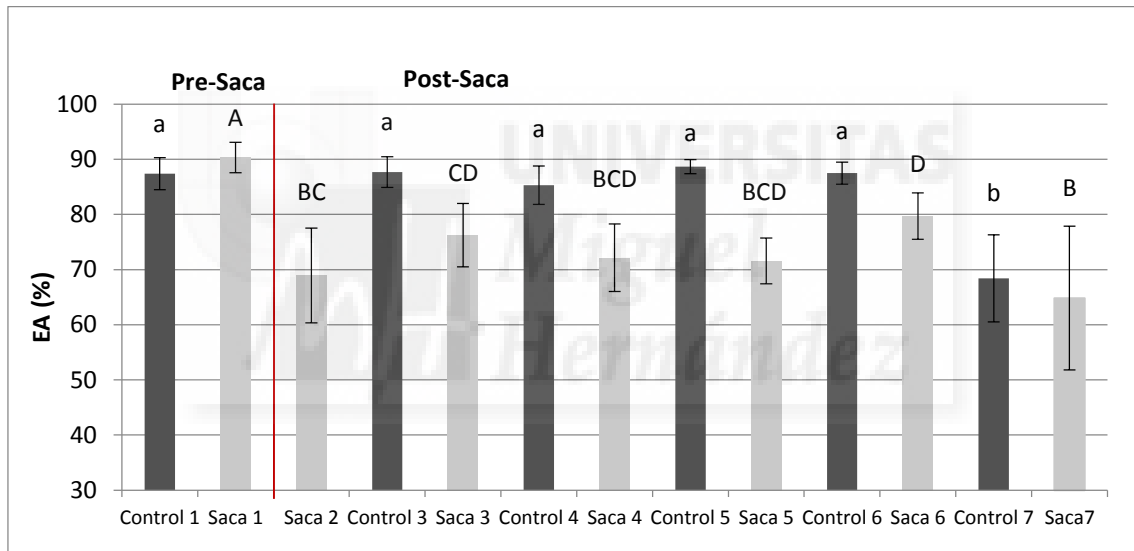
EA: estabilidad de agregados; CC: capacidad de campo; MO: contenido materia orgánica; N: contenido en nitrógeno; P: fósforo asimilable; BM: biomasa microbiana; REB: respiración edáfico basal.



## 5.1 Propiedades físicas del suelo (estabilidad de agregados, capacidad de campo y repelencia al agua)

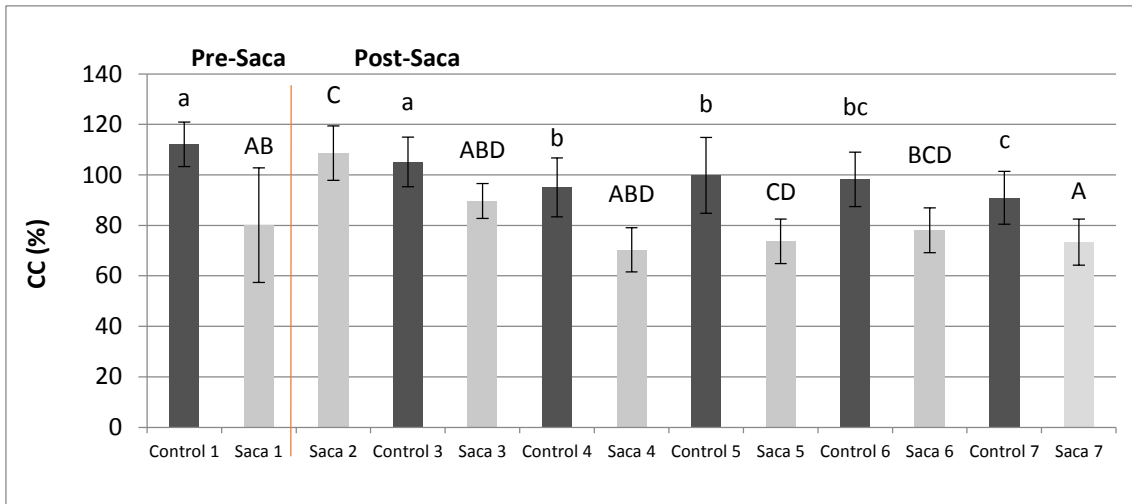
La saca de madera ha tenido un impacto en algunas de las propiedades físicas del suelo.

Según se observa en la Figura 9, la evolución de la estabilidad de agregados es la siguiente: después del fuego el porcentaje de agregados estables se mantenía cerca del 90%, pero la saca de madera provocó una reducción de la estabilidad de agregados de aproximadamente el 20%, como se puede ver en el Muestreo 2 realizado 6 meses después de la aplicación del tratamiento. En los muestreos siguientes, estos valores se mantienen estables hasta este último muestreo, en el que se aprecia un descenso en ambos tratamientos de un 10%.



**Figura 9.** Evolución temporal de la estabilidad de agregados (EA) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

La capacidad de campo no muestra gran variabilidad a lo largo de los muestreos (Figura 10), aunque sí se percibe que los valores observados en la zona de la Saca son menores que los de la zona del Control ( $p < 0,05$ ).

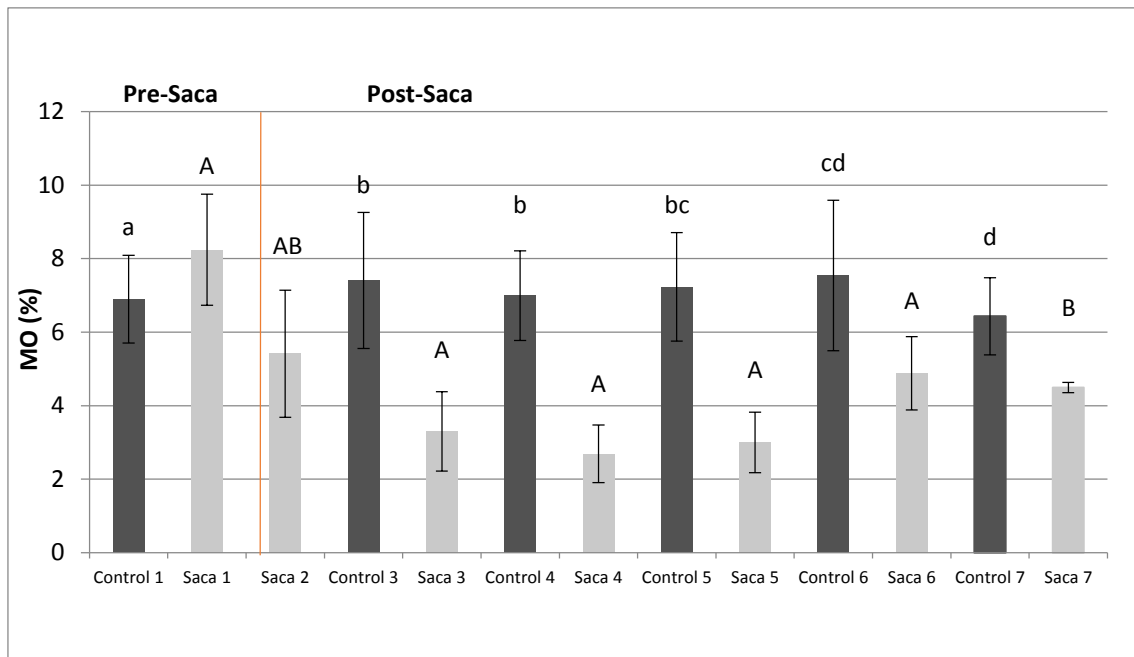


**Figura 10.** Evolución temporal de la capacidad de campo (CC) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

En ninguno de los muestreos durante todo el estudio se observó repelencia al agua.

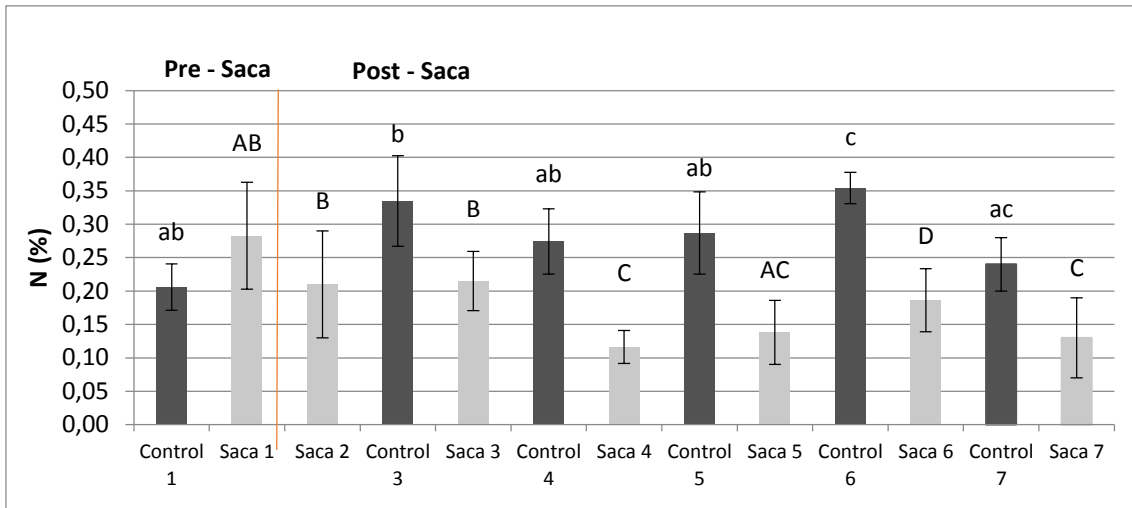
## 5.2 Contenido en materia orgánica, nitrógeno y fósforo asimilable

En la Figura 11, se muestra la evolución del contenido en materia orgánica. En la zona de Saca se observa un decrecimiento progresivo en el contenido de materia orgánica. La tendencia decreciente tuvo lugar hasta el Muestreo 5, a partir del cual se observa una pequeña recuperación. Por su parte, los valores de la zona del Control se mantienen estables a lo largo de todo el estudio. Entre los tratamientos, las diferencias fueron significativas desde el Muestreo 3 hasta el Muestreo 7 (Tabla 1).



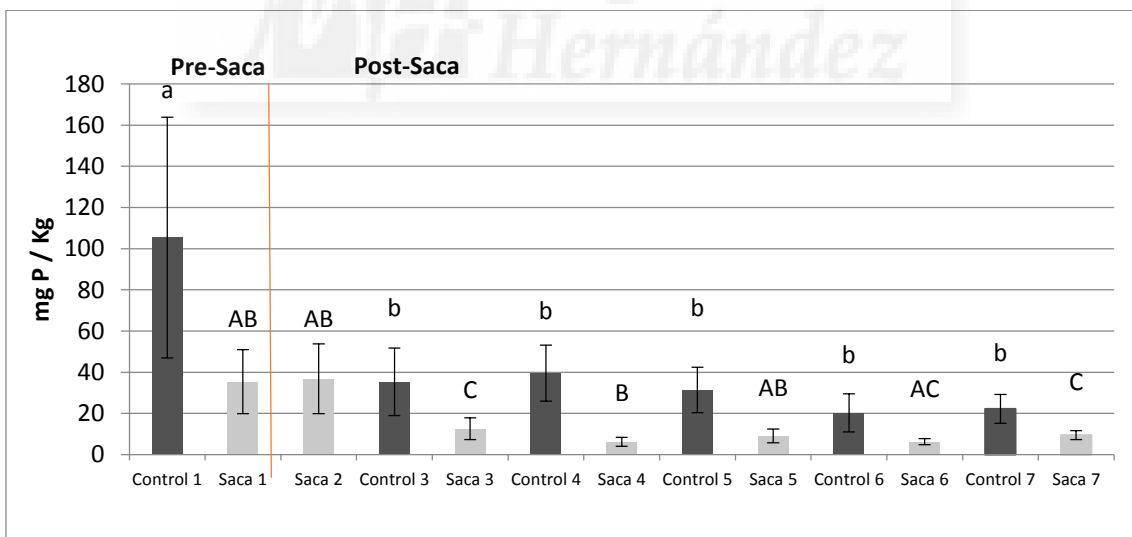
**Figura 11.** Evolución temporal del contenido en materia orgánica (MO) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

El contenido en nitrógeno sigue un comportamiento muy similar al de materia orgánica, tal y como se muestra en la Figura 12. En la zona donde se realizó la Saca se observa una pérdida del contenido en nitrógeno de manera progresiva (50%) hasta el Muestreo 5. En el Muestreo 6 se observa una recuperación significativa ( $p < 0,05$ ). Este último muestreo señala un descenso del contenido en nitrógeno en relación al muestreo anterior, tanto en los valores obtenidos en la zona de Saca como en la zona del Control. En el suelo del Control se puede observar una recuperación del primer muestreo a los siguientes con diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).



**Figura 12.** Evolución temporal del contenido en nitrógeno (N) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

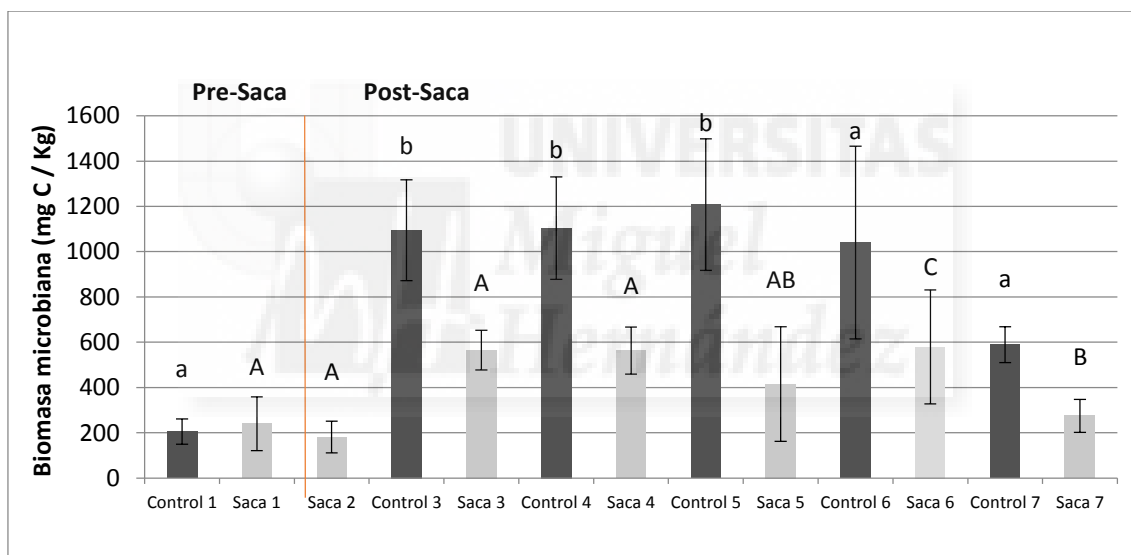
En la Figura 13 se observa la evolución del contenido en fósforo asimilable se puede apreciar que los valores se mantienen estables a lo largo de todo el estudio, siendo los valores de la zona de la Saca menores.



**Figura 13.** Evolución temporal del contenido en fósforo asimilable (P) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

### 5.3 Biomasa microbiana y respiración edáfica basal

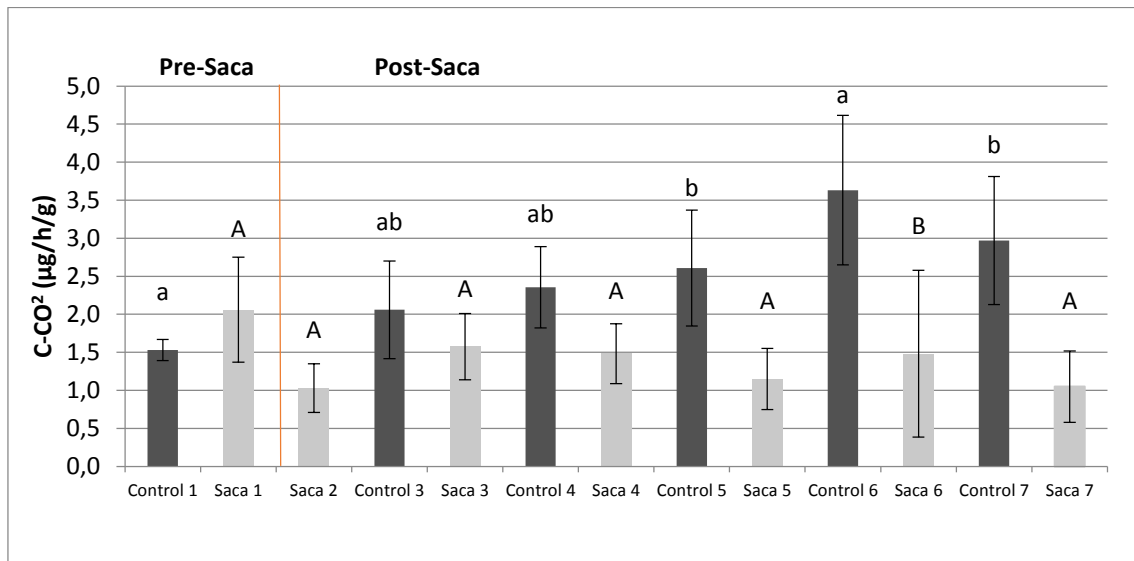
La biomasa microbiana es uno de los parámetros más afectados por el fuego, como se observa en la Figura 14, en los bajos valores de contenido en carbono de la biomasa microbiana registrados en el Muestreo 1 realizado a los 6 meses del incendio. Los valores rondan los 300 mg C kg<sup>-1</sup>. El promedio de contenido en carbono de la biomasa habitual en suelos forestales Mediterráneos es de 800-1200 mg C kg<sup>-1</sup> (Zornoza et al., 2007; García-Orenes et al., 2012). Se puede apreciar que en la zona del Control estos valores se recuperan a partir del Muestreo 3, mientras que en la zona de Saca no llegan a los 600 mg C kg<sup>-1</sup>. En este último muestreo se observa un descenso de aproximadamente el 50% en el carbono de la biomasa microbiana para ambos tratamientos.



**Figura 14.** Evolución temporal de la biomasa microbiana (BM) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

Ocurre algo similar en la actividad microbiana, medida como respiración edáfica basal con valores bajos inmediatamente después del incendio en todas las muestras analizadas. Como se puede observar en la Figura 15, la zona del Control recupera la actividad microbiana en los siguientes muestreos mientras que en la zona de la Saca los valores siguen bajos en relación al Control. Los valores registrados de cada tratamiento muestran diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). En este último muestreo

se percibe un descenso en los valores para ambos tratamientos, de aproximadamente 0,5  $\mu\text{g}/\text{h}/\text{g}$  de C-CO<sub>2</sub>.



**Figura 15.** Evolución temporal de la respiración edáfica basal (REB) para la zona no tratada (Control) y la zona de extracción de madera (Saca). Periodo del estudio 4 años. Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (1-7), minúsculas para Control y mayúscula para Saca.

## 6. Discusión

Los diferentes métodos de la gestión post-incendio que se pueden aplicar para obtener una correcta recuperación de las propiedades del suelo tras haber sufrido un incendio han sido sujetos a diversos debates (Beschta et al., 2004; Donato et al., 2006; Lindenmayer et al., 2004; McIver y Tarr, 2001). La saca de madera es una técnica muy común desde las dos últimas décadas, pero en los últimos años se han llevado a cabo estudios que concluyen en que este tratamiento post-incendio genera un impacto en los ecosistemas y su regeneración (Donato et al., 2006; Lindenmayer y Noss, 2006; Castro et al., 2010, 2011).

En este estudio, la degradación del suelo que genera la saca de madera es muy clara, tal y como muestran los diferentes parámetros del suelo que se han analizado. Físicamente, el suelo sufre una alteración directa por el uso de maquinaria pesada para

la extracción de la madera, lo que se traduce en una compactación del suelo, como se observó en muestreos previos en un aumento de la densidad aparente y un descenso de la estabilidad de agregados (García-Orenes et al., 2017). El contenido en materia orgánica y la estabilidad de agregados están positivamente correlacionadas en los suelos forestales de esta región (Chrenková et al., 2014). La pérdida de materia orgánica y el efecto en la estructura del suelo pueden ser consecuencia de la pérdida en la CC encontrada en las muestras de suelo de la zona de Saca. Esta alteración en la estructura del suelo y la disminución en la cobertura vegetal ocasiona un incremento en las tasas de erosión (Larsen et al., 2009; Wagenbrenner y Robichaud, 2014). En cuanto a la hidrofobicidad, ni este ni en los muestreos anteriores se ha observado en el suelo para ninguno de los tratamientos repelencia al agua. Esto no resulta extraño ya que no todos los incendios provocan repelencia al agua. La repelencia al agua viene determinada por varios factores, como puede ser la temperatura que se alcanza durante el incendio (Arcenegui et al., 2007) y el tipo de suelo y sus propiedades, que pueden controlar su desarrollo durante el incendio (Mataix-Solera et al., 2014).

La materia orgánica en los suelos a los que se les ha aplicado la saca de madera como gestión post-incendio puede disminuir hasta 7-3% en los primeros 5 cm del suelo; esta pérdida de materia orgánica es mayor que las observadas en zonas Mediterráneas quemadas con alta intensidad (Mataix-Solera et al., 2002). Los valores obtenidos en la zona del Control se mantienen estables durante los anteriores muestreos excepto en este, que se ha observado una disminución. Algunos autores sugieren que este descenso en el contenido de materia orgánica después del fuego puede ser producido por la erosión (Hatten et al., 2005). En nuestro caso, los resultados en la zona de la saca de madera demuestran que en esta zona ha habido mayor erosión que en la zona Control. Este hecho puede ser la causa de la reducción en el contenido de materia orgánica de forma progresiva, que puede verse facilitado al tener en cuenta otras condiciones como es la menor cobertura de vegetación, que provoca un aumento en las temperaturas que alcanza el suelo. En este estudio (Muestreo 7), se ha observado una disminución en ambos tratamientos. Este descenso en el contenido de materia orgánica ha afectado por igual a ambas zonas, lo que sugiere que se debe a los periodos de lluvias intensas que tuvieron lugar el pasado mes

de diciembre. Estos episodios tuvieron lugar un mes antes de la recogida de muestras, llegándose a recoger más de 200 L/m<sup>2</sup> en tres días (Figura 7).

Los parámetros microbiológicos son muy sensibles a las perturbaciones que ha sufrido el suelo, y en este estudio se observa en ambos tratamientos (Control y Saca) un efecto directo del fuego en la biomasa microbiana del suelo y en su actividad. El efecto del fuego en la biomasa microbiana se observa en los dos primeros muestreos, en los que se alcanzan valores muy bajos de biomasa microbiana. Esto se debe al impacto que tiene en la microbiología del suelo el calor que se alcanza durante el incendio (Mataix-Solera et al., 2009). En la zona de la Saca, estos valores se mantienen bajos durante todo el estudio debido a que su recuperación es más lenta al tener una menor cubierta vegetal. En el Muestreo 7 se observan valores menores en ambos tratamientos, lo que también se relaciona con los episodios de lluvias intensas. La actividad microbiana medida como respiración edáfica basal muestra valores bajos al inicio del estudio con una tendencia positiva para el Control y una tendencia negativa para la Saca. Estos dos parámetros han sido afectados por la saca de madera.

Mantener los troncos quemados sobre la superficie del suelo puede evitar la pérdida de materia orgánica, además de suponer un aporte de nutrientes al suelo que favorece una buena población microbiana y su actividad (Harmon et al., 1986; Grove, 2003; Coleman et al., 2004), en este estudio se registran niveles mayores de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en el suelo de la zona del Control (sin tratamiento post-incendio). Los troncos caídos en la superficie facilitan el contacto bosque-suelo y su descomposición (Maser y Trappe, 1984; Harmon et al., 1986), lo que explica que se haya obtenido una mayor respiración edáfica basal en la zona del Control que en la de la Saca. Al mantener la madera quemada sobre el suelo se reduce la desecación producida por el calor que absorbe el suelo si éste estuviese desnudo o con una menor cobertura vegetal (Stoddard et al., 2008; Castro et al., 2011). Los troncos y las ramas quemadas sirven de protección al suelo, otorgándole unas buenas condiciones microclimáticas para la regeneración vegetal (Harmon et al., 1986; Lindenmayer y Noss, 2006; Stoddard et al., 2008). Estas condiciones promueven el desarrollo de los microorganismos e incrementan su actividad (Marañón-Jiménez et al., 2011). Por otro lado, la gestión post-incendio llevada a cabo ha potenciado el efecto negativo del



fuego en el suelo produciendo un proceso de degradación, como muestra el lento y menor desarrollo de la población microbiana del suelo, que está fuertemente relacionado con la estructura del suelo, el contenido en materia orgánica y otras propiedades (García-Orenes et al., 2010). Otros estudios también han demostrado que este tipo de tratamientos pueden afectar a las comunidades microbianas (Jennings et al., 2012) y al ciclo de los nutrientes (Brais et al., 2000).

Además, la saca de madera tiene un efecto negativo en el banco de semillas del bosque quemado y puede afectar a la regeneración vegetal después del incendio, reduciendo la densidad de vegetación (Martínez-Sánchez et al., 1999; McIver y Starr, 2001), lo que también se puede observar en este estudio. Este estudio coincide con otros autores que han observado que la saca de madera tiene como consecuencia una reducción en la cobertura vegetal (Serrano-Ortiz et al., 2011; Wagenbrenner et al., 2016). Esta conclusión se ve apoyada por un estudio realizado en esta misma zona (Jara-Navarro, 2015), que demostraba que las alteraciones producidas al suelo por el uso de maquinaria pesada y el arrastre de troncos a la hora de realizar la extracción de madera reduce también la aparición de una nueva cubierta vegetal. Como resultado se halló una menor abundancia en las parcelas pertenecientes al tratamiento de la saca de madera.

## **7. Conclusiones**

Los resultados obtenidos demuestran una degradación del suelo a los 4 años de haber realizado la saca de madera. Se han encontrado diferencias entre los tratamientos para muchos de los parámetros estudiados; como el contenido en materia orgánica en los primeros 5 cm del horizonte superficial del suelo, estando éste en la zona de la Saca con un 50% menos que en la zona Control. La respiración edáfica basal y la biomasa microbiana son significativamente menores ( $p < 0,05$ ) en la zona de la Saca.

Como conclusión, se puede afirmar que en este tipo de suelo, el cual es muy vulnerable a la erosión y a la degradación, la saca de madera tiene un efecto negativo en el ecosistema. Esta degradación se mantiene en el tiempo, reduciéndose el ritmo de

recuperación. También hemos podido comprobar que episodios de lluvias intensas pueden tener un fuerte impacto en este suelo, como demuestran los resultados obtenidos. La erosión producida por estas lluvias intensas no solamente ha afectado a la zona de la Saca, sino que también ha tenido un impacto en la zona Control. Esto demuestra que esta zona, 4 años después del incendio, sigue siendo vulnerable a la erosión y a la degradación.

## **8. Proyección futura**

En primer lugar, no se recomienda llevar a cabo un manejo post-incendio que contemple la saca de madera a corto plazo, pero en el caso de que los gestores recomendasen su realización deberá aplicarse de la mejor manera posible para reducir el impacto que tiene sobre el suelo: la retirada de madera deberá realizarse pasado un tiempo considerable en el que el suelo esté protegido por algo de cobertura vegetal, como herbáceas y no sea tan vulnerable a la erosión y a la degradación; o bien, después de la saca de madera para que el suelo no esté desnudo se puede aplicar un acolchado (mulch), utilizando la misma madera astillada por ejemplo. Además, es necesaria más investigación sobre los efectos que tiene la saca de madera en el suelo, teniendo en cuenta el tipo de suelo y las condiciones a las que éste está sometido; también se debería de profundizar más en el tiempo que debe pasar a la hora de realizar la saca de madera para que no haya un impacto en el suelo y su combinación con la aplicación del mulch.

## **9. Bibliografía**

- Andreu, V., Rubio, J.L., Forteza, J., Cerní, R., 1994. Long term effects of forest fires on soil erosion and nutrient losses. In: Sala, M., Rubio, J.L. (Eds.), Soil Erosion as a Consequence of Forest Fires, Geofoma Ediciones, Logroño, pp. 79-90.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mayoral, A.M., Morales, J., 2007. Factors controlling the water repellency induced by the fire in calcareous Mediterranean forest soils. Eur. J. Soil Sci. 58, 1254-1259.

- Ares, A., Terry, T.A., Miller, R.E., Anderson, H.W., Flaming, B.L., 2005. Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-fir growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1822-1832.
- Benito, E., Díaz-Fierros, F., 1989. Estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. *An. Edafol. Agrobiol.* 48, 229-253.
- Beschta, R.L., Rhodes, J.J., Kauffman, J.B., Griesswell, R.E., Minshall, G.W., Karr, J.R., Perry, D.A., Hauer, E.R., Frissell, C.A., 2004. Postfire management on forested public lands of the western United States. *Conserv. Biol.* 18, 957-967.
- Bisdom, E.B.A., Dekker, L.W., Schoutte, J.F.T., 1993. Water repellency of sieve fractions from Sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56, 105-118.
- Brais, S., Paré, D., Ouirmet, R., 2000. Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands. *For. Ecol. Manag.* 137, 231-243.
- Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen total. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, pp. 595-624.
- Brevik, E.C., 2013. Forty years of soil formation in a South Georgia, USA borrow pit. *Soil Horiz.* 54, 20-29.
- Burton, A.J., Pregitzer, K.S., Hendrick, R.L., 2000. Relationships between fire root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia* 125, 389-399.
- Castro, J., Moreno-Rueda, G., Hodar, J.A., 2010. Experimental test of postfire management in pine forests: impact of salvage logging versus partial cutting and nonintervention on bird-species assemblages. *Conserv. Biol.* 24, 810-819.
- Castro, J., Allen, C.D., Molina-Morales, M., Marañón-Jiménez, S., Sánchez-Miranda, A., Zamora, R., 2011. Salvage logging versus the use of burnt Wood as a nurse

- object to promote post-fire tree seedling establishment. *Restor. Ecol.* 19: 537-544. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00619.x>.
- Cerdà, A., 1996. Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. *Soil Technol.* 9, 129-133.
- Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10.
- Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Dlapa, P., Arcenegui, A., 2014. Long-term changes in soil aggregation comparing forest and agricultural land use in different Mediterranean soil types. *Geoderma* 235-236, 290-299.
- Coleman, D.C., Crossley Jr., D.A., Hendrix, P.F., 2004. *Fundamentals of Soil Ecology*. Esvier/Academic Press, Boston.
- DeLuca, T.H., Aplet, G.H., 2008. Charcoal and carbon storage in forest soils of the Rocky Mountain West. *Front. Ecol. Environ.* 6, 18-24.
- Díez, J.A., 1982. Consideraciones sobre la utilización de la técnica extractiva de Burriel-Hernando para la evaluación de fósforo asimilable en suelos. *An. Edafol. Agrobiol.* 41, 1345-1353.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 1998. Spatial variability of soil water repellency in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Sci.* 163, 313-324.
- Doerr, S.H., Dekker, L.W., Shakesby, R.A., Ritsema, C.J., Bryant, R., 2002. Water repellency of soils: the influence of ambient relative humidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 401-405.
- 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.
- Forster, J.C., 1995. Soil physical analysis. In: Alef, K., Nannipieri, P. (Eds), *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press Inc, San Diego, CA, p. 106.

- Froehlich, H.A., Miles, D.W.R., Robbins, R.W., 1985. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in Central Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1015-1017.
- García-Orenes, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Zornoza, R., Bárcenas, G., Caravaca, F., 2010. Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 109, 110-115.
- García-Orenes, F., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Arcenegui, V., Caravaca, F., 2012. Soil structural stability and erosion rates influenced by agricultural management practices in semi-arid Mediterranean agroecosystem. *Soil Use Manag.* 28, 571-579.
- 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 years monitoring research. *Science of the Total Environment.* 586, 1057-1065.
- González-Ochoa, A., López-Serrano, F., De las Heras, J., 2004. Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in *Pinus halepensis*? *For. Ecol. Manag.* 28, 571-579.
- Griffin, J.M., Simard, M., Turner, M.G., 2013. Salvage harvest effects on advance tree regeneration, soil nitrogen, and fuels following mountain pine beetle outbreak in lodgepole pine. *For. Ecol. Manag.* 291, 228-239.
- Grove, S.J., 2003. Coarse Woody debris, biodiversity and management: a review with particular reference to Tasmanian wet eucalypt forests. *Aust. For.* 66, 258-272.
- Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swason, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K., Cummins, K.W., 1986. Ecology of coarse Woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 15, 133-302.

- Hatten, J., Zabowski, D., Scherer, G., Dolan, E., 2005. A comparison of soil properties after contemporary wildfire and fire suppression. *For. Ecol. Manag.* 220, 227-241.
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 79, 207-219.
- Jara-Navarro, A.B., 2015. Estudio del Impacto del Fuego y Manejo Post-Incendio sobre la Cubierta Vegetal en Serelles, Sierra de Mariola. Trabajo de Fin de Grado en la Universidad Miguel Hernández, Facultad de Ciencias Experimentales, Grado de Ciencias Ambientales.
- Jennings, T.N., Smith, J.E., Cromack, Jr.K., Sulzman, E.W., McKay, D., Cladwell, B.A., Beldin, S.L., 2012. Impact of postfire logging on soil bacterial and fungal communities and soil biogeochemistry in mixed-conifer forest in central Oregon. *Plant Soil* 350, 393-411.
- Larsen, I.J., MacDonald, L.H., Brown, E., Rough, D., Welsh, M.J., Pietraszek, J.H., Libohova, Z., Benavides-Solorio, J.D., Schaffrath, K., 2009. Causes of post-fire runoff and erosion; water repellency, cover, or soil sealing? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1393-1407.
- Le Houerou, N.H., 1977. Fire and vegetation in North Africa. En: *Proc. Symp. Envir. Cons. Fire and fuel Manag. Medit. Ecosys. Forest Serv. Dep. Agric. U.S.*
- Lindenmayer, D.B., Noss, R.F., 2006. Salvage logging ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conserv. Biol.* 20, 949-958.
- Llovet, J., Josa, R., Vallejo, V.R., 2008. Thermal shock and rain effects on soil surface characteristics: a laboratory approach. *Catena* 74, 227-234.
- Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Kowalski, A.S., Serrano-Ortiz, P., Reverter, B.R., Sánchez-Cañete, E.P., Zamora, R., 2011. Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *For. Ecol. Manag.* 261, 1436-1447.

- Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Querejeta, J.I., Fernández-Ondoño, E., Allen, C.D., 2013. Post-fire wood management alters water stress, growth, and performance of pine regeneration in a Mediterranean ecosystem. *For. Ecol. Manag.* 308, 231-239.
- Martínez-Sánchez, J., Ferrandis, P., las Heras, J., Herranz, J.M., 1999. Effect of burnt wood removal on the natural regeneration of *Pinus halepensis* after fire in a pine forest in Tus valley (SE Spain). *For. Ecol. Manag.* 123, 1-10.
- Maser, C., Trappe, J.M., 1984. The seen and unseen world of the fallen tree. Forest Service General Technical Report PNW-164. Portland, United States Department of Agriculture, Forest Service.
- 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. *Int. J Wildland Fire.* 11, 107-114.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G.M., Torres, M.P., 2009. Forest fire effects on soil microbiology. In: Cerdà, A., Robichaud, P. (Eds), *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers, Inc, Enfield, New Hampshire USA, pp. 133-175.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Chrenková, K., Torres, P., Jara-Navarro, A.B., Diaz, A., Izquierdo, E., 2015. Salvage logging effect on soil properties in fire-effect Mediterranean forest: a two years monitoring research. *Geophys. Res. Abstr.* 17, 2460-2462.
- Mataix-Solera, J., Arnaiz, P., Arcenegui, V., Chrenková, K., López-Caravaca, A., García-Orenes, F., Jara-Navarro, A.B., Cerdà, A., 2016. Hydrological response 3 years after salvage logging treatments in a recently burnt forest soil. European Society for Soil Conservation Conference. Cluj-Napoca, Romania. 15-18 June 2016. Abstracts Book, p. 47.
- Mclver, J.D., Starr, L., 2001. A literatura review on the environmental effects of postfire logging. *West. J. Appl. For.* 16, 159-168.

- McNeil, J., 1992. The mountains of the Mediterranean world. An environmental history. Cambridge University Press, 423 pp.
- Moroni, M.T., Shaw, C.H., Otahal, P., 2010. Forest carbon stocks in Newfoundland boreal forests of harvest and natural disturbance origin I: field study. Can. J. For. Res. 40, 2135-2145.
- Nadelhoffer, K.J., 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. New Phytol. 147, 131-139.
- Naveh, Z., 1975. The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. Vegetatio 29, 199-208.
- Nelson, D.V., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A.L. (Ed), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Biological Methods, p. 816.
- Page-Dumroese, D.S., Jurgensen, M.F., Tiarks, A.E., Ponder, J.F., Sanchez, F.G., Fleming, R.L., Kranabetter, J.M., Powers, R.F., Stone, D.M., Eliooff, J.D., Scott, D.A., 2006. Soil physical property changes at the North American long-term soil productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. Can. J. For. Res. 36, 551-564.
- Pausas, J.G., Ribeiro, E., Vallejo, R., 2004. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the Eastern Iberian Peninsula. For. Ecol. Manag. 203, 251-259.
- Prosser, L.P., 1990. Fire, humans and denudation at Wangrah Creek, southern Tablelands. Australian Geographical Studies, 28, 77-95.
- Reisinger, T.W., Pope, P.E., Hammond, S.C., 1992. Natural recovery of compacted soils in an upland hardwood forest in Indiana. North. J. Appl. For. 9 (4), 138-141.
- Robichaud, P., 2009. Using erosion barriers for post-fire stabilization. In: Cerdá, A., Robichaud, P. (Eds), En: Fire Effects on Soils and Restoration Strategies. Science Publishers, pp. 337-352.



- Seedre, M., Shrestha, B.M., Chen, H.Y.M., Colombo, S., Jögiste, K., 2011. Carbon dynamics of North American boreal forest after stand replacing wildfire and clearcut logging. *J. For. Res.* 16, 168-183.
- Serrano-Ortiz, P., Marañón-Jiménez, S., Reverter, B.R., Sánchez-Cañete, E.P., Castro, J., Kowalski, A.S., 2011. Post-fire salvage logging reduces carbon sequestration in Mediterranean coniferous forest. *For. Ecol. Manag.* 262, 2287-2296.
- Sexton, T.O., 1998. Ecological Effects of Post-Wildfire Management Activities (Salvage Logging and Grass-Seeding) on Vegetation Composition, Diversity, Biomass, and Growth and Survival of *Pinus ponderosa* and *Purshia tridentata*. M.S. thesis Oregon State University.
- Smith, K.C., Coyea, M.R., Munson, A.D., 2000. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and dynamics under disturbed black spruce forests. *Ecol. Appl.* 10, 775-788.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Startsev, A.D., McNabb, D.H., 2000. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 80, 617-624.
- Stoddard, M.T., Huffman, D.W., Alcoze, T.M., Fule, P.Z., 2008. Effects of slash on herbaceous communities in pinyon-juniper woodlands of northern Arizona. *Rangel. Ecol. Manag.* 61, 485-495.
- Tang, J.W., Baldocchi, D.D., Qi, Y., Xu, L.K., 2003. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agric. For. Meteorol.* 118, 207-220.
- 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.
- Vega, J.A., Fernández, C., Pérez-Gorostiaga, P., Fonturbel, t., 2008. The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait.

- Recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *For. Ecol. Manag.* 256, 1596-1603.
- Vora, R.S., 1988. Potential soil compaction forty years after logging in Northeastern California. *Great Basin Nat.* 48 (1), 117-120.
- Wagenbrenner, J.W., Robichaud, P.R., 2014. Post-fire bedload sediment delivery across spatial scales in the interior western US. *Earth Surf. Process. Landf.* 39, 865-876.
- Wagenbrenner, J.W., Robichaud, P.R., Brown, R.E., 2016. Rill erosion in burned and salvage logged western montana forests: effects of logging equipment type, traffic level, and slash treatment. *J. Hydrol.* 541, 889-901.
- Wert, S., Thomas, B.R., 1981. Effects of skid roads on diameter, height, and volumen growth in Douglas-fir. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 629-632.
- Wessel, A.T., 1988. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. *Earth Surf. Process. Landf.* 13, 555-562.
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., Mayoral, A.M., Morales, J., Mataix-Beneyto, J., 2007. Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain. *Geoderma* 142, 334-341.